

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE



**Modelo híbrido para la toma de decisiones en  
programas de rehabilitación de tuberías para  
sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación  
a la ciudad de Celaya, Gto. (México)**

TESIS DOCTORAL

*Presentada por:*

**Carlos Daniel Alonso Guzmán**

*Dirigida por:*

**Dr. Rafael Pérez García**

**Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián**

Valencia, Julio de 2010



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS DOCTORAL

Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación  
de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la  
ciudad de Celaya, Gto. (México)

Presentada por: Carlos Daniel Alonso Guzmán

Dirigida por: Dr. Rafael Pérez García  
Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Valencia, Julio de 2010

Tribunal Calificador

---

Presidente

*José Roldán Cañas*

---

Secretario

*Rafael García Bartual*

---

Vocal 1º

*Ricardo Aliod Sebastián*

---

Vocal 2º

*Juan Reca Cardeña*

---

Vocal 3º

*Antonio Gallardo Izquierdo*



---

---

## AGRADECIMIENTOS

En todo proyecto de gran envergadura existen dificultades, pero también existen personas que nos alientan y nos ayudan a superarlas, por tal motivo quiero agradecer profundamente a toda las personas partícipes de este trabajo, que indirecta o directamente participaron en ello: opinando, dando animo, con sus oraciones, con sus muestras de apoyo en los momentos que mas lo necesite, a todos ellos gracias.

A la memoria de mis padres que con su ejemplo de perseverancia, de trabajo con ahínco y comprensión. Me demostraron con hechos, que con esfuerzo y dedicación se puede alcanzar la meta. Por que se que este proyecto fue tan anhelado por vosotros como para mi, espero haber correspondido a cabalidad.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Rafael Pérez García por haber confiado en mi persona, por la paciencia, ímpetu, entereza mostrado en todo momento, pero sobre todo por calidez y calidad humana que siempre he encontrado en su persona, cabe resaltar un agradeciendo muy especial por la dirección de este trabajo, siempre tuvo una respuesta cuando me agobiaban las dudas y que seguramente sin su atinada dirección, no hubiera llegado a buen término este trabajo.

Al Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián por sus comentarios, sugerencias y correcciones, igual de oportunas que precisas, matizando un agradeciendo de sobre manera por su completa y expedita disposición para colaborar en la revisión de este trabajo, fundamentales para la conclusión de esta tesis.

Un agradecimiento a Karla, Daniela y Carlitos que son mis tres fuentes de inspiración, sutilmente con su sonrisa y entusiasmo hicieron más ligero este proceso, pero sobre todo por entender sin el más mínimo reclamo mis ausencias, y enfrentar con osadía y aplomo esta aventura de atravesar el Atlántico, por su comprensión y apoyo. Les estoy profundamente agradecido.

A Raquel, mi esposa, que en todo momento tuvo la paciencia para estar a mi lado en este difícil trayecto, por brindarme constantemente palabras de aliento, cariño y demostrar su valentía sin recato alguno... como olvidarlo. Mil gracias.

Gracias a Manuel Herrera Fernández por compartir sus conocimientos, y por su valiosa aportación en el tema de estadística, dichas aportaciones sin duda enriquecieron este trabajo. Igualmente quiero agradecer a la empresa de aguas (JUMAPA) de la ciudad de Celaya, Guanajuato, México. Por proporcionar los datos tan valiosos, que se utilizaron en el caso de estudio para este trabajo. De la misma forma al Consejo Nacional de ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por su apoyo para la realización de esta tesis.



---

---





# Resúmenes



---

---





---

---

## Resumen

El abastecimiento del suministro a las poblaciones esta basado en una enorme y compleja infraestructura, que se ha ido expandiendo y desarrollando durante el ultimo siglo, a la par que envejece, expuesta al proceso de deterioro y a fallos sucesivos. Cuando las tuberías sufren roturas, el coste de su reemplazo es elevado, y no es económicamente viable sustituirlas después del primer fallo, de modo que el enfoque habitual es reparar las tuberías hasta que los costes de reparación sean claramente superiores a los costes de reemplazo, o hasta que otros proyectos de actuación en el subsuelo hacen económicamente atractiva la sustitución.

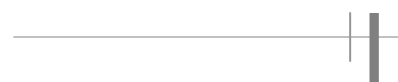
Los factores que intervienen en la toma de decisiones en un programa de renovación de las tuberías son muy diversos. Por este motivo, se deben de considerar, hasta donde sea posible, todas las variables que intervienen en los fallos de las tuberías. A partir de las variables de influencia se pueden obtener datos para su análisis y evaluación, y también es posible utilizar una gama de métodos para estructurar un programa de renovación de las tuberías, tales como métodos de optimización, estadísticos, etcétera, en función del tipo de datos y de la disponibilidad de los mismos.

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un modelo integral, que auxilie en la programación óptima de los trabajos en la priorización de la renovación de las tuberías en las empresas de agua, considerando la gran variedad que se presenta en los datos disponibles de una empresa de agua a otra, y el amplio rango en cuanto a la calidad y cantidad de los datos.

En este trabajo se aborda la problemática de la toma de decisiones para la priorización en la rehabilitación de tuberías a través de diversos enfoques, planteados en tres vertientes, y que a su vez se integran a través de una aplicación en un modelo integral. Dicho modelo integral esta constituido por tres sub-modelos (vulnerabilidad, eficiencia e Índice de evaluación de las condiciones físicas, IECF), con el objeto que la toma de decisiones considere los tres aspectos fundamentales en la rehabilitación de tuberías, como son: la vulnerabilidad y la eficiencia de la red y también su comportamiento estructural, sin perder la consideración de elementos tan importantes como son la disponibilidad de información y de recursos financieros.

Para la estructura y conformación de los modelos que forman parte del modelo integral, se desarrolla la metodología empleada para la asignación de prioridades de renovación de tuberías, mediante el uso del sistema de apoyo a la toma de decisión de las Sumas Ponderadas, así como las herramientas necesarias para ello, detallando las matrices de ponderación de alternativas y valoración de resultados.

Una vez que se aborda la metodología mencionada, se realiza la aplicación del sistema de soporte a la decisión de las Sumas Ponderadas, para la asignación de prioridades de renovación en ocho grupos tuberías de la red de Celaya, Gto. México. En este caso se tiene que hacer la agrupación de puntuaciones parciales de cada tubería respecto a cada uno de los criterios considerados, obteniéndose como resultado la priorización del grupo de tuberías. También se realiza el análisis de sensibilidad de los resultados, ante variaciones en la consideración de los valores en los pesos de los criterios.



---

---

Seguidamente, se aplica el método para jerarquizar cada uno de los grupos de tuberías para cada factor de influencia considerado, aplicando para ello Algoritmos Genéticos. Para evaluar el aspecto económico y determinar el orden de priorización, basándonos en el ahorro de energía eléctrica y el volumen recuperado del caudal fugado al rehabilitar las tuberías, así como el ahorro que se obtendría al evitar la consecuencia de un posible fallo, al momento de realizar la toma de decisiones de rehabilitar las tuberías.

Para determinar lo anterior se utiliza el programa de EPANET, conjuntamente con procedimientos de lógica difusa (específicamente los Números Difusos Triangulares). Para determinar la priorización en base al aspecto económico, se utiliza nuevamente la herramienta de Algoritmos Genéticos, y en este caso hay que resaltar que el resultado que se obtiene es la longitud óptima para renovar dentro de cada grupo de tuberías, de forma que se maximicen los beneficios.

El deterioro estructural se contempla dentro del Modelo de Evaluación de las condiciones físicas de las tuberías, y en él se plantea todo lo relacionado con el análisis de supervivencia y específicamente con la aplicación de los mismos en las redes de distribución, al igual que los modelos de riesgo proporcionales tanto semiparamétricos (Modelos de Cox) como paramétricos (Modelos de Weibull), presentando un caso de aplicación para la ciudad de Celaya, Gto. México. El objetivo es su aplicación en el análisis de los fallos en las redes de abastecimiento, para determinar en que grado influyen en el fallo de las tuberías un número determinado de covariables.

También se ha llevado a cabo la evaluación de los contrastes de las hipótesis de los modelos de Cox; a través de la evaluación del modelo de Weibull se determina el número de fallos futuros y consecuentemente, el orden de priorización, y por último, con la parte paramétrica del modelo de Cox, se determina el índice de evaluación de las condiciones físicas de las tuberías (IECF).

Asimismo, se ha desarrollado una aplicación del modelo integral para la toma de decisiones en la priorización para la rehabilitación de tuberías. En este proceso se utiliza el lenguaje R, el programa de estadística S-Plus y el SPSS. Como resultado se obtiene una aplicación desarrollada en Visual Basic. Dicha aplicación estructura al modelo integral que, a su vez, está constituido por tres sub-modelos (vulnerabilidad, eficiencia, Índice de evaluación de las condiciones físicas –IECF-). Como resultado se obtiene una lista de priorización basada en el número de fallos esperados, determinada con la función paramétrica del modelo Weibull.

Cabe resaltar que, con este modelo integral, es posible describir el estado “técnico” en que se encuentran las tuberías, de tal forma que puede ser una herramienta importante para la planeación en la rehabilitación de tuberías y la optimización de los recursos disponibles.

---

---

## Summary

Water supply to population is based on an enormous and complex infrastructure that has expanded and developed during the last century, while the water distribution networks age, the infrastructure of distribution systems is exposed to the process of deterioration and consecutive failures. Pipes are broken are expensive to replace, and replace is not economically viable after the first failure, the usual approach is to repair the pipes until repair costs clearly outweigh the costs of replacement, or until other underground projects are economically attractive replacement

Therefore, there are different factors involved in making decisions in a program to renovate pipes, and for that reason must be considered as far as possible all the variables involved in the failures of the pipes. Of which you can obtain data for analysis and evaluation as well as gamma methods for structuring a program to renovate pipes. Among the methods used, we can mention the methods of optimization, statistics, etc. Whereas for the application of these methods, the availability and type of data.

The aim of this work focuses on developing a comprehensive model, which aids in optimal scheduling of work on the prioritization of the renewal of pipes in the water companies. Considering the great diversity of data, available of a water company to another, and that can have a wide range in terms of quality and quantity of data, an aspect that was considered when framing the scope.

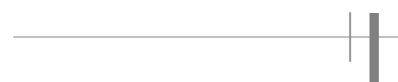
This paper addresses the problem of making decisions for prioritizing the rehabilitation of pipes, through several approaches, which arise in three aspects with the same number of models, and in turn are integrated in one application through a comprehensive model. This comprehensive model consists of three models (vulnerability, efficiency, evaluation index of the physical conditions (EIPC)).

In order that decisions consider the three fundamental aspects in the rehabilitation of pipelines as are the vulnerability and efficiency network and its structural behavior. Both data availability and financial resources are considered important elements. The result is a list of priority based on the number of failures expected, given the role parametric Weibull model.

For the structure and conformation of the models that are part of the comprehensive model is developed the methodology for prioritization of pipeline renewal system, using support decision making of the weighted sums, and the tools necessary for this, detailing the weighting matrices of alternatives and impact assessment.

Once the methodology is discussed above, we make the implementation of the system supports the decision of the weighted sums for the prioritization of renewal in eight groups of the network pipes Celaya, Gto. Mexico, where he has to make the grouping of partial scores of each pipe for each of the criteria considered, resulting in the prioritization of the group of pipes. The results will have a simple sensitivity analysis of variations in the consideration of values in the weights of the criteria.

It then applies the method to rank each of the groups of pipes for each influence factor considered by applying genetic algorithms to do so. To assess the economic and determine the order of priority, based on electricity savings and volume flow recovered



---

---

runaways, to rehabilitate pipelines and the savings that would result to avoid the consequence of a possible failure at the time making the decision to rehabilitate the pipes.

To determine the above is used Epanet program in conjunction with fuzzy logic, specifically the triangular fuzzy numbers. To determine the priority based on the economic side, again using the tool of genetic algorithms, and in this case, the result obtained is the optimal length of each group of pipes, which maximize the benefits.

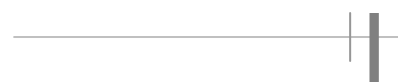
Structural deterioration in the evaluation model of the physical condition of the pipes, everything related raises survival analysis and specific to their application in distribution networks, as well as proportional hazard models both semiparametric (Cox's models) and parametric (Weibull models). With a case of application for the city of Celaya, México

Structural deterioration in the evaluation model of the physical condition of the pipes, there is everything related to survival analysis and specific to their application in the water distribution networks, as well as proportional hazard models both semiparametric (Cox's models) and parametric (Weibull models).

In order to apply them in analyzing the failures in the supply network and thus determine to what degree a number of covariates influencing the failure of the pipes, all with a handling and processing of information for statistical analysis . It is also carried out the evaluation of the contrasts of the model assumptions of Cox's, via the Weibull model assessment determines the number of failures and consequent future prioritization order, finally with the parametric Cox's model determines the assessment rate the physical condition of the pipes (IECF). It also develops a comprehensive model for implementing the decisions, in prioritizing the rehabilitation of pipelines. This process uses the language R, the statistical program S-Plus and SPSS.

The result is an application developed in Visual Basic, the integrated model is structured in this application, and this model consists of three models (vulnerability, efficiency, evaluation index of the physical conditions (IECF). Where as a result is a list of priority based on the number of failures expected, prioritization is determined through parametric function of the Weibull model.

Significantly, this comprehensive model can describe the state "technical" they are in the pipes, so that may be an important tool for planning the rehabilitation of pipelines and optimization of resources.



---

---

## Resum

L'abastiment del subministrament a les poblacions esta basat en una enorme i complexa infraestructura que s'ha anat expandint i desenrotllat durant l'ultim segle, mentres envellix, la infraestructura dels sistemes de distribució és exposada al procés de deteriorament i de fallades consecutives. Les canonades que patixen ruptures són costoses per a reemplaçar-les, i no és econòmicament viable substituir-les després de la primera fallada, l'enfocament habitual és reparar les canonades fins que els costos de reparació són clarament superiors als costos de reemplaçament, o fins que altres projectes subterranis fan econòmicament atractiu la substitució.

De tal manera que són diversos els factors que intervenen en la presa de decisions en un programa de renovació de les canonades, i per tal motiu es deuen de considerar fins on siga possible totes les variables que intervenen en les fallades de les canonades. Dels quals es poden obtindre dades per a la seua anàlisi i avaluació, així com la gamma de mètodes per a estructurar un programa de renovació de les canonades. Com ara mètodes d'optimització, estadístics, etc. Prenent en consideració la disponibilitat i el tipus de dades.

L'objectiu se centre a desenrotllar un model integral que auxilie en la programació òptima dels treballs en la prioritització de la renovació de les canonades en les empreses d'aigua. Considerant la gran diversitat de la disponibilitat de dades d'una empresa d'aigua a una altra, i que pot tindre un ampli rang quant a la qualitat i quantitat de les dades, aspecte que es considere al moment de plantejar els aconseguixes.

En este treball s'aborda la problemàtica de la presa de decisions per a la prioritització en la rehabilitació de canonades; a través de diversos enfocaments, els quals es plantegen en tres vessants amb el el mateix nombre de models, i al seu torn s'integren a través d'una aplicació en un model integral. El dit model integral esta constituït per tres models (vulnerabilitat, eficiència, Índex d'avaluació de les condicions físiques (IECF)). Amb l'objecte que la presa de decisions considere els tres aspectes fonamentals en la rehabilitació de canonades com són: la vulnerabilitat i l'eficiència de la xarxa així com el seu comportament estructural. Tenint en consideració un element important com són la disponibilitat de dades i dels recursos financers.

Per a l'estructura i conformació dels models que formen part del model integral, es desenrotlla la metodologia empleada per a l'assignació de prioritats de renovació de canonades per mitjà de l'ús del sistema suport a la presa de decisió de les sumes ponderades, així com les ferramentes necessàries per a això, detallant les matrius de ponderació d'alternatives i valoració de resultats. Una vegada que s'aborda la metodologia mencionada, es realitza l'aplicació del sistema de suport a la decisió de les sumes ponderades per a l'assignació de prioritats de renovació en huit grups canonades de la xarxa de Celaya, Gto. Mèxic, on s'ha de fer l'agrupació de puntuacions parcials de cada canonada respecte a cada un dels criteris considerats, obtenint-se com resultat la prioritització del grup de canonades. Es realitza l'anàlisi de sensibilitat del resultats ant variacions en la consideració dels valors en els pesos dels criteris."

A continuació, s'aplica el mètode per a jerarquitzar a cada un dels grups de canonades per a cada factor d'influència considerat, aplicant algoritmes genètics. Per a avaluar l'aspecte econòmic i determinar l'orde de prioritització, basat en l'estalvi d'energia

---

---

---

elèctrica i el volum recuperat del cabal escapat al rehabilitar les canonades, així com l'estalvi que s'obtingria a l'evitar la conseqüència d'una possible fallada, al moment de realitzar la presa de decisions de rehabilitar les canonades, s'utilitza el programa d'EPANET conjuntament amb la lògica difusa específicament els números difusos triangulars. Per a determinar la prioritització basant-se en l'aspecte econòmic s'utilitza novament la ferramenta d'algoritmes genètics, i en aquest cas cal ressaltar que el resultat que s'obté és la longitud òptima de cada grup de canonades, les quals maximitzen els beneficis.

El deteriorament estructural en el Model d'Avaluació de les condicions físiques de les canonades, es planteja tot allò que s'ha relacionat amb l'anàlisi de supervivència i en especifique amb l'aplicació dels mateixos en les xarxes de distribució, igual que els models de risc proporcionals tant semiparamètrics (Models de Cox's) com paramètrics (Models de Weibull). Amb un cas d'aplicació per a la ciutat de Celaya, Gto. Mèxic.

Amb l'objectiu d'aplicar-los en l'anàlisi de les fallades en les xarxes d'abastiment i determinar amb això en que grau un número determinat de covariables influïxen en la fallada de les canonades, tot açò amb un tractament i processament de la informació per a l'anàlisi estadística. També es du a terme l'avaluació dels contrastos de les hipòtesis dels models de Cox's, a través de l'avaluació del model de Weibull es determina amb el nombre de fallades futures i per consegüent l'orde de prioritització, per últim amb la part paramètrica del model de Cox's es determina l'índex d'avaluació de les condicions físiques de les canonades (IECF). Així mateix es desenrotlla una aplicació del model integral per a la presa de decisions, en la prioritització per a la rehabilitació de canonades. En este procés s'utilitza el llenguatge R, el programa d'estadística S-Plus i el SPSS.

Com resultat s'obté una aplicació desenrotllada en visual Basic, la dita aplicació estructura al model integral que al seu torn esta constituït per tres models (vulnerabilitat, eficiència, Índex d'avaluació de les condicions físiques (IECF)). On com resultat s'obté una llista de prioritització basada en el nombre de fallades esperats determinada amb la funció paramètrica del model Weibull.

Cal ressaltar que amb aquest model integral és possible descriure l'estat 'tècnic' en que es troben les canonades, de tal forma que pot ser una ferramenta important per a la planeació en la rehabilitació de canonades i l'optimització dels recursos.

---

---

## INDICE GENERAL

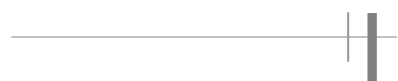
Capitulo 1.....	1
1    Introducción.....	3
2    Contexto del problema y Objetivos .....	6
3    Metodología.....	8
4    Contenido y desarrollo del trabajo .....	10
Capitulo 2 .....	15
1    Infraestructuras y los sistemas de la gestión de las infraestructuras.....	17
2    La renovación y las elecciones de inversión .....	20
3    La gestión de la infraestructura en las redes de agua potable.....	22
3.1    La gestión de la infraestructura (activos) " <i>Asset Management</i> ": definición ..	22
3.2    La gestión de la infraestructura aplicada a las RAP .....	24
3.2.1    Análisis económico .....	26
3.2.2    Análisis técnico .....	27
4    Mantenimiento integral de tuberías de agua.....	28
4.1    Inspección y recolección de datos .....	29
4.2    Técnicas no destructivas de inspección y monitorización.....	30
4.3    Priorización de tuberías para análisis y selección de técnicas apropiadas .....	30
4.4    Determinación de la probabilidad de fallo en sistemas principales.....	31
5    Toma de decisiones .....	32
5.1    Consecuencia de fallos en sistemas de abastecimiento .....	32
5.2    Toma de decisiones basadas en principios económicos .....	33
6    Conclusiones.....	35
Capitulo 3 .....	37
1    Funcionamiento de las redes de AP y la fiabilidad hidráulica .....	39
2    Introducción.....	39
3    El abastecimiento en las RAP.....	40
3.1    Funciones del Abastecimiento de Agua Potable .....	40
3.2    El suministro del agua potable en México.....	40
3.2.1    Provisión de servicios.....	40
3.2.2    Políticas .....	41
4    La distribución y las redes AEP .....	42
4.1    Estructura de la red RAP .....	43

4.1.1	Los conductos .....	43
4.1.2	Las bombas .....	44
4.1.3	Las válvulas .....	45
4.1.4	Los nudos.....	46
4.1.5	El rendimiento de la red.....	47
4.1.6	Los nudos a carga fija.....	48
4.1.7	Los depósitos .....	48
4.1.8	Los Embalses .....	49
5	Topología de la red RAP .....	49
5.1	Las redes ramificadas .....	49
5.2	Las redes malladas.....	49
6	La modelización hidráulica en la redes de RAP.....	50
6.1	Modelo para el dimensionado de la red.....	50
6.2	Modelo del análisis del funcionamiento hidráulico y diagnóstico .....	50
6.3	Modelo para la gestión de la red.....	50
6.4	Precisión del modelo de las RAP .....	51
7	Estudio de la fiabilidad hidráulica de las redes de RAP.....	52
7.1	Modelos para la fiabilidad hidráulica de las redes de agua potable (RAP)....	54
7.1.1	Failnet-Reliab (CEMAGREF).....	54
7.1.2	Relnet (Université de Technologie de Brno).....	55
7.1.3	Aquarel (SINTEF) .....	56
8	Toma en consideración por el efecto en la red y medida de la importancia de una tubería.....	56
8.1	Índices hidráulicos de fiabilidad.....	57
8.2	Índice de criticidad hidráulica. ....	58
8.3	Índice de deficiencia a los nudos.....	58
9	Conclusiones.....	60
Capítulo 4.....		61
Factores de Influencia y los Modelos de Ayuda a la Decisión.....		61
1	Factores de influencia en los fallos de las tuberías.....	63
1.1	Indicadores estructurales .....	68
1.1.1	La edad y el periodo de instalación .....	68
1.1.2	Número de roturas previas.....	69



1.1.3	Corrosión .....	70
1.1.4	Diámetro .....	70
1.1.5	Longitud de la tubería.....	70
1.1.6	Material de la tubería.....	71
1.2	Variaciones temporales.....	71
1.2.1	Condiciones del suelo.....	72
1.2.2	Proximidad en las excavaciones .....	72
1.2.3	Presión .....	72
1.2.4	Uso del suelo .....	72
1.3	Fiabilidad de las redes de distribución de agua .....	72
2	Modelos para la renovación de redes de agua (RAP).....	76
3	Las aproximaciones para la jerarquización de las tuberías.....	76
3.1	Modelos basados en la previsión de fallos .....	76
3.2	Modelos por cadenas de Markov .....	77
3.3	Modelos por Proceso de Poisson no homogéneo (NHPP) .....	77
3.4	Modelo por análisis de supervivencia .....	78
4	Discusión .....	79
5	Análisis multicriterio .....	79
6	El modelo de optimización de la fecha de renovación .....	81
7	Modelos de optimización con la ayuda de métodos exactos.....	81
7.1	El modelo de referencia.....	81
7.1.1	Discusión .....	82
7.2	El Modelo MNRAP (Multistage Network Rehabilitation Analysis Procedure) .....	82
7.3	Modelos de optimización por métodos de cohortes .....	83
7.4	Modelo de optimización por <i>Branch and Bound</i> .....	83
7.5	Modelo de optimización por métodos no exactos .....	84
8	Los modelos de ayuda a la decisión .....	84
8.1	Modelo KANEW .....	84
8.2	Modelo UtilNets .....	84
8.3	Modelo WLC (Whole Life Costing) .....	85
8.4	Modelo PARMS ( <i>Pipeline Asset and Risk Management System</i> ).....	86
8.5	Modelo CARE-W ( <i>Computer Aided Rehabilitation of Water Networks</i> ).....	86

9	Conclusión.....	87
<hr/>		
	Capitulo 5.....	89
1	Elección de criterios e identificación de alternativas .....	91
2	Modelo de la red de distribución de agua potable de Celaya .....	92
2.1	Asignación de las pérdidas volumétricas debidas a las fugas en la red.....	98
2.1.1	Corrección de la demanda mediante el rendimiento. ....	98
2.1.2	Representación de las fugas como consumos dependientes de la presión. .....	98
2.1.3	Asignación del caudal de fugas mediante un caudal medio constante... ..	99
2.1.4	Comparación de los distintos métodos propuestos.....	99
2.1.5	Ejemplo de la aplicación del modelo en el sector centro. ....	99
3	Determinación de los factores de influencia.....	106
3.1	Criterios Básicos.....	107
3.1.1	La edad y el periodo instalación de la tubería .....	107
3.1.2	Número de roturas acaecidas.....	107
3.2	Criterios Funcionales .....	108
3.2.1	Disminución de la capacidad hidráulica de la tubería.....	108
3.2.2	Índice de deficiencia en los nodos.....	108
3.2.3	Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo.....	108
3.3	Criterios Misceláneos .....	109
3.3.1	Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir-Howard....	109
3.3.2	Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua:.....	109
3.3.3	Impacto de una rotura en el medio ambiente.....	110
4	Identificación de alternativas: tuberías objeto de estudio.....	110
5	Evaluación de las tuberías seleccionadas según los criterios definidos .....	111
5.1	Criterios Básicos.....	111
5.1.1	La edad y el periodo de instalación de la tubería .....	111
5.1.2	Historial de fugas de cada tubería.....	113
5.2	Criterios Funcionales .....	114
5.2.1	Capacidad de transporte de cada tubería .....	114
5.2.2	Índice de deficiencia en los nodos.....	116

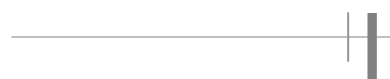


5.2.3	Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo.....	118
5.3	Criterios Misceláneos .....	120
5.3.1	Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir-Howard....	120
5.3.2	Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua.....	123
5.3.3	Impacto de una rotura en el medio ambiente.....	127
Capítulo 6	.....	129
1	Modelo de Vulnerabilidad.....	131
1.1	Herramientas a utilizar.....	133
1.2	Información necesaria.....	133
2	Metodología para la priorización del grupo de tuberías.....	134
2.1	Metodología para la asignación de prioridades de renovación de tuberías mediante el uso del sistema soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas .....	135
2.2	Métodos de solución.....	135
2.2.1	Métodos basados en el concepto de eficiencia de Pareto.....	136
2.2.2	Matriz de ponderación de alternativas.....	136
3	Valoración final de los resultados.....	137
3.1	Aplicación del sistema soporte a la decisión de las sumas ponderadas para la asignación de prioridades de renovación en ocho grupos tuberías de la red de Celaya, Gto. México .....	138
3.1.1	Agrupación de puntuaciones parciales de cada tubería respecto a cada uno de los criterios considerados.....	138
3.1.2	Análisis de sensibilidad de los resultados ante variaciones en la consideración de los valores en los pesos de los criterios .....	141
3.1.3	Función Objetivo .....	143
3.1.4	Método de Ordenar .....	143
4	Modelo de Eficiencia.....	144
4.1	Determinación de la relación del coste de energía y las fugas en las tuberías .....	145
4.1.1	Pérdida de agua y las relaciones energéticas en una tubería con fuga .	146
4.1.2	Formulaciones para una tubería con múltiples fugas .....	149

4.1.3	Coste de la energía de una red con fugas.....	151
4.2	Riesgo y sus consecuencias .....	160
4.2.1	Identificación del riesgo .....	161
4.2.2	Estimación de probabilidades.....	162
4.2.3	Estimación de las consecuencias .....	163
4.2.4	Estimación del riesgo .....	163
4.2.5	Análisis de riesgo de fallo en las redes de distribución de agua.....	164
4.2.6	El marco propuesto.....	165
4.3	Desarrollo del cálculo de la priorización.....	168
4.3.1	Calculo del caudal fugado .....	171
4.3.2	Calculo del riesgo de la consecuencia de fallo.....	172
4.3.3	Comentario .....	178
4.3.4	Función Objetivo .....	178
4.3.5	Método “recipe” (receta) y obtención de resultados .....	180
Capítulo 7	.....	183
1	Análisis de supervivencia.....	185
1.1	Conceptos básicos del análisis de supervivencia.....	185
1.1.1	Tiempo de fallos y de interfallos .....	185
1.1.2	Disponibilidad de datos incompletos de fallos.....	186
1.2	Métodos de análisis de supervivencia .....	187
1.2.1	Función de supervivencia.....	188
1.2.2	La función de distribución acumulativa .....	188
1.2.3	Función de riesgo (hazard function).....	189
1.3	Modelos de riesgos proporcionales de Cox´s.....	191
1.4	Modelos de distribución de Weibull.....	193
1.5	Modelo de riesgo proporcional estratificado.....	195
1.6	Proceso de Poisson no Homogéneo (NHPP).....	196
2	Conceptos generales de estadística.....	196
2.1	Índice de riesgo (HR) .....	196
2.2	Contrastes de hipótesis para el modelo de Cox .....	197
2.2.1	Test de razón de verosimilitud.....	197
2.2.2	Test de Wald.....	197
2.2.3	Test de puntajes (score test).....	198

3	La aplicación de los análisis de supervivencia en los sistemas de distribución y valoración de los resultados obtenidos .....	198
3.1	Andreou (1986,1986 <sup>a</sup> ), Marks (1998).....	199
3.2	Eisenbeis(1994, 1999), Le Gatt (2000) .....	199
3.3	Malandain (1998, 1999) .....	202
3.4	Rostum (2000) .....	202
3.5	Resumen de todos los estudios relacionados .....	202
4	Objetivo del Modelo .....	204
4.1	Modelación de la degradación de las redes de abastecimiento a través del análisis de supervivencia/fallo en un entorno complejo.....	204
5	La toma de decisiones para la planeación en la rehabilitación.....	205
5.1	Análisis de la información para los modelos de riesgos proporcionales.....	206
5.2	Preparación del análisis estadístico .....	209
5.2.1	Selección de las herramientas informáticas.....	209
5.2.2	Desarrollo de la base de datos .....	210
5.2.3	Análisis Preliminar .....	216
5.2.4	Descripción estadística de las tuberías. ....	222
5.2.5	Descripción estadística de las roturas.....	224
5.2.6	Descripción estadística de las tuberías y las roturas.....	227
6	Caso de Estudio .....	231
6.1	Significancia del factor de riesgo/ajustando los datos para un modelo de Cox (PHM).....	232
6.1.1	Todos los individuos.....	233
6.1.2	Conclusión.....	237
6.2	Aplicación del modelo de Cox con ajuste de las covariables.....	237
6.3	Estratificación respecto al material.....	239
6.4	Análisis de tuberías que no son de acero (Asbesto cemento y polietileno)..	241
6.5	Análisis de las tuberías que sufren una o más roturas .....	243
6.6	Resumen de los resultados.....	243
7	Análisis de los datos para el modelo de riesgo proporcional de Weibull.....	245
7.1	Forma paramétrica de las funciones de riesgo y de supervivencia.....	245
7.2	Todos los individuos sin estratificar.....	246
7.3	Estrato de tuberías de hierro galvanizado FOGA.....	249

7.4	Estrato de tuberías de asbesto cemento y polietileno .....	250
7.5	Valoración de los residuos en el análisis de supervivencia .....	251
8	Validación del modelo de Weibull .....	254
8.1	Conclusión de los resultados con el modelo de Weibull.....	264
9	El Índice de Evaluación de las Condiciones Físicas.....	265
9.1	Todos los individuos 2000-2006 .....	268
9.2	Estrato de las tuberías de fierro Galvanizado (FOGA) .....	269
9.3	Comparación entre métodos. ....	270
9.3.1	Para el estrato de los todos los individuos.....	273
9.3.2	Para el estrato de las tuberías de fierro galvanizado (FOGA) .....	273
9.3.3	Para el estrato de las tuberías asbesto cemento y polietileno .....	274
9.4	Priorización del orden de las tuberías para rehabilitar, aplicando los modelos de riesgo proporcional de Cox y de Weibull. ....	274
10	Nicho de oportunidades en la recolección de datos.....	280
10.1	Recomendaciones para la recolección de datos.....	282
10.2	Datos de Campo .....	289
10.3	Datos de Oficina .....	289
10.4	Datos de pruebas físicas .....	290
10.4.1	Pruebas a las tuberías.....	290
10.4.2	Prueba del suelo.....	292
11	Aplicación del modelo Integral en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías .....	292
Capitulo 8.....		299
1	Conclusiones.....	301
2	Desarrollos futuros .....	305
Referencias .....		307
Anexo 1 .....		323
Anexo 2 .....		341



---

---

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Estructura de la tesis.....	14
Figura 2. 1 Descripción del proceso de deterioro de las tuberías de agua potable (adaptado de Rajani y Kleiner, 2001).....	19
Figura 2. 2 Tipos de inversiones.....	21
Figura 2. 3 El proceso del Asset Management (Adaptada de FHWA,1999 et EPA, 2003) .....	23
Figura 2. 4 La gestión de las redes de agua potable .....	25
Figura 2. 5 Instrumento de ayuda a la decisión para la gestión de la red RAP (Adaptado por Skipworth <i>et al.</i> , 2002).....	26
Figura 2. 6 El ciclo de la gestión de tuberías (adaptado de Makar y Kleiner, 2000) ....	29
Figura 2. 7 Decisión para renovar un sistema según el coste de fallo.....	34
Figura 2. 8 Decisión para renovar un sistema principal con alto coste de fallo .....	34
Figura 3. 1 Ejemplo de una curva característica.....	45
Figura 3. 2 Ejemplo de una curva de modulación .....	47
Figura 3. 3 Clasificación de las redes de acuerdo a sus características topológicas.....	49
Figura 3. 4 Modelo de una red de detalle y una red simplificada.....	51
Figura 3. 5 Nivel de suministro en función de la presión (Adaptado de Wagner <i>et al.</i> , 1988).....	57
Figura 3. 6 Calculo del índice de fiabilidad hidráulica.....	59
Figura 4. 1 Cargas en las tuberías utilizada en UtilNets (adaptada de Preston <i>et al.</i> , 1999).....	73
Figura 4. 2 Tiempos de la recolección de datos .....	77
Figura 4. 3 Perfil del funcionamiento de 3 tuberías en consideración 5 criterios y 3 clases de tuberías .....	80
Figura 5. 1 Localización de la zona de estudio .....	92

Figura 5. 2 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo .....	93
Figura 5. 3 Registro de consumo diario.....	95
Figura 5. 4 Formato para la evaluación de exactitud de los contadores.....	95
Figura 5. 5 Modelo de la red del sector centro. ....	96
Figura 5. 6 Evolución de la demanda en los nodos .....	103
Figura 5. 7 Modelos hidráulicos de los cuatro sectores analizados.....	111
Figura 5. 8 Valoración de la edad de la tubería.....	113
Figura 5. 9 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos.....	117
Figura 5. 10 Macro IIQ que calcula el índice del impacto del $Q_{fuga}$ en la red.....	119
Figura 5. 11 Predicción de roturas en el tiempo .....	121
Figura 5. 12 Esquema de un sector de la localización geográfica de los consumidores “mayores” .....	123
Figura 5. 13 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos .....	126
Figura 6. 1 Estructura típica de la matriz de ponderación de alternativas.....	137
Figura 6. 2. Orden de prioridad de alternativas en función del valor de la agregación final de cada una de ellas.....	137
Figura 6. 3. Planteamiento de la función objetivo.....	143
Figura 6. 4. Celdas de priorización.....	144
Figura 6. 5 Línea del grado de energía (EGL) del segmento de una tubería con una fuga. ....	146
Figura 6. 6 Fugas relativas como una función de la pérdida de carga relativa y la localización de las fugas .....	148
Figura 6. 7 Índice de energía como una función de la localización de la fuga y la magnitud ( $\eta = 1, h_f = 0.5$ ).....	149
Figura 6. 8 EGL para una tubería con múltiples fugas y la correspondiente fuga equivalente.....	151
Figura 6. 9 Esquema del sistema de distribución con 10 mallas .....	152



---

Figura 6. 10 Fugas como una función del multiplicador de la demanda $K_D$ y las propiedades del orificio, caudales del sistema total con la presión compensada. ....	153
Figura 6. 11 Respuesta del coste de la energía debido a la complejidad del sistema..	155
Figura 6. 12 Red de distribución para el sistema presentado por Walski et al (1987).	156
Figura 6. 13 Curvas de costes de mantenimiento conceptual para una tubería (o para una porción de una red de distribución) .....	157
Figura 6. 14 Curvas del coste de la energía y del agua para una tubería fugando con demanda específica y características de fuga .....	158
Figura 6. 15 Esquema para la gestión del riesgo (adaptada de Holicky).....	161
Figura 6. 16 Estimación del conjunto difuso de los 5 grados lingüísticos .....	167
Figura 6. 17 Presión nodal con 85% de eficiencia en la red.....	170
Figura 6. 18 Presión nodal, estado actual de la red .....	170
Figura 6. 19 Caída de presión en la red, aplicando curva de bombeo original.....	171
Figura 6. 20 Acotamiento de las secciones de la acera en un tramo del sector centro.	173
Figura 6. 21 Estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso .....	176
Figura 6. 22 Planteamiento de la función objetivo y las restricciones .....	179
Figura 6. 23 Modelo de optimización.....	179
Figura 7. 1 Tiempo de fallo $T_i$ y tiempo de interfallos $X_i$ de un sistema reparable .....	185
Figura 7. 2 Datos de fallos disponibles típicos de un sistema de distribución. ....	186
Figura 7. 3 Grafica de la función de la densidad de probabilidad.....	189
Figura 7. 4 Forma de bañera de la función de riesgo o FOM.....	190
Figura 7. 5 Datos censurados (derecha) con entradas escalonadas .....	191
Figura 7. 6 Función de riesgo de la distribución Weibull $\lambda=0.1$ y $p$ variable .....	193
Figura 7. 7 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo.....	209
Figura 7. 8 Esquema del tráfico pesado del sector centro .....	211
Figura 7. 9 Esquema de las canalizaciones próximas compartidas .....	212
Figura 7. 10 Grafico de probabilidad normal de .....	217

---



---

Figura 7. 11 Grafico P-P del lnlong.....	217
Figura 7. 12 Grafico P-P de la edad.....	218
Figura 7. 13 lnH(t) para la edad.....	220
Figura 7. 14 lnH(t) para el material. ....	221
Figura 7. 15 lnH(t) para la variable longitud por estrato .....	221
Figura 7. 16 lnH(t) para la variable trafico. ....	222
Figura 7. 17 Grafica del número de fallos por año .....	224
Figura 7. 18 Número de fallos versus tuberías .....	227
Figura 7. 19 Función de riesgo de una tubería de fierro galvanizado de 40 años, con un relleno correcto, de un diámetro de 150 mm y 110 m. de longitud.....	248
Figura 7. 20 Betas para la covariable relleno .....	252
Figura 7. 21 Betas para la covariable material3 .....	252
Figura 7. 22 Betas para la covariable material2 .....	252
Figura 7. 23 Betas para la covariable longstrat2 .....	253
Figura 7. 24 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 100% de los individuos .....	260
Figura 7. 25 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 10% de los individuos .....	260
Figura 7. 26 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 100% de los individuos .....	262
Figura 7. 27 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 10% de los individuos .....	262
Figura 7. 28 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 100% de los individuos .....	264
Figura 7. 29 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 10% de los individuos .....	264
Figura 7. 30 Funciones del índice de riesgo de dos tuberías no modelado por un modelo de riesgo proporcional; la tubería C (constante) y la tubería D (incrementándose).....	266

---

---

Figura 7. 31 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; con ningún cambio en los factores de riesgo.....	267
Figura 7. 32 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; una tubería experimenta una rotura. ....	268
Figura 7. 33 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	270
Figura 7. 34 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	271
Figura 7. 35 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	271
Figura 7. 36 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	272
Figura 7. 37 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos. ....	272
Figura 7. 38 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos. ....	273
Figura 7. 39 Diagrama de flujo del proceso de la reparación de roturas y generación de datos.....	282
Figura 7. 40 Forma para la recolección de datos (pagina 1).....	284
Figura 7. 41 Forma para la recolección de datos (pagina 2).....	285
Figura 7. 42 Unifilar de la aplicación del modelo de vulnerabilidad .....	293
Figura 7. 43 Unifilar de la aplicación del modelo de vulnerabilidad .....	295
Figura 7. 44 Unifilar de la aplicación del modelo de IECF.....	296
Figura 7. 45 Unifilar de la aplicación del modelo de IECF.....	297

---

---

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 La gestión de la infraestructura adaptada a la renovación de las redes de agua potable (Alonso <i>et al</i> 2007) .....	25
Tabla 3. 1 Principales características de los sistemas de agua .....	41
Tabla 3. 2 Datos brutos del sector agua.....	42
Tabla 3. 3 Distintos tipos de tuberías .....	44
Tabla 3. 4 La curva de consumo o curva de modulación .....	46
Tabla 4. 1 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Rostum 2000).....	64
Tabla 4. 2 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Stone <i>et al.</i> , para EPA 2002) .....	65
Tabla 4. 3 Clasificación de factores tomada de Stephens y Jackson (2003). .....	66
Tabla 4. 4 Factores de influencia considerados en cada uno de los modelos (Leng y Pratti, 2002) .....	67
Tabla 5. 1 Número de acometidas .....	92
Tabla 5. 2 Coberturas de contadores .....	93
Tabla 5. 3 Cobertura de tarifas .....	94
Tabla 5. 4 Número de tuberías de los sectores de la red .....	96
Tabla 5. 5 Longitud de las tuberías de los sectores de la red .....	97
Tabla 5. 6 Material y eficiencia de las tuberías de los sectores de la red .....	97
Tabla 5. 7 Datos de los volúmenes del sector.....	100
Tabla 5. 8 Demanda horaria en nodos .....	101
Tabla 5. 9 Calculo del caudal de fugas.....	103
Tabla 5. 10 Calculo de los coeficientes de los emisores .....	105
Tabla 5. 11 Resultado del modelo aplicando los coeficientes de los emisores .....	106
Tabla 5. 12 Resultado de la valoración de la edad y periodo de instalación .....	112

Tabla 5. 13	Número de roturas por tipo de tubería.....	113
Tabla 5. 14	Puntuación de cada tubería en función del número de roturas / km. año..	114
Tabla 5. 15	Porcentaje de reducción del diámetro.....	115
Tabla 5. 16	Puntuación de la capacidad hidráulica .....	116
Tabla 5. 17	Valores de los índices de deficiencia en los nodos .....	117
Tabla 5. 18	Valores de los índices de impacto del caudal fugado.....	119
Tabla 5. 19	Índices y coeficientes de roturas.....	120
Tabla 5. 20	Costes de sustitución para los diversos diámetros.....	122
Tabla 5. 21	Costes de reparación para los diversos diámetros .....	122
Tabla 5. 22	Puntuación para los tiempos de renovación .....	123
Tabla 5. 23	Tipo y número de usuarios mayores por sector de análisis.....	124
Tabla 5. 24	Concentrado y puntuación del resultado del cierre de las tuberías .....	125
Tabla 5. 25	Puntuación final.....	126
Tabla 5. 26	Puntuación final de las densidades del trafico/edificios.....	127
Tabla 5. 27	Puntuación final.....	128
Tabla 5. 28	Concentrado final de valores y la suma aritmética.....	128
Tabla 6. 1	Grupo de tuberías y valores de los factores de influencia.....	134
Tabla 6. 2	Resultado de la puntuación sobre 100.....	141
Tabla 6. 3	Valores del análisis de sensibilidad.....	142
Tabla 6. 4	Matriz de valores de las sumas ponderadas.....	142
Tabla 6. 5	Escalas cualitativas de la probabilidad y consecuencia de riesgo de fallo..	166
Tabla 6. 6	Definiciones lingüísticas de los grados usando números difusos triangulares para riesgo.....	167
Tabla 6. 7	Obtención de los valores del riesgo difuso.....	168
Tabla 6. 8	Concentrado de valores de los factores de influencia .....	169
Tabla 6. 9	Factor de coste, longitudes totales y coste total .....	169

---

Tabla 6. 10 Coste diario de la energía para los diferentes escenarios planteados .....	171
Tabla 6. 11 Caudales diarios para los tres escenarios planteados .....	172
Tabla 6. 12 Escala cualitativa de las consecuencias de riesgo .....	173
Tabla 6. 13 Resultados de la clasificación de las consecuencias de riesgo.....	174
Tabla 6. 14 Concentrado del cálculo de la probabilidad de fallo .....	175
Tabla 6. 15 Escala cualitativa de la probabilidad de riesgo.....	175
Tabla 6. 16 Clasificación de la probabilidad de fallo .....	175
Tabla 6. 17 Resultados de los números difusos triangulares.....	176
Tabla 6. 18 Estructura de la obtención del riesgo difuso.....	177
Tabla 6. 19 Resultados del cálculo del coste de la consecuencia de fallo.....	177
Tabla 6. 20 Resultado y calculo de los beneficio al rehabilitar las tuberías.....	180
Tabla 6. 21 Concentrado de los factores, costes y beneficios totales para la optimización. ....	181
Tabla 6. 22 Resultados de la longitud óptima para cada grupo de tubería.....	181
Tabla 7. 1 Parámetros de regresión de los factores de riesgo significantes, para los modelos estratificados de CPHM y WPHM en LED-Bordeaux, CEB y Bas-Rhin .....	200
Tabla 7. 2 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Lausanne.....	201
Tabla 7. 3 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Charente-Maritime...	201
Tabla 7. 4 Resumen de los estudios de investigación (Adaptado de Vanrenterghem – Raven, 2003).....	203
Tabla 7. 5 Base de datos de 59 tuberías estadísticas del total de 1685, incluye roturas, variables de sobrevivencia y de censura (time; censor) entre otras, respectivamente.	208
Tabla 7. 6 Calculo de la aproximación de S(t) de Kaplan-Meier .....	220
Tabla 7. 7 Descripción estadística de las tuberías. ....	222
Tabla 7. 8 Descripción estadística de las tuberías, variables específicas del entorno. .	223
Tabla 7. 9 Tiempo promedio observado entre roturas dependiendo del número de roturas. ....	225

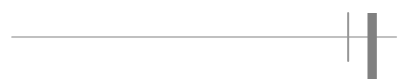
---

Tabla 7. 10 Número de tuberías de la misma categoría que se rompen, basado en el material y el número de roturas. ....	226
Tabla 7. 11 Descripción estadística de las tuberías .....	228
Tabla 7. 12 Descripción estadística de las tuberías por material y edad .....	230
Tabla 7. 13 Significancia estadística de cada variable con un PHM de Cox, para la población total .....	233
Tabla 7. 14 Resumen de la selección de Variables de un modelo de riesgo proporcional de Cox.....	244
Tabla 7. 15 Resultados de la comprobación del supuesto de riesgo proporcional .....	253
Tabla 7. 16 Tabla Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar. ....	255
Tabla 7. 17 Caso 1 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados .....	256
Tabla 7. 18 Caso 2 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados .....	256
Tabla 7. 19 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, sin modificar. ...	257
Tabla 7. 20 Caso 1 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados.....	258
Tabla 7. 21 Caso 2 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados.....	258
Tabla 7. 22 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, modificada. ....	259
Tabla 7. 23 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de FOGA .....	261
Tabla 7. 24 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de asbesto cemento y polietileno .....	263
Tabla 7. 25 Estrato para todos los individuos.....	277
Tabla 7. 26 Estrato Fierro galvanizado.....	278
Tabla 7. 27 Estrato tuberías de polietileno y hierro galvanizado .....	279
Tabla 7. 28 Recomendaciones para la recolección de datos.....	288
Tabla 7. 29 Rango mostrado con el modelo de evaluación.....	294
Tabla 7. 30 Rango para la evaluación de los factores de riesgo.....	295

---

---

Tabla 7. 31 Priorización en base al número de fallos esperados .....	296
Tabla 7. 32 Resultado del modelo integral, para la ayuda en la toma de decisiones....	297

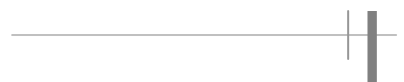


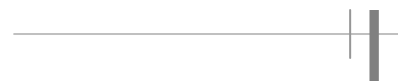


# Capítulo **1**

---

## Introducción





---

---

## 1 Introducción

En la actualidad, la pérdida de agua debido a las fugas y las consecuencias de los fallos en el sistema, son dos grandes retos para las empresas de agua, puesto que los caudales perdidos en las fugas frecuentemente alcanzan porcentajes por encima del 30%, y además, el caudal fugado se incrementa con el índice de fallo de las tuberías. Los gestores de los sistemas de distribución se encuentran comprometidos en la tarea de minimizar dichos fallos, como una vía para mejorar la sustentabilidad del servicio y aumentar la protección del medio ambiente.

El abastecimiento de agua a las poblaciones esta basado en una enorme y compleja infraestructura, que se ha ido expandiendo y desarrollado durante el último siglo. Mientras envejecen, las infraestructuras de los sistemas de distribución están expuestas al proceso de deterioro y a los fallos subsecuentes. El reemplazo de las tuberías que sufren roturas es costoso y no es económicamente viable, sustituirlas después del primer fallo. Por ello, el enfoque habitual consiste en reparar las tuberías hasta que los costes de reparación superan claramente a los costes de reemplazo, o hasta que la coordinación con otros proyectos de infraestructura urbana haga que la sustitución sera económicamente atractiva.

Los factores que intervienen en la toma de decisiones en un programa de renovación de las tuberías son muchos y diversos, y por ello se deben de considerar, hasta donde sea posible, todas las variables que intervienen en los fallos de las tuberías. De tales variables se pueden obtener datos para su análisis y evaluación, y se pueden inferir una gama de métodos para definir un programa de renovación de las tuberías. Dependiendo de la naturaleza, variedad y disponibilidad de los datos, se puede considerar la aplicación de métodos de optimización, estadísticos y otros.

Los modelos y métodos empleados deben de auxiliar en la toma de decisiones, identificando los costes y beneficios de las estrategias de rehabilitación, que a su vez resulten en un nivel aceptable de servicio. En su forma más sencilla, la decisión puede estar basada en una comparación de costes de distintas alternativas en cualquier instante de tiempo.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable se deterioran y fallan de manera frecuente, ocasionando pérdidas del agua producida, disminución de la confiabilidad del sistema, incrementos en los costes de operación, daños materiales, interrupción del servicio, todos ellos perjuicios añadidos al coste económico resultante de restaurar la tubería rota. Es virtualmente imposible sustituir todas las tuberías vulnerables al mismo tiempo. Consecuentemente, existe una necesidad de encontrar métodos que puedan ayudar a programar la rehabilitación y el reemplazo progresivos del sistema, conforme a los apremios presupuestarios.

La ausencia de una política de reemplazo de los componentes que hayan cumplido su vida útil en la red de distribución, así como la gestión prácticamente nula del estado de las tuberías y la necesidad de optimizar los recursos económicos disponibles, hace necesario el conocimiento de los factores de influencia que determinan la asignación de dichos recursos .

---

---

Debido a la escasa disponibilidad de los recursos económicos para la rehabilitación y mantenimiento de los sistemas de distribución de agua, en algunas empresas de agua se considera como una estrategia, postergar las acciones necesarias para el rubro de rehabilitación del sistema de distribución de agua, de tal forma que la “optimización” del mantenimiento preventivo en los sistemas de distribución, adopta un papel relevante para un adecuado funcionamiento de la red de distribución de agua. Pero no el nivel de funcionamiento deseado o requerido.

El elemento central en el proceso de decisión para la programación del mantenimiento preventivo es el proceso de deterioro natural de la tubería dentro de su entorno de funcionamiento. Es posible realizar la sustitución de las tuberías antes de que fallen, utilizando la planeación apropiada, asegurando los recursos financieros y los recursos de mano de obra necesarios para rehabilitar las tuberías.

Con este enfoque, se reducen al mínimo las interrupciones del servicio, mientras que la pérdida de tiempo del servicio se limita al tiempo usado en sustituir la tubería. La aparición de nuevos materiales debido al desarrollo de tecnologías para la fabricación de tuberías y accesorios, así como la obsolescencia de los materiales antiguos, ha provocado que exista una gran heterogeneidad en el tipo de tuberías y accesorios instalados en las redes de las ciudades. También es por ello necesario establecer una metodología de evaluación del estado de los componentes de una red de distribución de agua potable, así como determinar los mecanismos de análisis, para poder decidir sobre su reemplazo o rehabilitación.

El fallo de la tubería es una situación para la que los operadores del sistema de distribución deben estar preparados, tanto en términos de capacidad de mano de obra como en cuanto a los recursos financieros que se necesitan para restaurar el servicio proporcionado por la tubería. Las empresas de agua cuentan con un número de opciones para desarrollar una política en la sustitución o restauración de las tuberías. Para cualquier tubería del sistema, en un momento dado, existen tres alternativas posibles: no tomar ninguna medida, rehabilitar la tubería, o sustituirla.

Sobre la primera opción, las tuberías pueden fallar y en este caso, se sustituyen *a posteriori* (mantenimiento correctivo). Esta opción conduce a la ineficiencia en términos de: (a) la calidad del agua, puesto que en las tuberías antiguas se hace notar su influencia en la degradación de la calidad del agua; (b) indemnización para la propiedad dañada por la reparación y (c) las interrupciones inesperadas en el servicio a los clientes. Las roturas de la tubería, en algunos casos, pueden conducir a daños materiales a terceros, cuyo coste puede tener que ser asumido por la empresa de servicio público.

Los gestores de los sistemas de abastecimiento, por lo regular, responden de manera reactiva a las emergencias de las roturas, y la experiencia muestra que un número significativo de reparaciones son realizadas de forma no programada. En estos tiempos donde los recortes presupuestarios y la limitación de recursos son patentes, la capacidad de optimizar el mantenimiento a las infraestructuras, mediante el empleo de modelos de predicción en la etapa de planificación, se está convirtiendo rápidamente en una necesidad cada vez más patente en la gestión de la infraestructura hidráulica. Una planeación óptima del mantenimiento en un sistema de distribución con necesidad de reparaciones, puede permitir ahorros significativos de toda índole, incluso sobre reparaciones de emergencia o no programadas (Mays, 2000). La clave es permitir a los

---

planificadores predecir con la mayor exactitud posible, que componentes necesitan reparación con más urgencia y cuales otros necesitaran reparación en un periodo corto.

Para lograr este objetivo se han desarrollado métodos para obtener información, en cuanto a las tuberías que tienen más probabilidades de fallo y cuando estos fallos tiene más probabilidad de ocurrencia. Un modelo predictivo incluye un conjunto de técnicas que pueden ser utilizadas para determinar la probabilidad de fallo o tasa de fallos, para un elemento determinado. Las técnicas pueden ser de lo más variado, desde técnicas de modelado muy básico de selección de normas para análisis complejos, incluidos los métodos estadísticos y el análisis de supervivencia.

El reemplazo proactivo de tuberías permite superar estos problemas. En la situación en que las tuberías fallan antes de ser sustituidas, la pérdida de servicio incluye: la duración a partir del tiempo del fallo de la tubería al tiempo que se reporta el fallo; tiempo tomado para situar la tubería fallada y finalmente el tiempo que toma reparar la tubería. Las empresas de agua, por experiencia, llegan a la conclusión: *de que no hacer nada hasta que en un componente del sistema se presente un fallo, no es la mejor decisión debido a las reparaciones costosas, al descontento del cliente y a los problemas ambientales potenciales*. Cuando las tuberías se sustituyen con anticipación (mantenimiento preventivo), el número de roturas o de fallos inesperados se reduce al mínimo.

Existe una necesidad creciente para diseñar métodos que permitan ayudar en la rehabilitación progresiva del sistema, mediante un reemplazo conforme a restricciones presupuestarias. Por ejemplo, en muchos ayuntamientos se coordina el reemplazo de las tuberías antiguas con la programación de pavimentado en las calles.

Cualquier decisión relativa a la sustitución o a la rehabilitación de tuberías debe incluir una consideración del impacto de una tubería particular en todo el sistema. Aunque la inspección *in situ* de una tubería es el mejor procedimiento para analizar su condición, este enfoque es extremadamente costoso y puede resultar destructivo, puesto que requiere excavar para alcanzar una tubería y también requiere destruir una capa de pavimento que, posiblemente, se encuentre en buenas condiciones. Actualmente se han desarrollado metodologías para la gestión de las tuberías, basadas en el uso de técnicas de evaluación no destructivas, que proveen información acerca de la condición de las tuberías, sin necesidad de intervención física sobre las mismas. Descrito lo anterior, otro factor determinante en la toma de decisiones para la rehabilitación de las tuberías es la gestión del sistema de integral de la red, así como la inspección y recolección de datos, cuya cantidad y calidad es esencial para la gestión de los mismos.

Los modelos actuales de gestión de abastecimientos incluyen mayoritariamente sistemas de aseguramiento de calidad en el seguimiento de sus procesos y en general adoptan, en mayor o menor grado, políticas de mantenimiento reactivo y proactivo. La adopción de una u otra política es, sin duda, una prueba fehaciente del grado de evolución gerencial que alcanza una empresa de aguas. La asignación de recursos y la operación de los mismos, para el primer caso, atiende generalmente a criterios financieros y la elección de las tuberías o sectores a afectar, se realiza acorde a estadísticas aisladas y/o de emergencias, tal y como el número de roturas, además de otras informaciones como la predicción de trabajos de construcción de vías o restauración del pavimento.

---

---

En estas situaciones, el estado actual de la red no suele, desgraciadamente, ser considerado a fondo por parte del abastecimiento. En el segundo caso, el modo de actuación se determina solamente después de considerar la situación de las tuberías, en el presente y su grado de afectación con el paso del tiempo.

Parece evidente que esta última manera de actuar es la deseable, pero su aplicación requiere de un amplio estudio del funcionamiento de la red, así como de una base de datos importante, tanto en su magnitud como en la calidad de la información que contiene. Pero sobre todo, requiere disponer de estructuras teóricas aplicadas a la práctica, que faciliten, una vez conocido el estado de forma del sistema, la toma de decisiones para una eficiente intervención encaminada a renovar sus tuberías.

Resulta por lo tanto necesario proveerse de herramientas que permitan abordar el problema de la renovación de redes, con conocimiento de causa, atendiendo así a la necesidad de solventar problemas típicos tales como el establecimiento de un orden de prioridades en la renovación de tuberías. Las herramientas teóricas incluidas en este documento y que constituyen la columna vertebral del mismo, pretenden plantear métodos que principalmente atienden al razonamiento científico y la lógica, pero que en modo alguno pretende cerrar la discusión creada en torno a este tema.

Hay que recordar que los resultados arrojados por la correcta aplicación de una metodología, se ven usualmente contrastados por la realidad plasmada en el terreno: el diario transcurrir de un proyecto de ingeniería nos recuerda que trasladar recursos humanos, maquinaria y materiales constructivos de un sitio a otro, cuesta dinero. Y trasladarlos a través de grandes distancias, ceñidos tan solo a un orden de renovación de tuberías establecido, podría encarecer de manera relevante el costo total de la obra, haciéndola, en el caso más extremo, inviable.

## **2 Contexto del problema y Objetivos**

Para determinar la priorización en la renovación de las tuberías, no es sencillo identificar los factores que influyen en el deterioro de las tuberías, dado que la selección debe apoyarse, en primera instancia, en la identificación de aquellos criterios fundamentales a la hora de seleccionar la tubería que debe ser afectada en primer lugar. La edad es, sin lugar a dudas, el primer criterio a incluir en la lista pero no el único, pues también están otros, tales como la disponibilidad de los recursos financieros requeridos por parte de las empresas de agua, que operan las redes de agua potable (RAP). El objetivo es mejorar la fiabilidad en el funcionamiento de la red. La priorización en la renovación de las tuberías se efectúa según un proceso de toma de decisión que tiene en cuenta un conjunto de variables vinculadas a las tuberías y a su entorno, las condiciones de operación de la red, restricciones técnicas y por supuesto financieras, etcétera.

El presente trabajo pretende describir el proceso de ayuda para la toma de decisiones, identificando las variables y los criterios que hay que tomar en consideración. El objetivo general es proponer un modelo integral, para establecer el orden de prioridad en los trabajos de renovación de las tuberías, basado en los recursos financieros disponibles en las empresas de abastecimiento de agua. Los objetivos específicos serán:

⇒ Obtener el orden de prioridad en la sustitución de las tuberías analizadas con y

---

sin restricciones presupuestales. El primer caso es el habitual en la gran mayoría de las empresas de abastecimiento de agua,

- ⇒ Planteamiento de la optimización sobre la base de los costes.
- ⇒ La optimización, indudablemente, contempla el balance entre los beneficios que se obtienen al tomar la decisión de rehabilitar las tuberías contra los costes en los que se incurre por no hacerlo, tales como:
  - El coste del caudal fugado,
  - La energía eléctrica que conlleva dicho caudal, así como
  - Las consecuencias (daños a terceros) que puedan aparecer con el posible fallo de las tuberías por no rehabilitar las mismas de una manera óptima.

Tomando en consideración una serie de factores de influencia para la priorización de un grupo de tuberías con características homogéneas, respecto a la edad y el tipo de material, se considera la eficiencia de la red, no solamente en términos volumétricos, sino además desde el aspecto energético. Así mismo se analizan y evalúan las condiciones estructurales de las tuberías, mediante un análisis estadístico de supervivencia.

El modelo integral que se plantea esta constituido por tres sub-modelos (vulnerabilidad, eficiencia, Índice de evaluación de las condiciones físicas - IECF), al objeto de que la toma de decisiones considere los tres aspectos fundamentales en la rehabilitación de tuberías, como son la vulnerabilidad, la eficiencia de la red y su comportamiento estructural. No hay que olvidar un elemento importante, como es la disponibilidad de información, puesto que las bases de datos con las que cuentan las empresas de agua, varían en cuanto a la cantidad y la calidad de los datos que contienen.

El modelo describe el estado “técnico” en que se encuentran las tuberías, y en consecuencia, puede ser una herramienta importante en la tarea de la planeación de la rehabilitación de tuberías.

En primer término, describimos la problemática de renovación de las redes de agua potable. Seguidamente identificaremos la posición que ocupa la priorización de la renovación de las redes de agua potable, dentro de la gestión de la red del abastecimiento de agua potable (RAP) en su conjunto. Por último, caracterizamos la problemática de la renovación, resaltando las dificultades de identificación de las necesidades y la formulación de los trabajos de renovación.

Es interesante definir primeramente el contexto actual en el cual han evolucionado los servicios de agua. Las prioridades y los objetivos de los servicios han cambiado con el paso del tiempo, por efecto de grandes obras de conducciones de agua realizadas después de la segunda guerra mundial. En México particularmente, el gran auge de estas obras en un contexto desarrollista, se produce después de la década de los 60 hasta principios de los años 80, aunque en la mayoría de las poblaciones, existen tuberías con una antigüedad de 80 y hasta los 120 años, con diferentes materiales de las mismas.

A fin de asegurar el suministro del agua hacia las viviendas, las prioridades de los servicios del agua evolucionan, con el fin de permitir la continuidad en el servicio y conseguir que el suministro de agua a la población se realice en la cantidad y con la

---

calidad en un nivel satisfactorio. Para hacerlo, es necesario un mejoramiento del rendimiento de las redes, tanto mediante el incremento de la fiabilidad de red (cambio, renovación, fortalecimiento) como mediante una mejor gestión de los fallos que puedan ocurrir.

En el objetivo de reducir la molestia ocasionada a los usuarios y los riesgos de contaminación del agua, el servicio de agua debe asegurar no solamente la distribución del agua, sino también ser capaz de anticipar la evolución futura de la red y de la demanda de los usuarios, con el fin de garantizar el suministro del vital líquido. La necesidad de la renovación se hace sentir porque una buena parte de las redes de abastecimiento de agua Potable (RAP), tanto en México como en la mayoría de los países de su entorno, se han instalado entre finales de los años 1950 y 1970, de modo que contando con que la vida útil media de una tubería, puede ser de aproximadamente unos 70 años, resulta ya apremiante plantear el reemplazo de una gran parte de estas redes.

Con el fin de conocer el estado de las redes y de identificar las necesidades en su renovación, se han tomado diversas iniciativas de inventario de infraestructura y de actualización del catastro de las redes de agua, así como de recolección de datos relativos a las mismas. Así ha ocurrido en el caso particular de la ciudad de Celaya, Gto. México. Dichos trabajos han sido realizados por parte de la empresa de agua que opera el sistema (JUMAPA). En México, las iniciativas de inventario y catastro se generalizaron a partir de la década de los años 80, a partir de la implementación del programa nacional de actualización del catastro de las redes de agua potable en las ciudades con más de 50,000 habitantes.

### **3 Metodología**

Para la estructura del modelo integral se aplica la siguiente metodología:

#### **Planteamiento del problema.**

Es necesario desarrollar una herramienta tangible, que nos permita tomar la decisión óptima en la priorización de la renovación de las tuberías, en base a la disponibilidad de los recursos financieros y de los datos con que cuentan las empresas de abastecimiento de agua, considerando los factores que inciden en los fallos y en el funcionamiento hidráulico y estructural de la misma (capítulo 1).

#### **Revisión de los diversos factores de influencia y de los modelos previos**

Se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte de ante la consideración de la gran variedad de los factores de influencia, como por ejemplo los desarrollados por la EPA, el proyecto europeo CARE, Cemagref, y otros. Al igual que en los modelos mencionados, hemos decidido abordar la importancia de estudiar los factores de influencia (capítulo 6)

#### **Recopilación y análisis de los datos**

Es importante señalar que para el planteamiento de los objetivos, el alcance de este trabajo y el desarrollo de los modelos, un factor importante es la disponibilidad y la calidad de los datos con los que cuenta la empresa de aguas de la ciudad de Celaya,



---

---

México, la cual proporciono la información para el caso de estudio que desarrolla en esta tesis. Los factores considerados no son exclusivos para la ciudad de Celaya, sino que son generalizables para la inmensa mayoría de las empresas de agua.

Una parte relevante en esta tesis fue la recopilación y el procesamiento de los datos con los que se contó. El trabajo previo con los datos fue necesario, tanto para definir los factores de influencia a evaluar, como para el análisis de supervivencia, el cual fue aun mas detallado en procesamiento, especialmente al discriminar el tipo de fuga.

### **Estructura y metodologías del modelo integral**

Como se ha mencionado, el objetivo de este trabajo es la conformación de un modelo integral para la toma óptima de la decisión en la renovación de tuberías, que consta a su vez de tres modelos, como son: los modelos de vulnerabilidad, eficiencia y de la evaluación de las condiciones físicas de las tuberías,

Se aplica el modelo de vulnerabilidad a los cinco sectores seleccionados, mediante Epanet, aplicando el método de asignación de fugas dependientes de la presión. Asimismo se plantea la priorización de las tuberías en base a la valoración de los factores de influencia. En este caso se aplica el sistema de soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas, para el grupo de tuberías del caso de estudio.

Sobre este mismo modelo se utiliza la técnica de los algoritmos genéticos mediante la aplicación de Evolver, para la jerarquización del grupo de tuberías, a partir de cada factor de influencia individual para cada uno de los grupos de tuberías.

En el modelo de eficiencia se aborda el concepto de optimización, en base a los beneficios que se obtiene al rehabilitar las tuberías evitando o ahorrando el caudal fugado y la energía eléctrica aplicado en ello, al igual que el beneficio de evitar las posibles consecuencias que se pueden presentar al no rehabilitar una tubería. En este modelo de eficiencia, la decisión óptima para la rehabilitación de las tuberías se realiza a través de algoritmos genéticos utilizando Evolver. Dichos modelos forman parte del capítulo 6.

En lo que se refiere al modelo de la Evaluación de las condiciones físicas de las tuberías, se analiza y evalúa la degradación estructural de las tuberías, con el análisis estadístico de los fallos previos presentados, así como de las características intrínsecas de las mismas, tales como el diámetro, material, longitud, etcétera, aplicando los modelos de riesgo proporcionales tanto semiparamétricos (Modelos de Cox) como paramétricos (Modelos de Weibull). En este caso nos auxiliamos del lenguaje R para el análisis estadístico (capítulo 7).

Finalmente, se ha diseñado una aplicación que plasma el modelo integral presentado

### **Obtención de resultados**

Con el modelo integral, los gestores de las redes de abasteciendo podrán tener la oportunidad de evaluar el sistema de distribución, desde varios aspectos como son: el eficiencia de la red, la economía de la misma, el funcionamiento hidráulico, así como el aspecto estructural y la vulnerabilidad que puede alcanzar, dando lugar finalmente a una lista priorizada de las tuberías que se deseen cambiar.

---

## 4 Contenido y desarrollo del trabajo

A continuación vamos a presentar de forma sucinta el contenido del trabajo de investigación que se ha desarrollado, con la integración de cada una de sus etapas.

En el capítulo 1 se define el contexto que envuelve a las redes de abastecimiento de agua potable en general y en particular, el contexto del problema de la renovación y rehabilitación de las tuberías. Por una parte, es necesario un estudio de las causas que provocan el fallo en las tuberías y los factores que influyen en dichos fallos. Los factores de influencia pueden ser de naturaleza muy variada, abarcando desde causas ambientales (tensiones mecánicas y térmicas, interacción terreno-tubería y tubería-agua, tráfico rodado, vibraciones y otras) hasta las características de la propia tubería (material, edad, sistema de juntas, etcétera). Para poder conocer en un grado razonable la influencia de los factores indicados, su afección en el estado de la tubería y en la aparición de un posible fallo es necesario contar con un buen registro de casos de fallo, bien documentado en cuanto a las variables cuya influencia deseamos conocer. Aparece así la necesidad de contar con un sistema de información de las incidencias en la red, plasmado en una base de datos preferiblemente geo-referenciada.

Aún en el supuesto ideal de que dispongamos de información suficiente sobre las variables que influyen en el deterioro de las tuberías y de modelos estadísticos, bien calibrados que relacionen dichas variables con el fallo de la tubería, el problema no estaría completamente definido, puesto que contamos con limitaciones de presupuesto que acotan las posibilidades y el alcance de la rehabilitación. La segunda pieza clave es diseñar un sistema de apoyo a la toma de decisiones, en cuanto a la priorización de las acciones a realizar. Parece adecuado pensar que deben ser rehabilitadas aquellas tuberías en las que un fallo pueda provocar unas consecuencias más costosas que en otros casos de fallo. Sin embargo, la valoración del riesgo debido a un fallo en las tuberías es también una tarea dificultosa, pues es necesario conocer o estimar el área de influencia del posible fallo, las consecuencias económicas y de otra índole a que conduciría dicho fallo. De nuevo se hace necesario contar con una buena base de información geo-referenciada, en cuanto a los bienes e instalaciones que podrían ser afectadas por un fallo en las tuberías.

Todos los elementos que se han relatado en el párrafo anterior forman parte de un contexto ideal que, desgraciadamente, no es el actual y ni tan siquiera se aproxima a la realidad de muchos (casi todos) los sistemas de abastecimiento de agua. Las carencias de información son muy importantes y la mayor parte del esfuerzo de las entidades gestoras del sistema se dedican a mantener el nivel de servicio día a día, de modo que los recursos humanos y materiales para adquirir información estratégica, para adoptar acciones a medio y largo plazo son escasos.

La decisión sobre la renovación de tuberías es sensible a la manifestación de acontecimientos imprevistos (roturas, fugas), que representan el acto final en el proceso de deterioro de las tuberías. Este deterioro puede ser descrito según tres niveles, con arreglo al elemento tomado en consideración de análisis. Distinguiremos entre el deterioro estructural de la tubería que se manifiesta por una rotura de la tubería, fuga o el hundimiento de la calzada, que es un deterioro físico vinculado al envejecimiento. En segundo lugar, el deterioro hidráulico, que se manifiesta por una caída de presión y de

---

caudal debido al estrechamiento de la sección interna (diámetro) de las tuberías, causada por depósitos de sedimentos, las incrustaciones, la corrosión o las fugas. Finalmente, en tercer lugar, el deterioro de la calidad del agua provocada por infiltraciones de sustancias o materia en las tuberías.

En el presente trabajo tendremos en cuenta solamente los dos primeros niveles. La renovación es una inversión material, que consiste en reemplazar un equipo o una infraestructura por otra infraestructura idéntica o de función idéntica. A través de los esquemas de los diferentes tipos de inversiones, identificamos las especificaciones de la renovación y pondremos énfasis en las insuficiencias, vinculadas a los criterios económicos que permiten la toma de decisiones en materia de inversión. Es claro que la decisión de renovación de las redes de agua potable (RAP) debe tener en cuenta, criterios más allá de los puramente económicos, como aquellos vinculados al funcionamiento de la red y a su topología. Posteriormente introducimos la noción de gestión de la infraestructura o "*Asset Management*", describiendo los pasos y las diferentes etapas que la caracterizan.

El capítulo 2 pretende introducir la problemática de renovación de redes de agua potable. En él se pone de manifiesto la necesidad de una buena gestión de la infraestructura, como indicador para la obtención de datos y de información, para la priorización en la renovación de las redes de agua potable (RAP), al igual que la integración de criterios económicos y técnicos sobre el proceso de toma de decisiones.

En el capítulo 3 se define el contexto que caracteriza el sector de la distribución del agua en México, y se introducen las nociones y los conceptos que permiten comprender el funcionamiento de la red RAP. Las redes de agua potable son un conjunto de accesorios y de dispositivos hidráulicos bajo presión, que tienen como función la captación, la conducción y la distribución del agua potable. Distinguimos entre dispositivos de almacenamiento, depósitos, conducción y de distribución a través de las bombas, las válvulas y las tuberías. Las redes RAP son redes enterradas, de modo que el control directo de la evolución del estado de las canalizaciones en el tiempo resulta difícil. La necesidad de intervenir sobre la red aparece en caso de deterioro de la tubería. El análisis del funcionamiento de la red de agua potable permite identificar las variables endógenas (diámetro, longitud, número de fallos, naturaleza del agua, la rugosidad de la tubería) y exógenas (naturaleza del terreno, la ocupación del suelo, el nivel de circulación, etcétera), que describen el deterioro de las tuberías y la manifestación del envejecimiento.

También ponemos énfasis en la sensibilidad del funcionamiento de las tuberías en relación con la topología de la red y a la indisponibilidad de ciertas tuberías. Además trataremos la problemática de modelación de la red. Dos aspectos deben ser tomados en consideración: el aspecto vinculado al deterioro estructural, que tiende a considerar el conjunto de las tuberías de la red y por otra parte, el aspecto vinculado al funcionamiento hidráulico de la red, que tiende a simplificar la red para facilitar el modelo. Además, en el capítulo 3 explicaremos también el concepto de la fiabilidad hidráulica en las redes de agua potable, así como los diversos modelos que se han desarrollado hasta la actualidad.

En el capítulo 4, detallamos los factores de influencia en el fallo de las tuberías, las diversas clasificaciones y agrupación de los factores de influencia que se han realizado,

---

al igual que los diversos modelos, para determinar la valoración de los factores de influencia en el índice de roturas en las tuberías. Además, analizamos los diferentes modelos y los enfoques propuestos para la práctica de la renovación de las redes RAP, distinguiendo tres niveles de análisis. El primer nivel contiene el conjunto de los instrumentos, los modelos y los métodos que intentan describir el deterioro estructural de la red, con la ayuda de las variables mencionadas y jerarquizar las tuberías, sin proponer una programación de los trabajos a efectuar, utilizando aproximaciones diversas, tales como Cadenas de Markov, Análisis Multicriterio, Análisis Estadístico y otros. El segundo nivel de análisis se apoya en la determinación de vencimientos para la renovación. Con la ayuda de instrumentos de optimización, es posible efectuar elecciones y una programación de los trabajos, que permite tratar los elementos críticos identificados al nivel inicial de renovación. La optimización se articula sobre objetivos económicos o técnicos. El método de optimización utilizado generalmente es la Programación Dinámica.

En este punto identificamos dos límites principales. La implementación del método en el caso de varias alternativas de intervención sobre la red da lugar a un crecimiento del número de cumbres de los grafos de decisión, en particular para redes de tamaño importante. El segundo límite concierne al carácter conjunto-objetivo de la búsqueda de las soluciones, que no permite tener en cuenta varios criterios a la vez. Aclaremos las insuficiencias de cada aproximación, e introducimos métodos heurísticos, particularmente los algoritmos genéticos (Goldberg, 1994) como aproximación de optimización, aplicada sobre la problemática de renovación y sobre los problemas multiobjetivo (Halhal *et al.*, 1997). El tercer nivel maneja modelos de ayuda a la decisión, integrados por gestión de la red en conjunto, que se articulan sobre datos y módulos de cálculo, para la renovación de las redes RAP. El interés es describir el proceso de ayuda a la decisión y apoyarse en ello, para proponer una aproximación para la programación de los trabajos de renovación.

En el Capítulo 5 abordamos la elección de criterios e identificación de alternativas, donde los procesos que se plantean tienen como objetivo final, establecer una jerarquía en las tuberías de una red de distribución de agua potable, ordenadas en función de la necesidad (prioridad) de ser renovada o rehabilitada. Para ello se utilizan ocho criterios, en cada uno de los cuales, cada grupo de tubería tomará un valor concreto con un atributo dependiente de cada criterio, valor que finalmente se hace corresponder con un puntaje desde 0 hasta 10. En un paso posterior se ponderarán todos los criterios en una proporción tal que la suma de todos los porcentajes de todos los criterios es igual a 100%. La tubería de mayor valor, será la primera en la lista para su rehabilitación; es decir, se va a hacer una ordenación de las mismas, pero sin entrar a poner condiciones mínimas o metas en los atributos de cada criterio.

Posteriormente se plantea la aplicación de un método de optimización, para la priorización del conjunto del grupo de tuberías, sobre cinco sectores de la red de la ciudad de Celaya, Gto. México, que son objeto de renovación sobre la base de los factores de influencia seleccionados. La clasificación de los ocho criterios que, a juicio de los gestores de la red de la ciudad de Celaya, merecen ser considerados y clasificados en grupos con diferentes características, son el grupo de factores “*Básicos*”, “*Funcionales*” y “*Misceláneos*”.

En este mismo capítulo se analiza y se aplica dentro del modelo hidráulico, el método

---

de asignación de fugas dependientes de la presión, muy importante en el desarrollo de la metodología aplicada en este trabajo.

En el Capítulo 6 se estructura y conforma el modelo de Vulnerabilidad y el modelo de Eficiencia, de tal manera que se desarrolla la metodología empleada para la asignación de prioridades de renovación de tuberías, mediante el uso del sistema soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas, así como las herramientas y la información necesaria para el desarrollo de dicha metodología, detallando la matrices de ponderación de alternativas y valoración de resultados. Una vez que se aborda la metodología mencionada, se realiza la aplicación del sistema de soporte a la decisión de las sumas ponderadas, para la asignación de prioridades de renovación en ocho grupos tuberías de la red de Celaya, Gto. México, donde se tiene que hacer la agrupación de puntuaciones parciales de cada tubería, respecto a cada uno de los criterios considerados, obteniéndose como resultado la priorización del grupo de tuberías. Se realiza el análisis de sensibilidad de los resultados, ante variaciones en la consideración de los valores en los pesos de los criterios.

Seguidamente, se aplica el método para jerarquizar a cada uno de los grupos de tuberías, para cada factor de influencia considerado, aplicando Algoritmos Genéticos. Por ultimo se considera el aspecto económico, para determinar el orden de priorización, sobre la base del ahorro de energía eléctrica y el volumen recuperado del caudal fugado, al rehabilitar las tuberías. Teniendo además en cuenta otro aspecto, que es el posible ahorro que se obtendría al evitar con la rehabilitación las consecuencias de un posible fallo. Para determinar la priorización en base al aspecto económico, se utiliza nuevamente la técnicas de los Algoritmos Genéticos y en este caso, hay que resaltar que el resultado que se obtendrá es la longitud óptima de cada grupo de tuberías, con el objeto que maximice los beneficios.

En el capítulo 7 se desarrolla el Modelo de la Evaluación de las condiciones físicas de las tuberías, y en él se plantea todo lo relacionado con el análisis de supervivencia, específicamente con la aplicación de los mismos en las redes de distribución, así como los modelos de riesgo proporcionales tanto semiparamétricos (Modelos de Cox) como paramétricos (Modelos de Weibull), con el objetivo de aplicar dichos métodos en el análisis de los fallos en las redes de abastecimiento y determinar con ello, en que grado las covariables influyen en el fallo de las tuberías, todo esto con un tratamiento y procesamiento de la información para el análisis estadístico. También se lleva a cabo la evaluación de los contrastes de las hipótesis de los modelos de Cox para verificar la significación del modelo.

Por otro lado, la determinación del número de fallos futuros se realiza a través de la evaluación del modelo de Weibull, y en base al porcentaje de fallos esperados, se obtiene el orden de priorización de las tuberías analizadas. Por ultimo, utilizando la parte paramétrica del modelo de Cox, se determina el índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF) de las tuberías. Asimismo se desarrolla una aplicación del modelo integral para la toma de decisiones, en la priorización para la rehabilitación de tuberías.

Finalmente, en el capítulo 8 se exponen las conclusiones del trabajo y el planteamiento de posibles desarrollos futuros. A continuación en la figura 1.1 se muestra un diagrama esquemático de la estructura de la tesis.

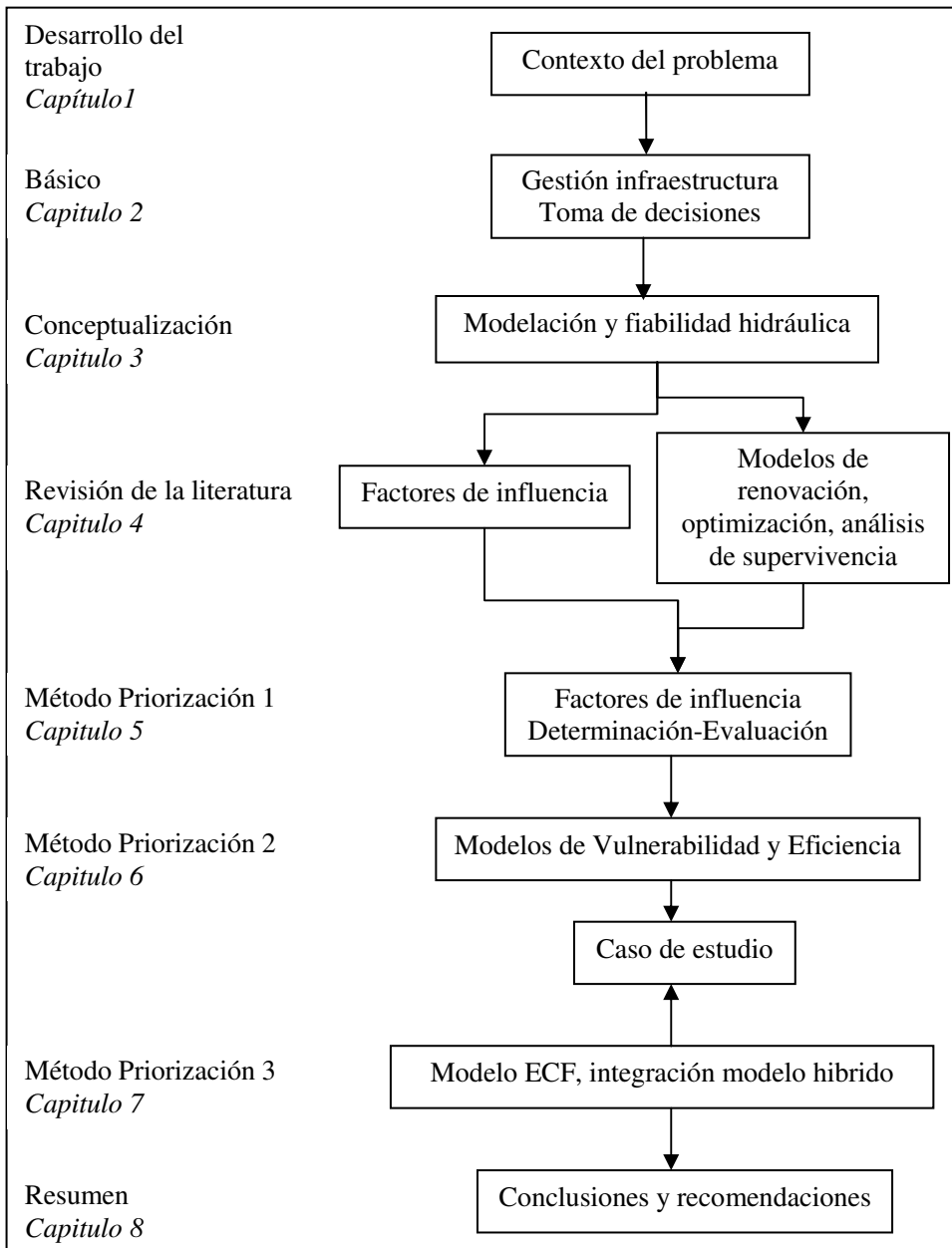


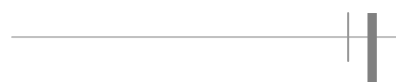
Figura 1. 1 Estructura de la tesis

# Capítulo **2**

---

## **Gestión de Infraestructura y Toma de Decisiones**







---

## 1 Infraestructuras y los sistemas de gestión de las infraestructuras

Las infraestructuras juegan un papel importante en nuestra vida diaria y los servicios que nos proporcionan están tan omnipresentes que las damos por sentado. Nadie discute el hecho de que los sistemas de infraestructura para la prestación de un servicio, son silenciosos e indispensables para todos los aspectos de nuestra economía.

También existe un consenso sobre el hecho de que esos valiosos activos físicos no han tenido un adecuado mantenimiento y que en los últimos años se han deteriorado hasta el punto de que puede suponer un riesgo de seguridad de los usuarios, modificar el nivel de confort y servicio a que los usuarios se han acostumbrado, y también revela que los recursos no son utilizados de manera que minimice los costos y maximice la vida de servicio.

Debemos de considerar que los modelos y métodos adecuados deben de auxiliar en la toma de decisiones identificando costes-beneficios de las estrategias de rehabilitación, que a su vez resulten en un nivel aceptable de servicio. En su forma más sencilla, la decisión puede basarse en una comparación de costes de alternativas en cualquier punto del tiempo.

El presente estudio pretende dotar a los administradores del servicio de agua de las herramientas que le permitan establecer el orden de prioridad en los trabajos sobre la red y estimar las dotaciones presupuestarias necesarias en el corto y medio plazo. El objetivo es la conservación y mantenimiento del servicio de la red del abastecimiento de agua potable, a través de la renovación de las tuberías, tomando en consideración un conjunto de variables y criterios en el proceso de toma de decisiones, variables que están vinculadas a la tubería, a su entorno y al propio servicio del agua.

Son diversos los factores que influyen para la priorización de las tareas de renovación de las redes, teniendo en consideración las restricciones financieras, necesarias para efectuar un conjunto de trabajos sobre la red con el fin de mejorar el funcionamiento. La estimación del presupuesto necesario requiere la identificación de las tuberías sobre las cuales es prioritario intervenir, así como la naturaleza de las intervenciones que hay que prever, teniendo en cuenta la disponibilidad de los recursos financieros del servicio de agua, representando una restricción presupuestaria que depende de los ingresos de la empresa de aguas y el origen del financiamiento (interno o externo).

Así pues, utilizaremos el plazo de renovación para describir el conjunto de intervenciones sobre las tuberías, susceptibles de mejorar el funcionamiento de la red. Sobre el conjunto de todos los dispositivos hidráulicos que constituyen la red, consideraremos exclusivamente la renovación de las tuberías del abastecimiento de agua potable. La renovación del servicio del agua puede ser inscrita en el marco de una estrategia de sostenibilidad, puesto que está planificada en el tiempo y se efectúa según una aproximación preventiva precisa. De otro modo, la renovación puede ser realizada de manera arbitraria, basándose en criterios empíricos y de manera no planificada. La renovación es ineludible, concierne a las tuberías, cuya vida útil técnica es importante, pero está limitada en el tiempo. Dicha vida útil técnica se define como el período del tiempo durante el que la tubería funcionará garantizando especificaciones precisas.

---

---

La renovación consiste en reemplazar la tubería al fin de su vida útil técnica o bien por motivo de la aplicación de criterios económicos, de obsolescencia o por actuaciones de modernización. Desde un punto de vista contable, distinguimos la vida útil contable de la vida útil técnica. La duración de vida contable corresponde al período sobre el que se practica la amortización de una tubería, estando comprendida entre 60 y 80 años aproximadamente, dependiendo del material.

Las tuberías sufren degradación a lo largo de su operación y esta degradación acelera el proceso de envejecimiento, reduciendo los índices de funcionamiento de la red y obligando a realizar trabajos sobre las tuberías. Los trabajos de mantenimiento son aquellos que, en general, incluyen el conjunto de las actividades, planificadas o no, con el fin de preservar la tubería en su estado original. El mantenimiento comienza con la inspección periódica de la red, con el fin de controlar su estado y su nivel de funcionamiento. El mantenimiento de la red puede ser preventivo, a fin de asegurar un buen funcionamiento y de alcanzar una vida técnica útil previamente establecida, ó correctivo, concretándose en reparaciones motivadas por averías y otros acontecimientos imprevistos. Los costes que generan los trabajos de mantenimiento son registrados como costes de operación y mantenimiento, imputados a la sección explotación del presupuesto de los servicios de agua. Los trabajos de renovación representan una gran inversión para los servicios del agua, siendo necesario programarlos en el tiempo y disponer los montos presupuestarios necesarios para su realización. Los costes generados por estos trabajos de renovación se inscriben en la sección de inversiones del presupuesto del servicio del agua.

Aunque los trabajos de renovación son objeto de una programación en el tiempo, a menudo los criterios tomados en consideración no tienen en cuenta el funcionamiento de la red y del estado de deterioro de las tuberías. Con el fin de obtener economías de escala y evitar la intervención de apertura de zanja en respuesta al mantenimiento de calzada, que es aproximadamente de unos 5 años, los servicios de agua prefieren, en general, adaptarse para compatibilizar con el resto de trabajos de servicio de vías públicas. Los trabajos de renovación se concentran exclusivamente sobre las tuberías que se encuentran en las calles que figuran en el programa de mantenimiento de servicio de vías públicas. Esta solución puede ser viable de un punto de vista económico pero no lo es forzosamente desde un punto de vista técnico. El óptimo económico no consiste en el forzamiento desde el punto de vista técnico. Esta práctica de la renovación no permite paliar las deficiencias vinculadas al deterioro de la red.

Para Rajani y Kleiner (2001), el deterioro de la red se manifiesta en los casos de fallo que hacen que la red sea incapaz de alcanzar la función asignada. Los autores identifican los siguientes tipos de deterioro:

- ⇒ Deterioro estructural: rotura física de las tuberías, esto es, casos que necesitan reparación.
- ⇒ Deterioro hidráulico o funcional: disminución de la capacidad hidráulica, que se traduce en caídas de presión y caudal en la red.
- ⇒ Deterioro de la calidad del agua: degradación de la calidad del agua, presencia de coloración, o presencia de olor.

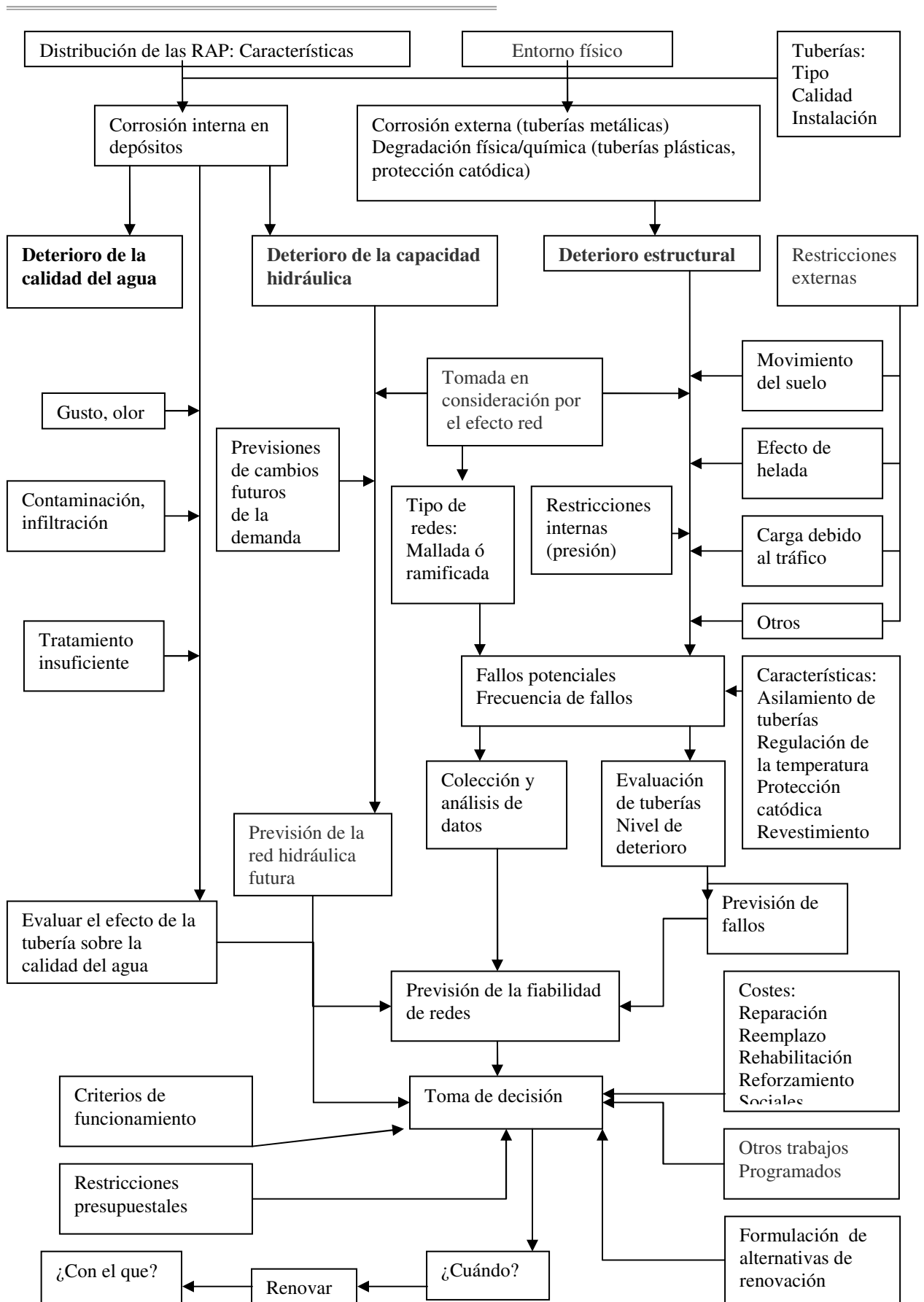


Figura 2. 1.- Descripción del proceso de deterioro de las tuberías de agua potable (adaptado de Rajani y Kleiner, 2001)

---

---

En lo que nos concierne, tomamos en consideración los primeros aspectos apuntados en la descripción del estado del deterioro de la red. La fiabilidad de una tubería será traducida por su grado de deterioro estructural y de deterioro hidráulico. La figura 2.1 describe las relaciones entre el deterioro estructural y funcional de la red, identificando las variables y los parámetros que hay que considerar en la toma de decisiones, en materia de renovación.

Estas variables están vinculadas a la tubería y a su entorno, y permiten evaluar el estado de las tuberías y a medir la fiabilidad de la red. La disposición de las tuberías en la red debe ser tomada en consideración, de modo que el impacto de la renovación de una tubería depende de su localización, de sus dimensiones y de su papel en el suministro de los abonados. La toma de decisiones se relaciona con criterios vinculados a:

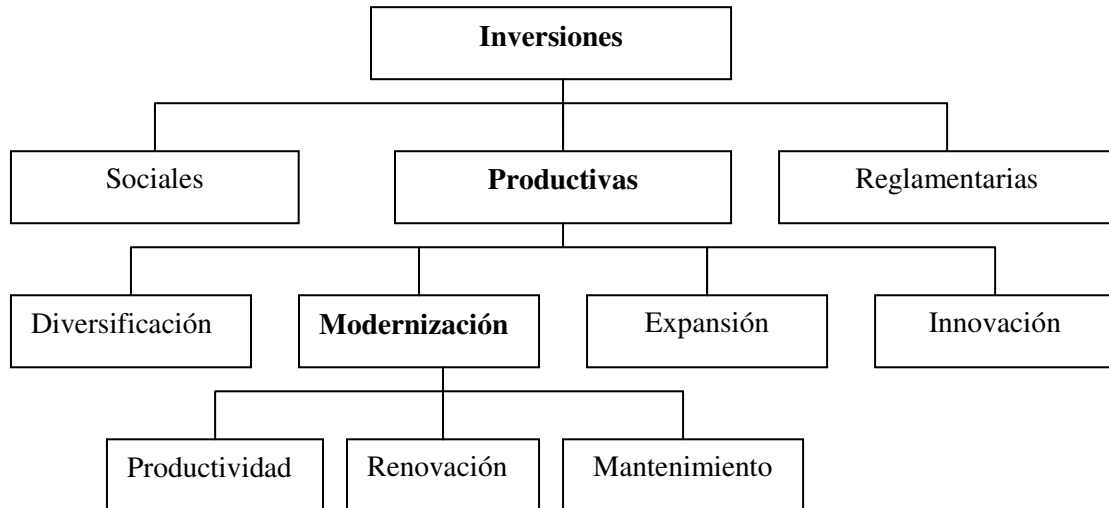
- ⇒ El funcionamiento y la fiabilidad de la red
- ⇒ La topología de la red
- ⇒ La estimación de los costes de reparación, sustitución, fortalecimiento, rehabilitación, sociales, etc.
- ⇒ La programación de otros trabajos y coordinación con los servicios de: Servicio de vías públicas, Gas, Cable, Electricidad, etc.
- ⇒ La disponibilidad de los recursos financieros

## **2 La renovación y las elecciones de inversión**

Bancel y Richard (1995) consideran que el concepto de inversión difiere con arreglo a la actividad del sector. Para los economistas, esencialmente, se trata de un flujo de capital que permite modificar los stocks existentes, que constituyen junto con el factor del trabajo uno de los principales factores de la función de producción.

Para los gerentes, la inversión representa un coste para la empresa, que genera nuevos cash-flows (ventajas). La necesidad de jerarquizar los diversos proyectos contribuye a la realización de balances globales (costes - beneficios), que miden la rentabilidad de cada proyecto.

Dafflon (1998) define la inversión como un coste que aumenta el valor del patrimonio y cuya utilidad se extiende varios años. Esta inversión conserva o mejora el uso del patrimonio, durante varios años desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo. Por analogía, la renovación de las redes de agua potable (inversión), tendrá por incidencia el aumento de la vida útil de las tuberías, la reducción de los fallos, el mejoramiento del suministro de agua a los usuarios, la mejora del funcionamiento de la red de manera general, la reducción de costes operacionales y de mantenimiento. Distinguimos las inversiones de renovación, otros tipos de inversión y establecemos un vínculo con las inversiones de modernización. Para Koehl (2003), las inversiones de renovación permiten una renovación de los equipos, pero no necesariamente al estado idéntico en el inicio de su vida útil, sino que su vocación es compensar la depreciación de los equipos instalados. En la figura 2.2 se muestran los diferentes tipos de inversiones.



*Figura 2. 2 Tipos de inversiones*

En un futuro cierto, la decisión de inversión se apoya sobre la comparación de los flujos financieros, desempeñados por la inversión sobre una vida útil dada, con el importe de la inversión, o por la evaluación de la vida útil que permite recuperar el capital invertido.

El índice medio de rentabilidad, permite comparar los flujos medios obtenidos por la inversión con importe medio de la inversión.

El plazo de recuperación permite evaluar la duración sobre el que se recuperará el importe de la inversión. El valor actual neto (VAN) traduce la diferencia entre el valor actual de los flujos generados por la inversión y los gastos de inversión. La inversión será rentable para  $VAN > 0$ . La Tasa Interna de Rendimiento (TIR) corresponde a la tasa de actualización que rinde un VAN nulo.

Estas aproximaciones suponen el conocimiento exacto del importe del Cash-Flow libre y del índice de actualización. No tienen en cuenta la incertidumbre vinculada a la evolución del entorno económico. En este sentido, citamos los trabajos de Arrow y Fischer (1974) y los de Herz (1996), que introducen modelos de decisión con información creciente. En estos trabajos se definen valores de opción para la toma de decisiones con arreglo a tres condiciones conjuntas, a saber: un conjunto de decisiones, una incertidumbre en la obtención de los estados en el futuro y una información creciente en la alcance de estos estados. La toma de decisiones en materia de inversión se apoya en la noción de valor de opción, que permite diferir la inversión hasta que resulten disponibles informaciones más fiables, permitiendo la reducción de la incertidumbre.

La definición dada por Bancel y Richard (1995) nos parece interesante, puesto que la noción de ventajas resultantes de la decisión de invertir, va más allá de la creación de flujos financieros. Puesto que la renovación es una inversión en modernización, tiende a reducir los costes de mantenimiento de una infraestructura y mejorar su funcionamiento. Consideramos la renovación de las redes RAP como una inversión de modernización que requiere gastos importantes, pero no provoca nuevos flujos financieros en el

---

momento de la operación de la red. Las tuberías de agua potable no constituyen un equipo de producción al mismo nivel que un equipo industrial, para el que puede ser estimado un valor de Cash-Flow.

### **3 La gestión de la infraestructura en las redes de agua potable**

La gestión de la infraestructura, o de activos, o de recursos o "*Asset Management*", se interesa por la gestión de los elementos y sistemas en general de las empresas de abastecimiento de agua: activos, infraestructuras, instalaciones, cuya vida útil es importante. Esto concierne de manera general a las municipalidades, servicios públicos, empresas públicas o privadas. Puede presentarse en forma de:

- ⇒ Redes enterradas: Red RAP, Red de saneamiento, Red de gas, etcétera.
- ⇒ Infraestructuras viales: caminos, autopistas, etcétera.
- ⇒ Equipos e instalaciones industriales.

Estas infraestructuras necesitan una inversión inicial considerable y un control a lo largo de su vida útil. La gestión de la infraestructura, procura minimizar los costes de operación, de mantenimiento y de renovación de una infraestructura dada, a lo largo de su vida útil.

Las redes de alimentación y las instalaciones que permiten el suministro de agua a los abonados, son considerados como un patrimonio del servicio del agua, para el que se requiere una buena gestión, que asegure la supervivencia y el buen funcionamiento. Podemos decir que la problemática de renovación se integra en un proceso más global que es el de la gestión de la infraestructura.

#### **3.1 La gestión de la infraestructura (activos) "*Asset Management*": definición**

La gestión de la infraestructura o "*Asset Management*" procura seguir de manera continua el estado de una infraestructura, constituida por sistemas o un conjunto de dispositivos. Según Hoskins *et al.* (1998), la gestión de la infraestructura pretende asegurar el buen funcionamiento de estos dispositivos, para la planificación de acciones diversas de mantenimiento, reparación y rehabilitación. Según FHWA (1999) la gestión de la infraestructura es un proceso continuo, iterativo, adaptativo y flexible a los cambios, las evoluciones y orientaciones que pueden ser productivos. Para la EPA (2003), la gestión de la infraestructura es un proceso de planificación que permite mantener el valor de una infraestructura a su nivel más alto y de poner a disposición los recursos financieros necesarios para la rehabilitación, o la renovación de la infraestructura cuando sea necesario. La gestión de la infraestructura integra también acciones que permitan reducir los costes de funcionamiento y mejorar la fiabilidad de la infraestructura considerada. El proceso de gestión de la infraestructura, utiliza un conjunto de instrumentos de análisis y de ingeniería financiera, que comprende el análisis de costes/beneficios, análisis del coste sobre la duración de vida del sistema, el análisis de riesgos de orden diverso: financiero, operacional y natural.

---

La gestión de la infraestructura se sitúa en un nivel estratégico de decisión y necesita:

- ⇒ El establecimiento de objetivos de funcionamiento.
- ⇒ Un inventario de la infraestructura que hay que administrar.
- ⇒ La identificación de los recursos disponibles: financieros y otros.
- ⇒ El establecimiento de una política organizacional para el control del proceso de gestión de la infraestructura.
- ⇒ El inventario de las informaciones y los datos relativos al funcionamiento del sistema, el análisis con el fin de identificar las necesidades futuras y las disfunciones.
- ⇒ La utilización de instrumentos, procedimientos de estimación de los costes con arreglo a las estrategias seleccionadas, la asignación del presupuesto con el fin de satisfacer las expectativas de los usuarios.

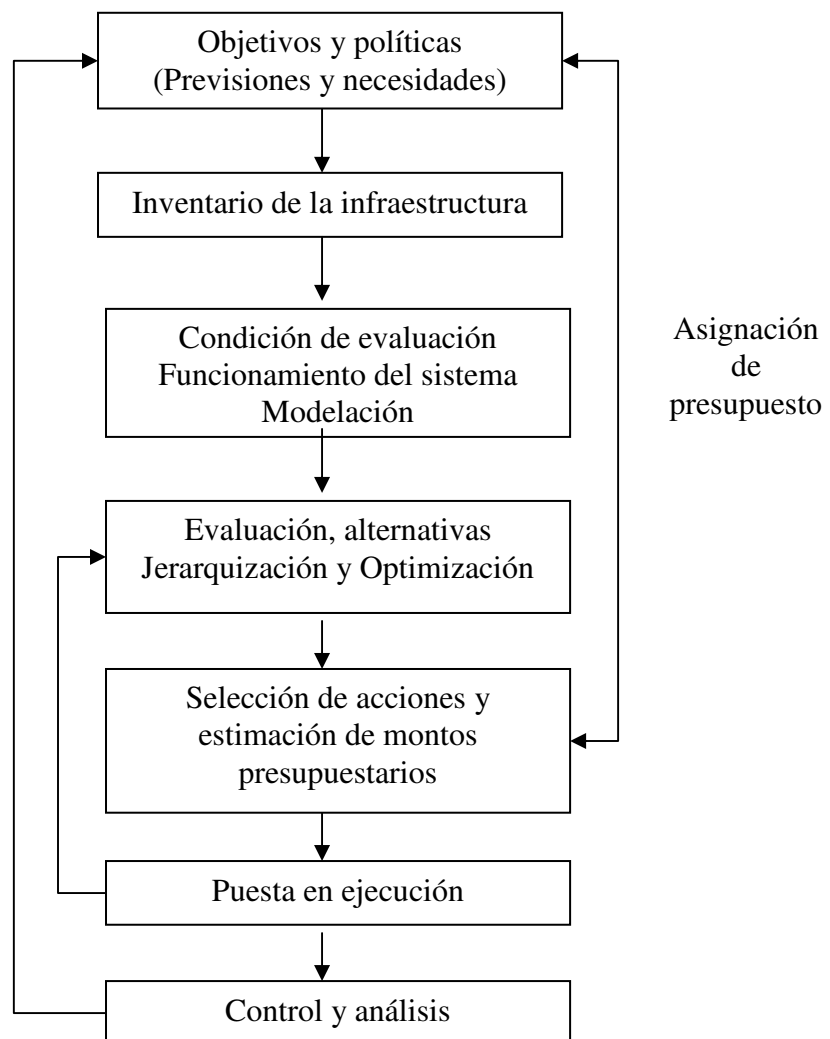


Figura 2. 3 El proceso del Asset Management (Adaptada de FHWA,1999 y EPA, 2003)

---

Esta aproximación debe ser adaptada a cada organización, permitiendo definir un conjunto de indicadores de funcionamiento y de las variables de decisión, que traducen la política de la organización y sus objetivos. Se traduce por objetivos fijados, el tipo de infraestructura que hay que considerar, el presupuesto concedido, los procedimientos operacionales, la estructura organizacional y las prácticas financieras. El proceso descrito por la Figura 2.3 reagrupa las etapas principales que integran en la gestión de la infraestructura. A través de la infraestructura, la organización procura responder a necesidades, mediante el abastecimiento de un servicio o un producto. La etapa previa consiste en definir los objetivos y el nivel de funcionamiento que hay que alcanzar. El inventario de la infraestructura identifica el conjunto de los medios del que dispone la organización para asegurar su misión.

Seguidamente viene la etapa de evaluación de la condición y del estado de la infraestructura. Esta etapa permite identificar las deficiencias de la infraestructura, las variables y los parámetros vinculados a su funcionamiento. La etapa de modelación procura comprender el funcionamiento de la infraestructura, simulando el funcionamiento con la ayuda de modelos. La comprensión del funcionamiento del sistema permite identificar las insuficiencias con el fin de jerarquizar la infraestructura considerada, para establecer prioridades e identificar las acciones correctivas que hay que aportar. Estas acciones se manifiestan por unas decisiones a corto, medio y largo plazo. La puesta en ejecución, pretende someter a un test las decisiones tomadas y a medir su impacto sobre el funcionamiento del sistema. La medida de funcionamiento del sistema se hace sobre criterios vinculados a:

- ⇒ La vida útil técnica y/o contable del patrimonio
- ⇒ La disponibilidad de recursos financieros suficientes
- ⇒ El nivel de desempeño que debe alcanzar la infraestructura
- ⇒ Los costes de operación y de mantenimiento.
- ⇒ La gestión de la infraestructura, toma en consideración el conjunto de estos criterios a lo largo de la duración de vida de la infraestructura

### **3.2 La gestión de la infraestructura aplicada a las RAP**

La renovación de las redes de agua potable (RAP) comprende toda la infraestructura constituida por las tuberías de agua potable, los accesorios hidráulicos, las instalaciones de aspiraciones con la bomba, de tratamiento y de almacenamiento del agua. Se inscribe como un paso de gestión de la infraestructura. Consideramos solamente las tuberías del abastecimiento de agua potable, que constituyen para ciertos servicios, la parte más importante del valor de los activos o recursos. Desde un punto de vista de la toma de decisión, la problemática de la renovación de las redes de agua potable, implica decisiones a corto y medio plazo, que dependen de una aproximación estratégica a largo plazo (ver figura 2.4).



<b>Corto Plazo</b> Meses a un año	<b>Medio Plazo</b> 5 años	<b>Largo Plazo</b> Mas de 5 años
<b>Gestión periódica de la red:</b>	<b>Programación Plurianual:</b>	<b>Planificación estratégica:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intervenciones sobre las tuberías y conservación del servicio de la red: reparación, limpieza, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Previsiones de fallos y trabajos sobre la red</li> <li>• Montos presupuestarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar la fiabilidad de red y la calidad de servicio devuelto a los usuarios</li> <li>• Evolución de la demanda y extensión de la red.</li> </ul>

*Figura 2. 4 La gestión de las redes de agua potable*

El servicio de agua, busca a través de la red de agua potable satisfacer las necesidades y las demandas de los abonados, asegurando la continuidad del servicio y la satisfacción de los abonados en cantidad y calidad, por el aumento de la fiabilidad de la red a un coste mínimo. La renovación de las redes de agua, responde a estas previsiones a través de una política, que se inscribe en el marco de una gestión de patrimonio a corto, medio y largo plazo.

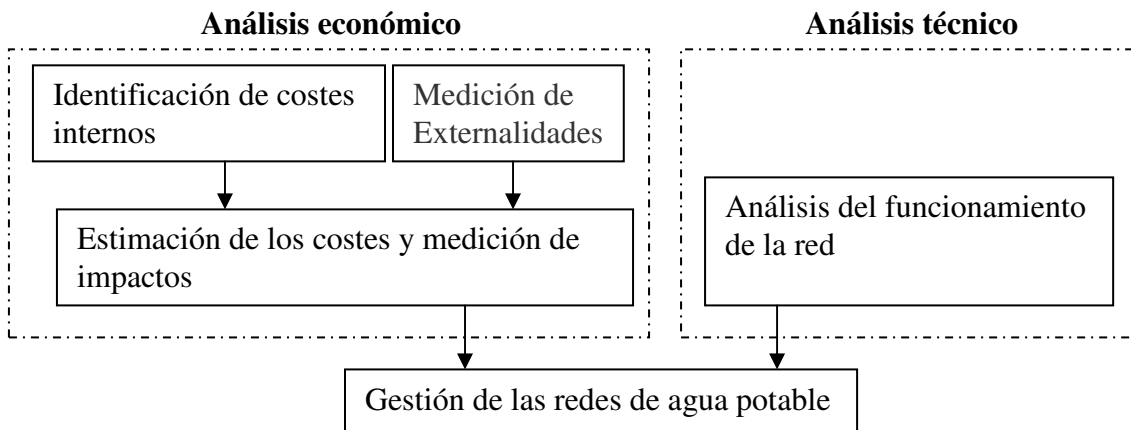
#### **Proceso de gestión de la infraestructura**

Objetivos y políticas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alimentación en las redes en cantidad y calidad suficientes.</li> <li>○ Aumentar la fiabilidad de las redes y reducir la molestias en caso de fallo.</li> <li>○ Reducir los costes de mantenimiento y de reemplazo.</li> <li>○ Nivel de servicio satisfactorio: presión en los nudos de consumo.</li> </ul>
Inventario de la infraestructura y colección de datos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Inventario de la redes: identificación de las tuberías.</li> <li>○ Colección de datos y de información concerniente a la naturaleza de las tuberías, la fecha de colocación, longitud, diámetro, etcétera.</li> <li>○ Identificación de las fuentes de almacenamiento, depósitos, etcétera.</li> <li>○ Medición de la demanda y los niveles de presión.</li> </ul>
Evaluación de las condiciones del estado de la infraestructura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fallos anteriores, fugas.</li> <li>○ Quejas de los abonados.</li> <li>○ Deficiencia en caudal y presión.</li> </ul>
Funcionamiento del sistema y modelación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudio del fenómeno de envejecimiento.</li> <li>○ Modelación hidráulica y funcionamiento de la red.</li> </ul>
Evaluación de las alternativas de optimización.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identificación de las tuberías vulnerables.</li> <li>○ Jerarquización de las tuberías y prioridades.</li> <li>○ propuestas de políticas de renovación.</li> </ul>
Puesta en ejecución.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Implementación políticas y medida del impacto en término (plazo) de mejoramiento de la red.</li> </ul>
Control y Análisis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Control del implementación de las políticas.</li> <li>○ Acciones correctivas que siguen la evolución del estado de la red y de la calidad del servicio.</li> </ul>

*Tabla 2. 1 La gestión de la infraestructura adaptada a la renovación de las redes de agua potable (Alonso et al. 2007)*

Proponemos en la tabla 2.1 una adaptación del proceso de gestión de la red de agua potable. Observamos que el esquema descrito se apoya en un análisis del inventario de la red y de su funcionamiento, así como un análisis económico ligado a la deficiencia de la red, la ejecución de trabajos de mantenimiento y de renovación (Alonso *et al.* 2007).

En este sentido, Skipworth *et al.* (2002) preconizan la integración de un análisis puramente económico, con una aproximación de análisis de realización de la red RAP en la toma de decisiones (Ver Figura 2.5).



*Figura 2. 5 Instrumento de ayuda a la decisión para la gestión de la red RAP (Adaptado por Skipworth et al., 2002)*

La renovación de las redes RAP forma parte de un proceso más global que es la gestión de la red RAP en conjunto. Proponemos adaptar la aproximación propuesta por Skipworth *et al.* (2002), identificando los datos que deben ser considerados en el curso de nuestro análisis y las evaluaciones que permiten medir el desempeño de la red RAP. La recolección, puesta al día y el procesado de los datos son procesos gestionados en el marco del sistema de información de la empresa de agua. Para gestionar la información, se identifica la necesidad de Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD) y un Sistema de Información Geográfica (SIG), que contiene datos gráficos y georeferenciados de la red. Estos datos describen la topología de la red, la localización de las tuberías y los dispositivos hidráulicos que constituyen la red, con la ayuda de mapas y planos, así como la naturaleza de los abonados comunicados. Ambos dispositivos se comunican, con el fin de tener una información completa sobre la red RAP.

Cada vez más servicios de agua están adoptando sistemas de información, que permiten una mejor selección en la consideración de los datos, para alimentar el proceso de toma de decisiones. El análisis de datos abarca diversas áreas que revisaremos a continuación.

### 3.2.1 Análisis económico

El análisis económico se refiere al conjunto de los costes vinculados a las redes de RAP y a las tuberías, considerando los costes directos: de instalación de las tuberías, de la inspección, de la reparación, del mantenimiento y de sustitución. Los costes indirectos

---

son más difíciles de medir desde un punto de vista económico, porque vienen inducidos por acontecimientos imprevisibles y vinculados a las externalidades, que traducen el impacto sobre el medio ambiente de la red, en caso de fallos o trabajos de renovación.

Las consecuencias de los fallos son diversas: daños, inundaciones, interrupción del servicio, pérdida de ingresos, molestias para la tráfico rodado, etcétera (ver Care-W, 2003). La renovación es tributaria de los recursos financieros disponibles. El análisis se refiere al conjunto de la vida útil técnica de la tubería. A lo largo de esta vida útil, es necesario de identificar los costes directos:

- ⇒ De adquisición y de instalación de la tubería.
- ⇒ De reparación y mantenimiento.
- ⇒ De desmontaje y renovación.

y también la identificación de costes indirectos ligados:

- ⇒ A la molestia ocasionada en el momento de trabajos sobre la red.
- ⇒ A la falta de ganancias debido a la bajada de actividad en el momento de trabajos.
- ⇒ A la degradación de bienes en caso de daño con roturas o fugas: inundaciones, hundimiento de la calzada, etcétera.
- ⇒ A las quejas de usuarios en caso de deficiencia de presión o interrupción del servicio.

En este ultimo punto, en México se esta trabajando arduamente en mejorar la atención al usuario en cuanto a la información, pues, dado que el coste del agua va aproximándose a su precio real, la sociedad también exige cada vez más un mejor servicio y las quejas son mas enérgicas, por tal motivo las empresas de agua tienen en consideración este punto.

### **3.2.2 Análisis técnico**

Este análisis trata de la evolución del estado de la red (de las tuberías) a lo largo de su vida útil. Se trata de aportar una descripción y una medida de los fenómenos de deterioro estructural (físico), de las conducciones que acompaña el envejecimiento de las tuberías, el deterioro hidráulico que afecta al funcionamiento de la red y que se manifiesta por una deficiencia del suministro de agua, así como el deterioro en la calidad. La renovación de la red de agua potable necesita de una descripción del mecanismo de deterioro de las tuberías, identificando los factores que conducen a una degradación de la red y subrayando aquellos que pueden dar lugar a una renovación. Por tal motivo, es indispensable un conocimiento profundo de la red, lo que implica conocer la localización del sistema de las tuberías, los materiales de fabricación, diámetro, edad, localización y tipo de otros elementos de la red (bombas, accesorios, etcétera)

Esta información alimenta las bases de datos del servicio de agua y su sistema de información (SIG, programas de gestión). Una vez que se han identificado los elementos de la red, debemos describir su funcionamiento, efectuando medidas diversas. Para cada partida que constituye la red, es importante conocer:

- 
- 
- ⇒ El volumen distribuido anualmente: el contabilizado y no contabilizado.
  - ⇒ Las presiones y los gastos al nivel de las tuberías y los nudos de consumo.
  - ⇒ Los coeficientes de rugosidad.

El interés reside en poder definir indicadores de funcionamiento de la red a través de las características vinculadas a la distribución, a las conducciones y a la calidad del agua distribuida. Hay que realizar un inventario de las intervenciones y los trabajos sobre la red y esto pasa por la recolección de los datos sobre el terreno, de informaciones en materia de intervenciones y reparaciones, con el fin de alimentar las bases de datos que se catalogan:

- ⇒ La fecha de ocurrencia de los fallos.
- ⇒ Las características de la tubería, la naturaleza del material, la longitud, el diámetro, año de instalación.
- ⇒ Los tipos de fallos observados.
- ⇒ El tipo de terraplenado y el entorno de la tubería.
- ⇒ Los elementos vinculados a las intervenciones (duración, piezas, costes).

Estos datos permiten también actualizar la información sobre los planos de la red y determinar los sectores con elevada frecuencia de fallos. En nuestro caso se cuenta con un concentrado del reporte de fallos, generado por el sistema de información geográfico de la JUMAPA y un reporte de fugas, que se genera por el personal que acude a reparar dicha fuga.

#### **4 Mantenimiento integral de tuberías de agua**

La gestión y el manejo de las redes de abastecimiento es un proceso complejo que requiere el conocimiento de los procesos físicos, económicos y sociales. En el pasado la mejor herramienta para el manejo y prevención de roturas en tuberías, ha consistido en simples aproximaciones estadísticas, basadas en el número de roturas en tuberías por kilómetro y técnicas reactivas de inspección, tales como la detección de fugas. Estas aproximaciones han sido útiles para el manejo de los fallos en las tuberías, si bien, las nuevas tecnologías y los conocimientos acerca de los sistemas de abastecimiento, hacen posible el desarrollo más eficiente y aproximaciones mas precisas en el mantenimiento integral de las redes de abastecimiento (ver figura 2.6).

Un elemento crucial del sistema para la gestión de las tuberías es el uso de técnicas de evaluación no destructivas, que proveen información acerca de la condición de las tuberías. Todas las tuberías pueden llegar a tener fallos eventualmente, pero el índice de fallo dependerá de las condiciones del material, de las tuberías y de la exposición de las mismas a condiciones ambientales y operacionales.

La mas importante característica del ciclo de la gestión de las tuberías (ver figura 2.6), es evitar el ciclo natural de la no gestión de las tuberías, puesto que las tuberías, una vez enterradas, no deberían quedar en el olvido. Cada tubería dentro del sistema debe ser examinada periódicamente, siendo necesario establecer la valoración de su condición y determinar que acción debemos de tomar para el mantenimiento, rehabilitación o sustitución en condiciones determinadas. Si la acción que requiere es simplemente reparar la rotura, esta decisión estará basada conscientemente en la mejor información disponible en las empresas de agua. Todos los materiales de las tuberías se deterioran eventualmente y antes de seleccionar una tubería, se debe analizar los trabajos adicionales que requiere. Un segundo punto importante es la diferenciación entre las tuberías de conducción y tuberías de distribución, y ello es debido en gran parte a las graves consecuencias de los fallos que están asociados con las líneas de conducción, en comparación con un típico fallo de distribución. El enfoque, que puede no ser económicamente viable para un sistema de distribución, podría serlo para el sistema de conducción (transporte).

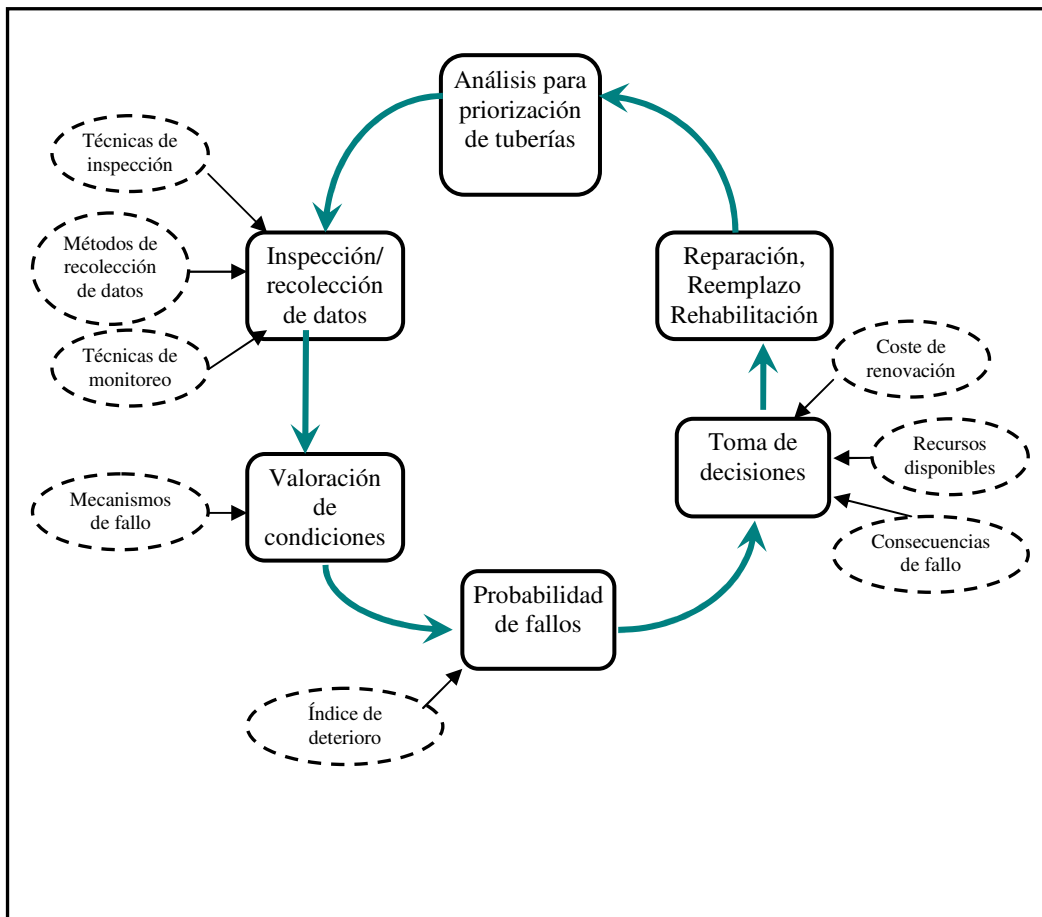


Figura 2. 6 El ciclo de la gestión de tuberías (adaptado de Makar y Kleiner, 2000)

#### 4.1 Inspección y recolección de datos

Esencialmente, existen dos maneras de recabar información sobre los daños en las tuberías. La primera es a través de las técnicas de inspección directa y monitorización (evaluación no destructiva). La segunda es a través de la colección de datos, que pueden ser utilizados como indicadores directos de posibles problemas en las tuberías, tales

---

---

como las auditorias de agua, medición de corrosividad del suelo, número de daños en tuberías y otros. El número de fallos es uno de los indicadores más comúnmente utilizados y en el pasado ha sido un parámetro fundamental para decidir el reemplazo de las tuberías. La evaluación no destructiva (NDE, por sus siglas en inglés) presenta ciertas ventajas en la detección de problemas en tuberías, sobre las técnicas estadísticas, en el sentido de que estas últimas asumen que las tuberías parten de una condición (estado) similar. Los NDE pueden detectar problemas en tuberías individuales o en un punto particular, a lo largo de la tubería individual, aportando una mejor información acerca de la condición de la tubería.

#### **4.2 Técnicas no destructivas de inspección y monitorización**

La última década ha sido testigo del desarrollo de un número de nuevas técnicas, para la inspección y evaluación de los sistemas de distribución y conducción de abastecimiento de agua. Estas técnicas proveen una información muy variada acerca de la condición de la tubería, que va desde la posibilidad de conocer el número de varillas rotas en una sección de una tubería de hormigón pretensado, hasta la profundidad de los huecos de corrosión en la tubería de fundición dúctil, pasando por la identificación de la presencia de fugas de agua. Si bien estas técnicas ya vienen siendo utilizadas habitualmente en la detección de fugas, no ocurre lo mismo en el terreno de la caracterización de la condición de las conducciones, terreno en el que comienzan hoy a ser utilizadas de manera incipiente.

#### **4.3 Priorización de tuberías para análisis y selección de técnicas apropiadas**

Existe una variedad de métodos disponibles para analizar la condición de los sistemas de conducción y distribución de agua, incluyendo técnicas no destructivas de monitorización y evaluación, métodos indirectos basados en los datos tales como el análisis estadístico de roturas en sistemas de distribución. La selección de la técnica apropiada para una línea de agua individual depende de cuestiones tales como las consecuencias probables de un fallo en la tubería, la meta de la inspección o análisis y la historia de fallos en el pasado. Todos estos temas y adicionalmente, el coste de la puesta en práctica de dichas técnicas, determinan cuales deben ser las tuberías seleccionadas para el análisis. En general, la técnica de inspección produce un informe más detallado sobre la tubería, aunque también será más costosa su realización, por lo que el ingeniero de la empresa de agua debe estar seguro de que las ventajas de la inspección compensen sus costes.

Cuando las consecuencias de fallo pueden ser graves, esto es, en conducciones principales de aducción y transporte, la inspección de dichas tuberías plantea pocas dudas, puesto que el coste de inspección y caracterización es bajo, en relación al riesgo de fallo en términos económicos de sus consecuencias. La política suele ser, inspeccionar o monitorizar todas las tuberías de esta categoría. Los elevados costes asociados a los fallos en estas tuberías, hacen que el enfoque estadístico sea mucho menos atractivo que otros métodos, como por ejemplo, un examen exhaustivo de todas las conducciones de cierta importancia. Ésta es la política que se adopta en la industria del petróleo y del gas, en las que la mayoría de las empresas realizan exámenes periódicos del sistema de conducción.

---

---

Los métodos estadísticos, las auditorías del agua y la detección de fugas se han aplicado habitualmente en el pasado a porciones significativas de las redes de distribución de agua. El correcto empleo de las técnicas anteriores requiere segmentar el sistema en zonas o sectores de la red, de modo que sea posible estudiar de forma detallada zonas más pequeñas en las que existe una probabilidad de aparición de problemas. La detección de fugas se ha llevado a cabo en el pasado de diversas maneras. Muchas empresas de agua realizan campañas de detección de fugas, verificando todo el sistema de tuberías en ciclos que comprenden dos o más años. Otras empresas combinan la detección de fugas con auditorías de agua, comprobando las fugas, siempre que el agua total consumida *per cápita* dentro de una zona exceda de un valor estándar.

En algunos casos, las auditorías de agua incluyen una monitorización en continuo con equipos automáticos de registro de datos, permitiendo reparaciones rápidas en tuberías con fugas. El uso correcto de las técnicas de detección de fugas es una línea de trabajo que requiere mayor esfuerzo investigador, puesto que en muchos casos, su aplicación no parece reducir significativamente la cifra de pérdidas. Una tarea que las empresas de agua deben considerar, es examinar repetidamente las áreas que han tenido un alto índice de fugas, para realizar un seguimiento más exhaustivo de su evolución y de las causas que las provocan.

En la literatura podemos encontrar un gran número de modelos para el análisis estadístico de los datos históricos de roturas en muchos sistemas de distribución de agua. Algunos modelos requieren un conjunto extenso de datos mientras que otros trabajan con pocos datos, naturalmente a expensas de la precisión. El registro ideal de datos debería incluir el material de la tubería, tamaño, edad, tipo de zanja y cama, las características propias del suelo, las presiones de funcionamiento, las características de la sobrecarga, temperaturas ambientales y del agua, la época, el lugar y el tipo de todas las roturas históricas. La experiencia demuestra, sin embargo, que la mayoría de las empresas poseen solamente series de registros parciales, tanto en variedad de datos contemplados como en cuanto a períodos temporales.

#### **4.4 Determinación de la probabilidad de fallo en sistemas principales**

La probabilidad de fallo se puede determinar mediante cualquier tipo de modelo, bien sea estadístico o físico, puesto que ambos permiten predecir el deterioro de la tubería. Las tuberías pueden también fallar debido a la degradación en la calidad del agua y capacidad hidráulica.

Los mecanismos físicos del fallo de la tubería implican tres aspectos principales: (a) propiedades estructurales de la tubería, tipo de material, interacción tubería-suelo y calidad de la instalación, (b) de las cargas internas debido a la presión operacional y de las cargas externas debido a la sobrecarga del suelo, cargas del tráfico, cargas de helada e interferencia de terceros y (c) del deterioro del material debido en gran parte a los productos químicos externos e internos, ambiente bioquímico y electro-químico. En general, el comportamiento estructural de tuberías enterradas se conoce bien y está bien caracterizado, aunque otros aspectos tales como las cargas de helada y la afección que tiene el deterioro del material en el comportamiento estructural y el funcionamiento, se siguen investigando.

---

---

Los modelos físicos existentes se pueden clasificar en determinístico y probabilístico, y no permiten tratar simultáneamente los tres factores principales enumerados arriba. Los mecanismos físicos que provocan la rotura de la tubería son frecuentemente más complejos y su comprensión no es en absoluto sencilla, además de que existe poca información que permita validar modelos sobre esta base.

Los métodos estadísticos para predecir roturas en conductos principales utilizan datos históricos disponibles sobre fallos ocurridos en el pasado y sirven para identificar patrones de roturas en tuberías. La hipótesis principal es que dichos patrones se reproducirán en el futuro, igual que lo han hecho en el pasado y se utilizan para predecir el futuro índice de roturas de las conducciones o la probabilidad de fallos de las mismas. Teniendo en cuenta el coste previsto del fallo, puede obtenerse un valor aproximado del tiempo óptimo del reemplazo/rehabilitación.

Kleiner y Rajani (1999) clasificaron los métodos estadísticos en deterministas, probabilístico multi-variable y probabilístico uni-variable. Estas categorías varían en la forma en que los modelos proyectan los índices de rotura (o probabilidades de fallo) y en el número de factores que se pueden considerar. Los modelos estadísticos se pueden aplicar con varios niveles de entrada de datos y pueden ser particularmente útiles para sistemas de distribución para las cuales hay pocos datos disponibles o para los cuales el bajo coste asociado a los fallos no justifica costosas campañas de adquisición de datos.

## **5 Toma de decisiones**

### **5.1 Consecuencia de fallos en sistemas de abastecimiento**

La consecuencia potencial de un fallo en una sección dada de la tubería, es el factor más importante en la determinación del nivel y del tipo de esfuerzo, que se debe invertir en obtener información relevante sobre las conducciones. Las consecuencias de fallos se pueden dividir en tres categorías:

#### **1. Costes directos del agua abastecida:**

- ⇒ Coste de la reparación de la fractura (afectada por el tipo de la tubería, tamaño, el tipo de rotura, la localización de la tubería, etcétera),
- ⇒ Coste de agua perdida (afectada por el tamaño de la tubería y la severidad del fallo),
- ⇒ Coste del daño directo a los bienes (e.g. inundación de sótanos, derrumbamientos de caminos, daños a la cimentación de estructuras adyacentes, etcétera),
- ⇒ Responsabilidades (e.g. muerte o lesión resultado de un accidente de tráfico causado por inundación, descarga eléctrica, etcétera).

#### **2. Costes indirectos:**

- ⇒ Pérdida de la producción o negocio en una planta, un taller o propiedad comercial debido a la interrupción del agua.
- ⇒ Deterioro acelerado de las fosas, caminos, alcantarillas, cables subterráneos, etcétera.



---

---

⇒ Pérdida debido al fuego que no podría ser extinguido con eficacia, debido a la interrupción del suministro de agua (en la vecindad inmediata), o a la capacidad hidráulica disminuida (en otra parte en el sistema).

### **3. Costes sociales:**

⇒ Efectos nocivos del fallo de la tubería en la calidad del agua, debido a la intrusión de contaminantes en la tubería que fue despresurizada para la reparación:

- Intrusión de contaminantes desde el suelo circundante (e.g., alcantarillas agujereadas, depósitos de residuos, etcétera) a través de los agujeros provocados por la corrosión y de las juntas con rotura en el segmento despresurizado del sistema.
- Intrusión de escombros a través del tubo roto. Las consecuencias aquí pueden ser malestar, enfermedad o aún la pérdida de vida (e.g., Chicago, 1939, episodio en el que 1409 personas contrajeron disentería amébrica y 98 fallecieron -Anderson, 1981-),

⇒ Costes debido a la interrupción del servicio (calidad de vida, confianza pública), costes debido a la interrupción del tráfico y negocio (afectados por la localización del fallo de la tubería),

⇒ Costes debido a la interrupción del servicio a las instalaciones especiales (e.g., hospitales, escuelas, etcétera).

Mientras que los costes directos son actualmente relativamente fáciles de cuantificar en términos monetarios, las consecuencias indirectas pueden requerir mucho más esfuerzo y las consecuencias sociales son a menudo las más difíciles de valorar. Se requiere un mayor esfuerzo investigador para alcanzar una mejor comprensión de la verdadera magnitud de las consecuencias indirectas y sociales de los fallos en sistemas de abastecimiento. Puede también ser necesario incorporar medidas como objetivos o restricciones dentro de los diferentes modelos, para considerar los costes sociales, que no se pueden expresar fácilmente en términos monetarios, tales como pérdida de vida o pérdida de confianza pública y que pueden llegar a ser tan importantes o más como los monetarios.

## **5.2 Toma de decisiones basadas en principios económicos**

Los procesos económicos de decisión para la renovación de la tubería buscan reducir al mínimo los costes totales asociados a la tubería, mientras que verifica una serie de requisitos operacionales. La figura 2.7 ilustra los costes de reparación y de reemplazo/rehabilitación de tuberías, como una función del tiempo de reemplazo de la tubería. La declinación de la curva del coste representa el hecho de que el valor presente del coste de reemplazo o de rehabilitación de la tubería, disminuye con el tiempo. Inversamente, la frecuencia de fallo (o probabilidad de fallo) aumenta si se retrasa la rehabilitación o el reemplazo, debido al envejecimiento y al deterioro de la tubería. El coste total previsto de fallo, es calculado multiplicando el coste tiempo-descontado de un solo fallo, incluyendo costes directos, indirectos y sociales, por la frecuencia (o

probabilidad) de fallo. Esta frecuencia (o probabilidad) de fallo se predice a través de los modelos de deterioro, que utilizan datos de fallo históricos o inspecciones repetidas mediante NDE. El coste previsto total es la suma de las dos curvas. La forma es típicamente una curva convexa, en la que el punto mínimo representa el tiempo óptimo de rehabilitación/reemplazo ( $t^*$ ).

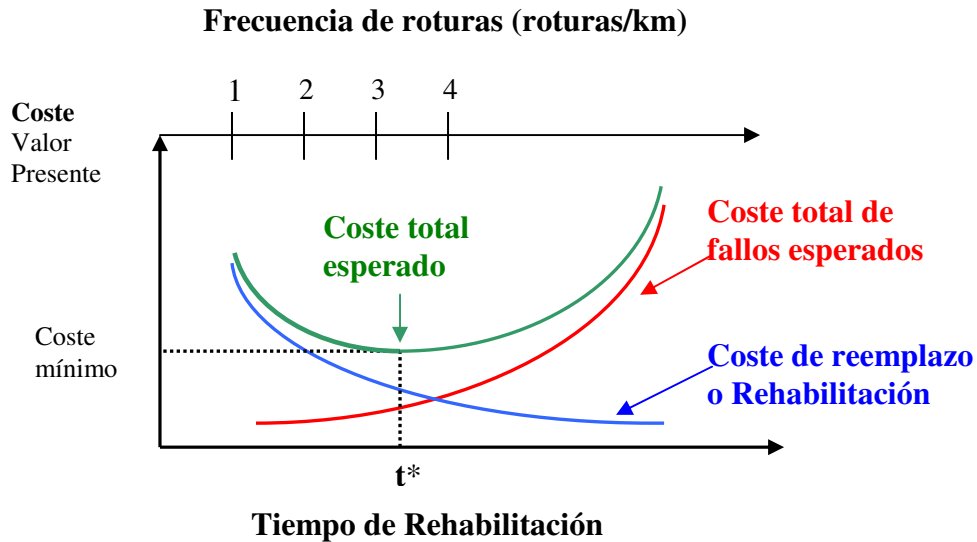


Figura 2. 7 Decisión para renovar un sistema según el coste de fallo.

En redes de abastecimiento, el coste de fallo es relativamente pequeño en relación al coste de la renovación de la tubería. Por lo tanto, el tiempo óptimo de reemplazo  $t^*$  representaría típicamente un punto en la etapa del deterioro de la tubería, donde sea tolerable una frecuencia dada de roturas, e.g., tres roturas por kilómetro como en la figura 2.8. En este caso es mejor utilizar el mantenimiento correctivo. En tuberías grandes de conducción, el reemplazo completo de la tubería es una práctica nada habitual que se toma solamente en casos extremos, debido a los elevados costes implicados. La meta de la gestión de la tubería es por lo tanto la prevención de fallos, más que la gestión de fallos. La intervención típica consistirá en una reparación localizada. El coste de fallo es habitualmente mucho más grande en lo referente al coste de intervención, dando como resultado las curvas de coste representadas en la figura 2.8. Aquí, el tiempo óptimo de intervención en la figura representa una frecuencia de roturas menor de una, lo que significa que para esta tubería en particular debe ser evitada la rotura.

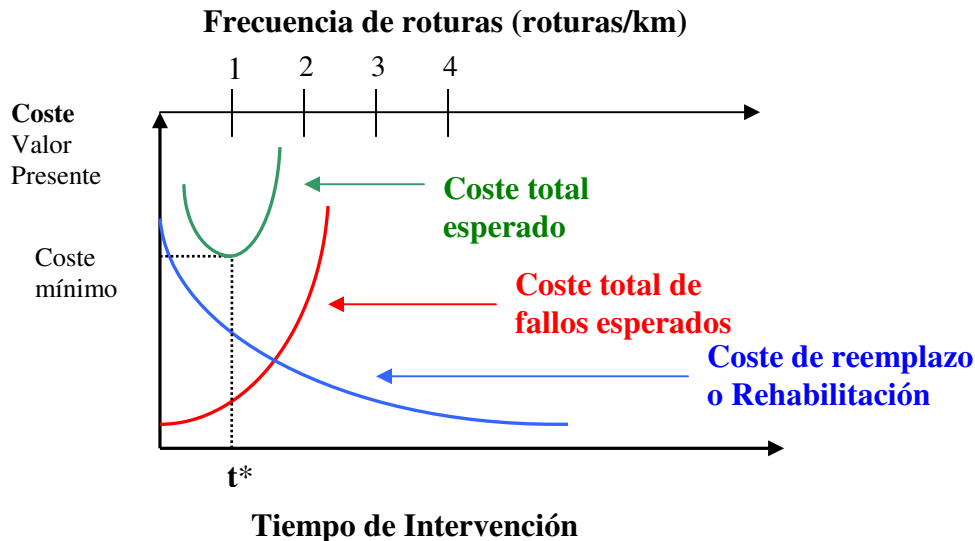


Figura 2. 8 Decisión para renovar un sistema principal con alto coste de fallo

Cuando el coste asociado al fallo es relativamente bajo y puede ser tolerada cierta frecuencia de roturas, es a menudo (no siempre) suficiente confiar en el índice histórico de roturas, para derivar un modelo de deterioro de la tubería y predecir los índices de roturas futuras. Sin embargo, cuando el coste de fallo es alto es necesario adoptar un enfoque proactivo en la anticipación del fallo y su prevención. En estos casos, las técnicas NDE se deben utilizar para determinar la condición de la tubería en dos niveles: primero, como una instantánea de su condición en un punto dado del tiempo; para determinar si se requiere la intervención inmediata y en segundo lugar, con inspecciones subsiguientes para determinar el índice de deterioro. Cuando los costes de fallo son bajos, las técnicas NDE son solamente instrumentos de apoyo de decisión.

Según crece la popularidad de las técnicas NDE, los costes de aplicación se reducen. Por lo tanto, su uso llegará a ser económicamente viable para porciones más grandes de los sistemas de abastecimiento, hasta que en determinado momento resulte eficiente inspeccionar toda la red de abastecimiento periódicamente mediante técnicas NDE.

## 6 Conclusiones

Es necesario un marco estructural para la gestión de un sistema completo de abastecimiento, incluyendo técnicas de recolección de datos y técnicas no destructivas de evaluación y monitorización, para proporcionar la información necesaria para tomar las mejores decisiones en la reparación, rehabilitación y el reemplazo de las redes de abastecimiento. Otros temas considerados dentro del marco, incluyen las consecuencias de los fallos de las tuberías, los modelos del deterioro de la tubería, mejor conocimiento de los mecanismos de fallo, la priorización de tuberías para el análisis y procesos de toma de decisiones actual. Las técnicas de rehabilitación y reemplazo forman una parte importante del marco de la gestión.

Los sistemas de abastecimiento de agua no pueden ser enterrados y olvidados, sino que por el contrario, deben ser gestionados constantemente para proporcionar los costes más bajos del ciclo vital y asegurarse de que no ocurran los fallos indeseados. El marco

---

---

también incluye la necesidad de tratar los sistemas de distribución, que tienen unas consecuencias del fallo generalmente leves, de una manera diferente de los sistemas de aducción, que tienen generalmente unas consecuencias de fallo más graves. En el primer caso, la cuestión principal es la gestión del fallo y conseguir un número bajo de las roturas en sistemas principales por kilómetro, mientras que en el segundo caso, puede ser más interesante la prevención de fallos debido al alto coste (no solo económico) que implican.

Mientras que el marco de la gestión proporciona una aproximación inicial al mantenimiento integral de las tuberías, es evidente que aun se requiere un esfuerzo en investigación, para ser capaces de construir modelos de apoyo a la decisión para la gestión de tuberías. Algunas metas principales serían:

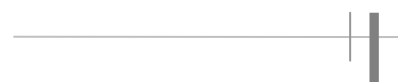
- ⇒ Mejorar la capacidad para caracterizar la corrosión en tuberías de fundición.
- ⇒ Mejorar la comprensión de los fallos en tuberías y los procesos de deterioro.
- ⇒ Desarrollo de las técnicas apropiadas de gestión, para el uso de tecnologías NDE dentro de los sistemas de abastecimiento.
- ⇒ Un mejor entendimiento de las consecuencias directas y sociales de los fallos en sistemas de abastecimiento.
- ⇒ Extensión de los modelos económicos actuales de la toma de decisión para incluir los efectos de la tecnología NDE, para explicar completamente las decisiones que necesitan ser tomadas para la gestión en los sistemas de abastecimiento.

# Capítulo 3

---

## Modelación y Fiabilidad Hidráulica





---

---

## **1 Funcionamiento de las redes de AP y la fiabilidad hidráulica**

La red de abastecimiento de agua potable (RAP), está constituida por un conjunto de tuberías y de dispositivos bajo presión, cuya misión es el suministro de agua a los usuarios. La topología de la red depende de la dispersión de los abonados, de la localización de fuentes de captación y de las zonas de almacenamiento.

La satisfacción de los abonados se mide por la calidad y la cantidad del agua entregada. La vulnerabilidad de la red frente a la ocurrencia de fallos depende de la localización de las tuberías, del momento de la ocurrencia del fallo y de la naturaleza de los abonados afectados. Las tuberías que constituyen la red no tienen todas el mismo papel en el suministro de agua. Algunas son más importantes desde un punto de vista hidráulico.

La importancia de una tubería queda descrita por la cantidad de agua que permite entregar (caudal), la naturaleza y el número de abonados a los que perjudica. Después de haber definido la problemática de la renovación, en este capítulo trataremos de la caracterización del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable (RAP) y presentaremos los índices que permiten medir la vulnerabilidad de una red de abastecimiento de agua potable. Estos índices definen una jerarquización de las tuberías que constituyen la red. Posteriormente, proponemos dos índices que traducen el rol de cada tubería en el suministro de agua y el impacto de su indisponibilidad, que describe un fallo o una rotura sobre el funcionamiento de la red. Este capítulo trata de la descripción del funcionamiento de una red RAP, y sobre los requisitos necesarios en la toma en consideración del criterio técnico en materia de renovación.

## **2 Introducción**

En este capítulo se trata de describir el funcionamiento hidráulico de la red. El suministro del agua hacia los usuarios debe hacerse en calidad y cantidad satisfactoria. El abastecimiento de agua depende de la naturaleza del usuario: doméstico, comercio, industrial, gubernamental, etcétera. El consumo es variable según los días de la semana y las horas del día. Existen períodos punta durante la jornada, que corresponden a un consumo máximo de agua. Nosotros distinguimos también el día punta en el año que corresponde a un consumo máximo. Es claro que con arreglo al período considerado y del tipo del abonado comunicado, el impacto de un fallo es diferente.

Presentamos primeramente las diferentes nociones en contacto con una red de abastecimiento de agua Potable (RAP), y luego presentamos una revisión de la literatura sobre el estudio de la fiabilidad hidráulica de la red, identificando índices de fiabilidad hidráulica, permitiendo medir el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada sobre el funcionamiento hidráulico de la red, que se acompaña de una nueva distribución de los flujos y una variación de los niveles de presión a los nudos de consumo. El modelo de ayuda a la decisión debe integrar el análisis del deterioro estructural de la red, así como una descripción del funcionamiento de la misma.

---

---

### **3 El abastecimiento en las RAP**

El abastecimiento de agua potable comprende el conjunto de todas las operaciones de suministro a la población del agua potable, desde la toma en el medio natural hasta la entrega al usuario. Dicho proceso busca responder a dos objetivos:

- ⇒ Producción del agua de calidad, a partir del agua cruda que, generalmente, necesita un tratamiento.
- ⇒ La distribución del agua producida, a través de un conjunto de instalaciones y de redes, con el fin de responder a la demanda de los consumidores de manera satisfactoria (índice de servicio).

#### **3.1 Funciones del Abastecimiento de Agua Potable**

Distinguimos varias etapas en el proceso de producción y conducción del agua. La primera etapa es la etapa de captación, que consiste en recoger las aguas subterráneas o superficiales de las fuentes. Viene luego la etapa de aducción, que permite trasladar el agua de la zona de captación hasta la proximidad de la zona de distribución. Antes de ser distribuida, el agua debe sufrir un tratamiento, lo que permite transformar el agua cruda en agua potable. El agua es seguidamente conducida hacia las zonas de almacenamiento, con el fin de regular el gasto en la red y prevenir una escasez de agua en caso de fallo o demanda alta. El agua es finalmente distribuida a través de la red de alimentación de agua potable (RAP) a los usuarios.

#### **3.2 El suministro del agua potable en México**

Si bien México se precia de tener algunos de los mejores organismos operadores de agua potable y saneamiento de América Latina, también cuenta con algunos cuyo desempeño es deplorable. El acceso, la eficiencia y la calidad de los servicios de agua y saneamiento varían mucho de una localidad a la otra, reflejando en gran medida los diferentes niveles de desarrollo en todo el país. En general, el sector del agua y saneamiento mexicano está marcado por los siguientes problemas:

- ⇒ Baja eficiencia técnica y comercial en la prestación de los servicios.
- ⇒ Calidad inadecuada de los servicios de abastecimiento de agua.
- ⇒ Calidad deficiente de los servicios de saneamiento, especialmente en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales.
- ⇒ Cobertura insuficiente en las zonas rurales más pobres.

##### **3.2.1 Provisión de servicios**

Según la Constitución Mexicana, la responsabilidad por la entrega de servicios de abastecimiento de agua y de saneamiento, recae en 2,446 municipalidades desde la descentralización del año 1983. Sin embargo, unos cuantos de los 31 estados entregan servicios a través de empresas estatales de agua, que actúan en nombre de las municipalidades. La mayoría de los estados también cuentan con agencias estatales de



abastecimiento de agua ya establecidas, que desempeñan distintos roles según el estado, tales como asistencia técnica a los proveedores de servicio, apoyo en la planificación de inversiones y canalización de los subsidios federales. En algunos casos, las agencias estatales proporcionan los servicios de agua y saneamiento directamente. En áreas rurales, las Juntas de Agua son responsables por el abastecimiento de la misma.

### 3.2.2 Políticas

Las políticas federales que rigen el sector de agua y saneamiento son establecidas por la Comisión Nacional del Agua (CNA), una dependencia autónoma del Ministerio del Medio Ambiente. La estrategia sectorial del gobierno federal se concentra en proporcionar subsidios a la inversión, para los proveedores de servicios, mediante una variedad de programas destinados a mejorar la cobertura y la eficiencia. En 2004, una enmienda a la Ley de Aguas Nacionales, contemplaba la transferencia de ciertas funciones tanto del ámbito federal como del estatal, a las recién creadas instituciones a nivel de cuencas hidrológicas, incluyendo decisiones financieras mediante la creación de un sistema financiero del agua. Las disposiciones de la nueva ley aún no han sido implementadas.

Los organismos operadores se encargan de administrar y operar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, con el objeto de dotar estos servicios a los habitantes de un municipio o de una entidad federativa. Dichos organismos pueden tener diferentes denominaciones como: sistemas de agua, direcciones, comisiones, juntas locales, departamentos y comités entre otros, de acuerdo a la estructura orgánica a la que pertenezcan.

Existen en el país 2,356 organismos operadores que emplearon en 1998 a 87,884 personas, cuyas remuneraciones ascendieron a 3,759.7 millones de pesos. Es mediante este personal ocupado y por medio de unos activos fijos con valor de 57,358.7 millones de pesos, que los organismos generan un valor agregado de 27,167.4 millones de pesos.

<b>Organismos operadores</b>	<b>2.356,0</b>
Personal empleado	87.884,0
Remuneraciones*	3.759,7
Activos fijos netos*	57.358,7
Producción bruta total*	32.167,4
Valor agregado*	27.167,4
* millones de pesos	

*Tabla 3. 1 Principales características de los sistemas de agua*

De los 2,356 organismos operadores que existen en la República Mexicana, 1,567 proporcionan el servicio a poblaciones urbanas, 98 a poblaciones rurales y 691 a poblaciones de los dos tipos antes mencionados. Cabe hacer mención que un organismo

operador puede brindar el servicio a un municipio o parte de él, dos o más municipios o parte de ellos e inclusive puede brindar el servicio a municipios de dos entidades diferentes.

Cobertura del agua potable (definición amplia)	97%
Cobertura del alcantarillado (definición amplia)	79%
Continuidad de servicio (%)	45%
Uso de agua urbano promedio (l/h/d)	aproximadamente 250
Porcentaje de usuarios con micromedición	74%
Porción del Porcentaje de agua residual recogido y tratado	30% (2005)
Inversión anual en agua y saneamiento	valor no disponible
Porcentaje de autofinanciamiento por parte de las empresas de servicio público	Menos de 5%
Porcentaje de financiamiento por impuestos	Aproximadamente 90%
Porcentaje de financiamiento externo del país	Menos de 10%

*Tabla 3. 2 Datos brutos del sector agua*

#### **4 La distribución y las redes de agua potable**

Consideramos en este trabajo la parte de la red que permite suministrar el agua de zonas de almacenamiento hacia los abonados. Distinguimos varios tipos de abonados, con arreglo a la razón social: doméstico, comercio, industrial, gubernamental. La distribución del agua se efectúa con la ayuda de redes enterradas, constituidas por tuberías y de conducciones bajo presión que comprenden: tuberías y piezas especiales, dispositivos de fontanería: válvulas, aparatos de medición: contadores, macromedidores, bocas contra incendio, etcétera.

Las zonas de almacenamiento, generalmente, comprenden los depósitos de gran capacidad, enlazando con los abonados mediante conductos. La conducción del agua se acompaña de una pérdida de energía, debido a los rozamientos con las paredes internas de las tuberías y de los accesorios hidráulicos que contiene la red. Esta disipación de energía se traduce en el fenómeno de pérdida de carga.

---

---

## 4.1 Estructura de la Red de Agua Potable (RAP)

La estructura de la red RAP depende de la localización de los abonados, de su importancia y del nivel de la demanda que hay que asegurar. La estructura traduce las dimensiones de las tuberías, la capacidad de los depósitos, el número de bombas y la potencia suministrada. La estructura de la red tiene en cuenta los elementos geográficos tales como: la dispersión de los abonados, la presencia de obstáculos naturales, presencia de caminos, ferrocarril, jardines, otras redes enterradas. Todos estos elementos van a permitir al servicio del agua definir características a cada componente de la red con el fin de asegurar su buen funcionamiento. Estas características se detallan a continuación:

### 4.1.1 Los conductos

Permiten la conducción del agua de un punto a otro punto de la red. Una tubería es un segmento de tubo, o canalización delimitada por dos puntos de consumo de agua, o de interconexión con otros conductos, denominados nudos. Cada tubería se caracteriza por:

- ⇒ Un nudo inicial y un nudo final
- ⇒ Una longitud dada  $l$
- ⇒ Un diámetro  $d$
- ⇒ Un coeficiente de rugosidad  $C$  traduciendo la pérdida de carga
- ⇒ Un estado: abierto, cerrado.

El flujo de agua se dirige desde el nudo que dispone de una altura piezométrica más elevada, hacia el nudo cuya altura piezométrica es menor. La rugosidad se traduce en resistencia de la tubería al flujo del agua. Las paredes internas de las tuberías al contacto con el agua fluyente, crean un fenómeno de fricción que se acompaña de pérdida de energía, debida al rozamiento que crea así una pérdida de carga lineal. En el marco de este trabajo, utilizamos la fórmula de Darcy-Weisbach para el cálculo de la pérdida de carga en las tuberías.

$$hf = \frac{8 * f * l}{\pi * g * D^5} \cdot Q^2 \quad (3.1)$$

Donde:

$f$  = Coeficiente de fricción (adimensional)

$l$  = Longitud (m)

$g$  = Constante gravitatoria ( $m/s^2$ )

$D$  = Diámetro (m)

$Q$  = Caudal ( $m^3/seg$ )

Distinguimos entre las tuberías con arreglo a su papel en la red y la naturaleza de material que las constituyen. La conducción del agua hacia las zonas de

almacenamiento necesita tuberías de diámetro importante (300-800 mm). Para la distribución, las tuberías son de diámetros inferiores (75-250 mm) y finalmente, las acometidas son las que cuentan con un diámetro menor (15-60 mm) y permiten suministrar el agua hasta los abonados, a partir de las tuberías de distribución. Otra distinción, puede ser efectuada a partir de la naturaleza del material que constituye las tuberías. La tabla 3.3 presenta las características cualitativas de algunos materiales de tubería:

Material	Resistencia mecánica	Resistencia a la corrosión
Hormigón	importante	importante
Fibro cemento	regular	fiable
Materiales plásticos	fiable	importante
Acero	importante	fiable
Fundición gris	fiable	importante
Fundición dúctil	importante	importante

*Tabla 3. 3 Distintos tipos de tuberías*

En las tuberías más antiguas, la fundición (mezcla de hierro y de carbono) aparece como el material más utilizado en la confección de las canalizaciones. Distinguimos entre las fundiciones grises (decir fundiciones antiguas) y fundiciones dúctiles. Esta distinción es relativa a la disposición del grafito (carbono) en el material, haciendo la fundición dúctil menos frágil. La fundición dúctil es preferida en general, porque presenta las propiedades siguientes:

- ⇒ Buena resistencia mecánica (tracción, choques).
- ⇒ Resistencia a los ataques del suelo, los fluidos, los sólidos transportados, a las variaciones de presión y de temperatura.

#### **4.1.2 Las bombas**

Una bomba es un dispositivo que permite aportar energía al fluido. La bomba se instala generalmente conectada a un depósito de aspiración. El arranque y el paro de la bomba dependen del nivel del depósito o de las demandas horarias específicas. Una bomba puede ser caracterizada por una potencia constante, aportada al agua en el curso del tiempo independientemente del caudal y la altura de impulsión, o mediante una curva característica que describe la relación entre la altura de bombeo y el caudal abastecido, con la ayuda de una función  $H = f(Q)$ .

Una bomba quedará definida por:

- ⇒ El nudo sobre el cual es indexada (en general un depósito).
- ⇒ La potencia absorbida por el agua o su curva característica (ver figura 3.1).

- ⇒ Los umbrales de paro y de arranque del depósito a partir de los cuales la bomba se para o arranca.
- ⇒ Las demandas horarias de funcionamiento y de parada (interrupción).

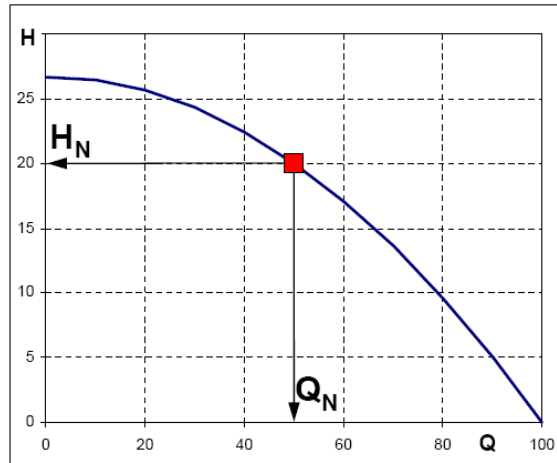


Figura 3. 1 Ejemplo de una curva característica

### 4.1.3 Las válvulas

Las válvulas permiten regular la presión ó el gasto en puntos precisos de la red. Las válvulas se caracterizan por:

- ⇒ Los nudos de entrada y de salida.
- ⇒ El diámetro.
- ⇒ La consigna de funcionamiento y el estado de la válvula.
- ⇒ Coeficiente de pérdida de carga singular.

Una válvula puede estar abierta o cerrada, o en una posición intermedia de regulación que depende de su consigna. El flujo de agua a través de la válvula viene acompañado de una pérdida de energía que puede ser expresada según:

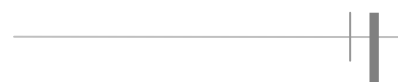
$$h_v = k(\theta) \frac{v^2}{2g} \tag{3.2}$$

Donde

$v$  = Velocidad del fluido (m/s)

$D$  = Diámetro (m)

$k(\theta)$  = Coeficiente que depende, entre otras cosas, del grado de apertura  $\theta$ .



#### 4.1.4 Los nudos

Los nudos representan puntos de unión entre las tuberías. Corresponden a puntos de entrada o de salida de agua. Existen dos categorías de nudos: nudos a gasto fijo y nudos cuyo gasto depende de la presión.

Los nudos a gasto fijo se caracterizan por una cota de terreno conocida y un gasto conocido, siendo la presión en el nudo una incógnita que debe ser calculada. Corresponden a puntos de consumo en la red. Estos nudos pueden describir el consumo de uno o de varios abonados del mismo tipo. Distinguimos entre los abonados según el tipo de consumo: doméstico, Industrial, administración, etcétera. El consumo al nudo expresado por la petición puede ser constante o variable. Según la naturaleza de los abonados la petición es descrita por una curva de consumo.

La curva de consumo describe para un tipo de abonado (doméstico, industrial, comercial, Administración, etcétera.), la evolución de la demanda de agua a lo largo del día. La figura 3.2 muestra una curva de modulación típica. El consumo diario es tributario a las horas del día. Para un consumo máximo, identificamos el día punta en el año y una hora punta durante la jornada. Para un día dado calculamos el consumo medio, para cada período t. El multiplicador de la demanda  $\mu_t$  a partir del consumo  $Q_t$  es calculada tal como:

$$\mu_t = \frac{Q_t}{Q} \quad (3.3)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{t=1}^{24} Q_t}{24} \quad (3.4)$$

periodo	1	2	3	4	.....	21	22	23	24
Multiplicador	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$		$\mu_{21}$	$\mu_{22}$	$\mu_{23}$	$\mu_{24}$

Tabla 3. 4 La curva de consumo o curva de modulación

##### *El coeficiente del día punta*

El coeficiente del día punta  $K_1$ , representa la relación entre el volumen máximo consumido en un día y el volumen de medio diario consumido en un año.

$$K_1 = \frac{\text{Consumo del día punta}(m^3)}{\text{Consumo medio del día}(m^3)} \quad (3.5)$$

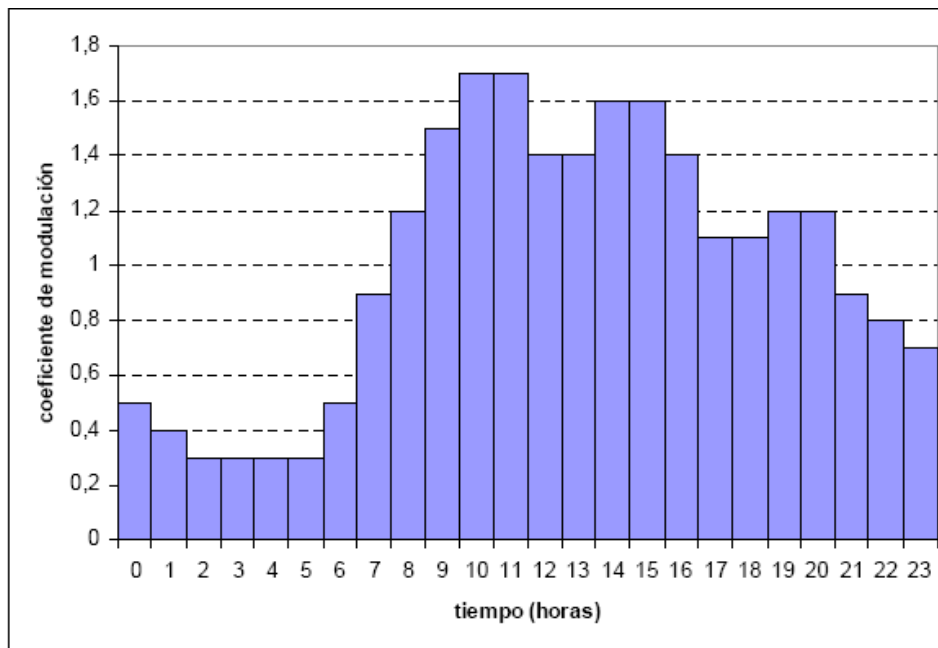


Figura 3. 2 Ejemplo de una curva de modulación

#### Coeficiente de la hora punta

El coeficiente de la hora punta  $K_2$ , representa la relación entre el consumo de la hora punta y el consumo medio del día punta.

$$K_2 = \frac{\text{Consumo de la hora punta}(m^3)}{\text{Consumo medio del día punta}(m^3)} \quad (3.6)$$

#### 4.1.5 El rendimiento de la red

A partir de todo lo expuesto anteriormente, puede definirse el rendimiento de una red como el cociente entre el volumen de agua registrada y el volumen de agua inyectada, medidos ambos para el mismo período de tiempo. Aunque es posible determinar el rendimiento para períodos de tiempo más cortos, lo habitual es considerar un año completo.

Lógicamente, el rendimiento fluctúa a lo largo del tiempo, puesto que no se mantiene constante la relación entre volumen registrado y no registrado. Por ejemplo, el rendimiento tiende a disminuir en horas de bajo consumo. Cuando disminuye el consumo (en horas valle) aumenta la presión en la red y por lo tanto, se incrementan las fugas, salvo que el sistema de regulación del abastecimiento reduzca las presiones en períodos de bajo consumo. Al aumentar las fugas, aumenta el porcentaje de agua no registrada y disminuye el rendimiento.

En el numerador de la expresión anterior, puede colocarse el volumen consumido en lugar del volumen registrado. Dicho volumen consumido, incluye tanto el registrado como el no registrado pero utilizado de manera “correcta” (abonados sin contador, volúmenes estimados por imposibilidad de lectura, limpieza de calles y alcantarillado,

---

---

incendios, riego, mantenimiento, etcétera). Se trata de discernir claramente entre volumen no registrado pero útil, del volumen de agua que verdaderamente se pierde en la red (fugas, conexiones ilegales, etcétera). Evidentemente, el rendimiento así obtenido es un parámetro muy interesante para evaluar la gestión del abastecimiento. El problema estriba en que el volumen consumido (registrado + no registrado pero “útil”) debe ser estimado, lo que hace que el rendimiento así calculado no sea un parámetro totalmente objetivo. Como ya se ha comentado, estos volúmenes deberían medirse (siempre que sea posible) aunque no vayan a facturarse, precisamente para tener un mejor conocimiento de la red.

Otra cuestión a tener en cuenta es la dificultad que existe para realizar todas las lecturas de contador simultáneamente. Para solucionar este problema es recomendable aumentar el período de tiempo, y es por ello que suele considerarse un año completo. Con períodos de tiempo más cortos y con los sistemas de medición que actualmente tienen la mayoría de los abastecimientos, los rendimientos así obtenidos no son muy fiables. Los valores del rendimiento pueden oscilar de forma muy importante, entre unos u otros abastecimientos. Desde valores bajísimos (30% o incluso menos) para sistemas con condiciones muy malas, hasta valores mucho mejores (80% es un muy buen rendimiento) para sistemas que se encuentran bien gestionados, bien conservados y con medidores en todos los puntos de consumo. Precisamente, las dotaciones de poblaciones que parecen semejantes pueden ser muy dispares a causa de la diferencia de rendimientos, si el consumo es el mismo en ambas poblaciones, pero el porcentaje de agua que se pierde es muy superior en una de ellas o el parque de contadores es mucho más viejo. El volumen de agua inyectada será también muy superior, aunque el agua consumida sea la misma.

El rendimiento de la red expresado por  $\eta$ , indica la relación entre la cantidad producida en el curso de un año dado y la cantidad facturada (vendida). El rendimiento de la red permite determinar el volumen de agua no facturado (regadío, incendios, pérdidas).

$$\eta = \frac{\text{Volumen facturado (m}^3 \text{ / año)}}{\text{Volumen producido (m}^3 \text{ / año)}} \quad (3.7)$$

#### **4.1.6 Los nudos a carga fija**

Son nudos donde la carga es fija o cuya cota piezométrica es conocida. Puede tratarse de un depósito cuyo nivel de agua varía en función del tiempo, de un hidrante contra incendio o de un depósito de aspiración para una bomba cuyo nivel no ha cambiado, para estos nudos el caudal debe ser calculado.

#### **4.1.7 Los depósitos**

Los depósitos son nudos con una capacidad de almacenamiento, cuyo volumen de agua puede variar a curso del tiempo. Esta variación es descrita por la curva de volumen, que para un punto de almacenamiento, define la relación entre el nivel de agua y el volumen que él contiene. Esta relación tiene en cuenta la forma geométrica del punto de almacenamiento. Características de un depósito son:



- La cota de llenado y de vaciado
- El diámetro del depósito o su curva de volumen
- Los niveles: inicial, mínimo y máximo del agua

#### 4.1.8 Los Embalses

Estos nudos son los puntos de almacenamiento de capacidad infinita, representa fuentes externas de abastecimiento de agua (aspiración de una bomba, lago, río). Los embalses se caracterizan por un nivel de agua fija.

### 5 Topología de la red RAP

La topología de la red es la representación esquemática de los diferentes nudos de una red y de sus enlaces físicos (tuberías, bombas, válvulas). La disposición de los nudos y de las tuberías depende de la localización de los abonados, presencia de caminos, obstáculos naturales, presencia de otras redes. En término de topología, distinguimos los siguientes tipos de red.

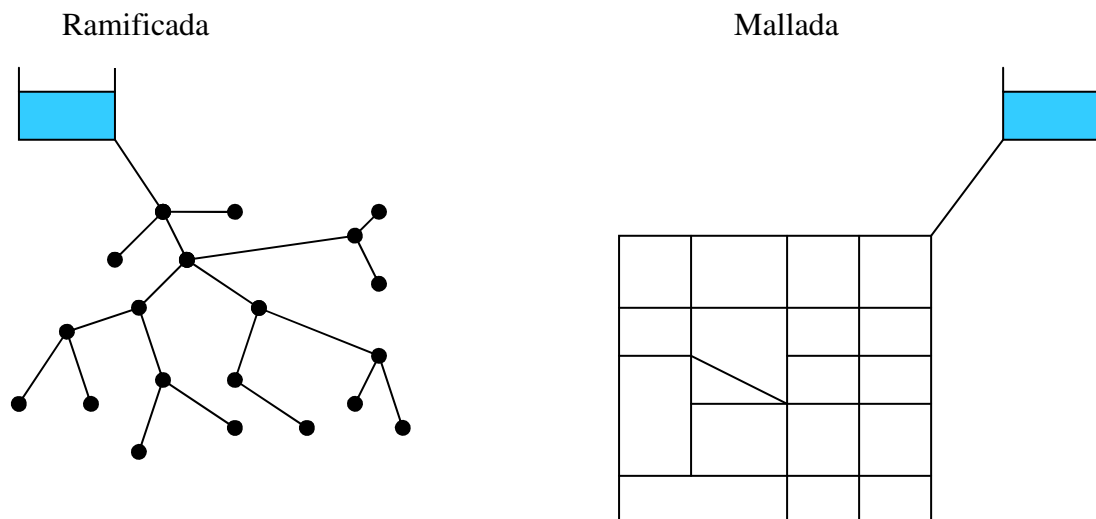


Figura 3. 3 Clasificación de las redes de acuerdo a sus características topológicas

#### 5.1 Las redes ramificadas

Este tipo de red se presenta según una estructura arborescente a partir del nudo de carga fija, asegurando la postura bajo presión. Esta configuración está justificada por la dispersión de los abonados. Sin embargo, este tipo de topología reduce la fiabilidad de la red en el caso de una rotura de una tubería, privando del suministro de agua a los usuarios aguas abajo del punto de rotura. Generalmente caracteriza las redes de agua en ambiente rural (ver figura 3.3).

---

---

## **5.2 Las redes malladas**

Conteniendo un cierto número de tuberías unidas entre si y pudiendo asegurar la distribución del agua, esta configuración caracteriza las redes de agua potable en zonas urbanas, donde existe una concentración de los abonados. La presencia de tuberías unidas entre si mediante trayectos mallados, reduce los riesgos de corte en caso de rotura de tuberías y asegura una redundancia en el suministro del agua, limitando el impacto de una rotura sobre la red de agua. En la realidad ambas configuraciones coexisten en la misma red. En medio rural encontramos habitualmente redes ramificadas, mientras que en ambiente urbano es habitual utilizar redes malladas (ver figura 3.3).

## **6 La modelación hidráulica en la redes de RAP**

La modelación del funcionamiento de la red trata de describir el comportamiento hidráulico de diferentes dispositivos de la red. El interés es reproducir lo que sucede en la realidad en la red, con la ayuda de un modelo matemático-hidráulico. La representación y la precisión del modelo, son los principales objetivos del servicio del agua, de los análisis y el nivel de detalle condiciona los resultados de la modelación. Harrouz (1996) distingue varios tipos de modelos:

### **6.1 Modelo para el dimensionado de la red**

El modelo permite verificar para una configuración dada de la red, la satisfacción de exigencias de los abonados en término de presión y de gasto. El interés es dimensionar las tuberías y dispositivos hidráulicos. El estado de las tuberías y la demanda son supuestos conocidos. El nivel de detalle es importante y todas las tuberías están representadas en el modelo.

### **6.2 Modelo del análisis del funcionamiento hidráulico y diagnóstico**

En este caso, el modelo procura describir el funcionamiento de una red existente mediante la determinación del estado de las tuberías a través de la medida de la rugosidad de las tuberías y la demanda de los abonados. Para una red de los datos vinculados a la topología de la red, los tipos de tubería, la topología de los consumidores, así como las medidas de presión y gastos en unos puntos de la red son supuestos conocidos.

### **6.3 Modelo para la gestión de la red**

En este caso, el modelo servirá para describir el comportamiento de las fuentes de aprovisionamiento, zonas de almacenamiento y de las estaciones de aspiración de las bombas. El interés de este tipo de modelo es optimizar la explotación de las fuentes de agua y de minimizar los costes de explotación de la red, regulando la aspiración con la bomba y el almacenamiento del agua durante la jornada. Este modelo retiene sólo las tuberías de gran diámetro que sirve para el transporte y para la distribución del agua.

---

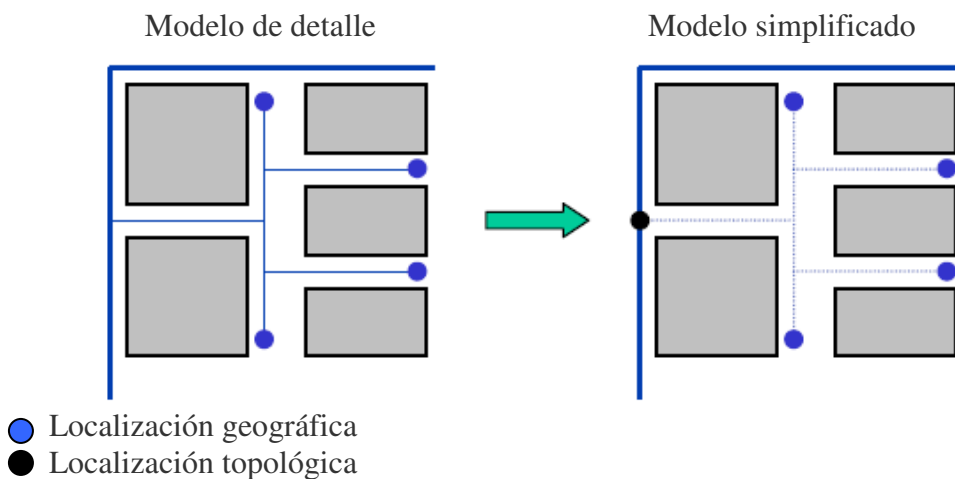
---

## 6.4 Precisión del modelo de las RAP

La modelación del funcionamiento de la red debe describir el comportamiento real de la red. De allí la función de la utilización del modelo, por tal motivo debe ser definido un nivel de detalle. El modelo considerará que ciertas tuberías de la red y ciertos abonados serán reunidos sobre nudos con el fin de simplificar el modelo. No existen reglas precisas para la simplificación de la red, pero algunas frecuentemente utilizadas son:

- ⇒ Supresión de las tuberías de pequeños diámetros o de las pequeñas longitudes
- ⇒ Supresión de las tuberías en disposición de antena
- ⇒ Supresión de los nudos intermedios, acumulación de varios abonados en el mismo nudo.
- ⇒ Concatenación de tuberías del mismo diámetro y el mismo material
- ⇒ Distinción entre abonados de naturaleza diferente: doméstico, industrial y otros.

El otro aspecto que hay que tomar en consideración es la definición de las tuberías. El estudio del funcionamiento de la red y el deterioro hidráulico no utilizan la misma definición de la tubería.



*Figura 3. 4 Modelo de una red de detalle y una red simplificada*

La Figura 3.4, ilustra la distinción entre la red tal como realmente existe y el modelo hidráulico. Este modelo debe considerar el estudio del deterioro estructural de tuberías, que se articula sobre una definición más detallada de las tuberías que corresponde más a la red real. Debemos encontrar un nivel de descripción de la red que asegure un compromiso entre el estudio del deterioro estructural e hidráulico. Esto necesita la adaptación de datos disponibles y una definición apropiada de las tuberías de la red.

---

---

## 7 Estudio de la fiabilidad hidráulica de las redes de RAP

Los primeros trabajos llevados por Shamir y Howard (1979) o Walski y Pellicia (1982), muestran un interés por el impacto del deterioro estructural sobre los costes de mantenimiento y la determinación de un óptimo económico, que define un umbral para la renovación de tuberías. Todini (2000) vuelve sobre este enfoque e identifica insuficiencias mediante una aproximación puramente económica. Una red construida y administrada con arreglo a un óptimo económico, puede no responder a restricciones técnicas. Se considera asimismo los problemas de dimensionamiento de tuberías o de deficiencia de presión. El autor vuelve sobre la importancia de la topología de la red en la toma de decisiones, comparando la fiabilidad de una red que se presenta en redes malladas y redes ramificadas. Sin embargo, la topología de la red no la define el Gerente o el diseñador de la red de agua, sino las restricciones vinculadas a la disposición de los usuarios, caminos, la presencia de obstáculos naturales, la presencia de otras redes: gas, electricidad, etcétera.

Todini (2000) introdujo la noción de resiliencia, que traduce la capacidad de la red para resistir un fallo o una rotura y limita su impacto sobre el funcionamiento de la red. Para el autor, la red debe ser capaz de hacer frente a incidentes cuyo efecto es temporal en el tiempo, pero pudiendo engendrar degradaciones importantes. Aunque la noción de resiliencia no es evocada directamente bajo este nombre, a menudo nos referimos a este concepto. La fiabilidad de la red depende de su capacidad para limitar la incidencia de un evento (fallo, en general) sobre su funcionamiento. Ormsbee y Kessler (1990) definen la redundancia como medida de la fiabilidad. Se definen dos tipos de redundancia: topológica e hidráulica. La redundancia topológica asegura la existencia de un camino de la fuente al nudo de consumo. La redundancia hidráulica asegura la capacidad de un camino redundante, que abastece una presión adecuada para las peticiones al nivel de los nudos para condiciones de cargas específicas. Para Xu *et al.* (1999) la fiabilidad de la red, es medida por su capacidad de asegurar la demanda de los nudos a una presión mínima requerida.

La fiabilidad depende de los fallos de los dispositivos hidráulicos (roturas en las tuberías, parada de las bombas, fugas en la red), la disminución de la capacidad hidráulica de la red debido al deterioro de las tuberías, depósito de materia sobre las paredes, aumento de la rugosidad, de la variación de las demandas y su evolución en el tiempo, circunstancias que deben de ser consideradas en el dimensionamiento de la red y su funcionamiento. Para Walski y Gessler (1999), la fiabilidad de la red depende de la sobrepresión disponible para los nudos de consumo. Identifican una presión requerida a nivel de los nudos  $P_{requerida}$  y la presión disponible para los nudos. Definen "Índice Mínimo de exceso de carga" como:

Índice de carga»,  $I_m$  tal que para  $P_{medida(i)} \geq P_{requerida(i)}$  e  $i=1, \dots, n$ :

$$I_m = \min_{i=1, \dots, n} (P_{medida(i)} - P_{requerida(i)}) \quad (3.8)$$

Los autores evalúan esta sobrepresión sobre el conjunto de los nudos de consumo, definiéndola como Índice de exceso de carga total y se calcula de la siguiente manera:

$$I_r = \sum_{i=1}^n (P_{medida(i)} - P_{requerida(i)}) \quad (3.9)$$

Todini (2000) establece un balance de la energía contenida en la red. Para el autor cuando más exceso de energía existe en la red, más confiable es dicha red. La energía contenida en la red  $En_{red}$ , se expresa como la suma de la energía disipada  $En_{disipada}$  debido a las fricciones internas en las tuberías y las pérdidas de carga, así como la energía necesaria para los nudos de consumo  $En_{entregada}$ :

$$En_{red} = En_{disipada} + En_{entregada} \quad (3.10)$$

El autor propone aumentar la energía disponible en la red sobreestimando la energía disipada, para lo cual sugiere el índice de resiliencia que es definido como:

$$Ir = 1 - \frac{En_{disipada}}{En_{disipada}^{max}} \quad (3.11)$$

Dicha ecuación expresa la energía disipada para una presión y una demanda dada, en cada nudo de consumo y corresponde a la energía disipada correspondiente a una presión superior a la presión requerida, para satisfacer la misma demanda. Ivaltemir *et al.* (2004) proponen medir la fiabilidad de la red con la ayuda de un índice que calcula la adecuación de la presión al nudo de consumo, con una presión mínima requerida. El índice ( $\psi_{pb}(i,t)$ ) que se calcula mediante las ecuaciones siguientes:

$$\psi_{pb}(i,t) = \sqrt{\frac{P_{at}(i,t) - P_{min}}{P_{max}(i,t) - P_{min}}} \quad si P_{min}(i,t) \leq P_{at}(i,t) \leq P_{max}(i,t) \quad (3.12)$$

$$\psi_{pb}(i,t) = 0 \quad si P_{at}(i,t) < P_{min}(i,t) \quad si P_{at}(i,t) > P_{max}(i,t) \quad (3.13)$$

Donde  $P_{min}$  corresponde a la presión mínima a partir de la cual es posible satisfacer los nudos de consumos, la presión  $P_{at}(i,t)$  corresponde a la presión disponible para los nudos de consumo  $i$  en el instante  $t$  simulada por el modelo y  $P_{max}(i,t)$ , se refiere a la presión máxima tolerada en el nudo de consumo  $i$  en el instante  $t$ . Seguidamente se define un índice que calcula la satisfacción de la demanda de los nudos de consumo mediante la ecuación 3.14:

$$HB_{SD} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n \psi_{pb}(i,t) \cdot \frac{Q_{dem}(i,t)}{\sum_{i=1}^n Q_{dem}(i,t)} \quad (3.14)$$

Donde  $Q_{dem}(i,t)$  expresa la demanda en el nudo  $i$  en el instante  $t$ . Bertin (1994) describe la fiabilidad de la red con la ayuda de un índice, que expresa el impacto de un fallo sobre la satisfacción de la demanda a nivel de los nudos de la red:

$$ft_j = \sum_{i=1}^n \frac{v_{ji}}{V_i} \quad (3.15)$$

donde  $V_{ji}$  corresponde al consumo en el nudo  $i$  para el fallo de la tubería  $j$ ,  $V_i$  corresponde al consumo al nudo  $i$  a la hora punta del día punta y  $n$  el número de nudos en la red.

---

---

## 7.1 Modelos para la fiabilidad hidráulica de las redes de agua potable (RAP)

A continuación se presentan los modelos para la medida de la fiabilidad hidráulica de las redes RAP, desarrollados en el marco del proyecto Care-W. Han sido desarrollados tres modelos hidráulicos de fiabilidad (Hydraulic Reliability Models, HRM), permitiendo medir la importancia hidráulica de cada tubería de la red de agua y el impacto sobre su funcionamiento, en caso de que se presente un fallo, con la ayuda de los índices de fiabilidad. Estos modelos son: Failnet-Reliab elaborado por el CEMAGREF (Francia), el Relnet elaborado por Universidad de Tecnología de Brno (la República Checa) y el Aquarel: elaborado por SINTEF (Noruega). Estos modelos han sido sometidos a un test sobre redes de tamaño y complejidad reales.

Para una presión satisfactoria en los nudos de consumo, se compara el agua realmente suministrada y la demandada en dichos nudos. En caso de una deficiencia importante en el suministro de la demanda solicitada la tubería será considerada como crítica. Sin embargo, el enfoque de cálculo y los instrumentos utilizados son sensiblemente diferentes. El objetivo es evaluar los indicadores importantes expresados a la escala de la red como son:

- ⇒ La importancia hidráulica de la tubería (funcionamiento hidráulico) y como se representa el impacto de un fallo de la tubería sobre el conjunto de la red (o una parte de ella), el tiempo de interrupción del suministro del agua en la red de distribución, así como la reducción de la presión o del consumo.
- ⇒ La vulnerabilidad de los consumidores (a nivel de la tubería, del sector o en la totalidad de la red), los cuales representan un riesgo con la inconformidad de los mismos, inconformidad que puede ser ocasionada por la interrupción del servicio, la inundación, la desviación del tráfico, etcétera.

### 7.1.1 Failnet-Reliab (CEMAGREF)

El índice propuesto es el Índice de Criticidad Hidráulica por sus siglas en inglés (“Hydraulic Criticity Index”, HCI), que se apoya en la simulación de fuga con rotura sobre la red y la comparación de los consumos de agua antes y después de la sobrevenida del fallo o rotura. No se consideran roturas simultáneas sobre la red, solo se considera un fallo durante el análisis de la red. El cálculo de este índice se inspira en trabajos realizados por Bertin (1994). Dicho cálculo se basa en una estimación del índice de fallo de la tubería considerada y del tiempo de indisponibilidad de la tubería dada por MTTR (Mean Time To Repair). Los consumos son al nivel de los nudos. Para una tubería  $j$ , el Índice de criticidad hidráulica es dado por la ecuación 3.16:

$$HCI_j = \sum_{Nudos_i} (Demanda_i - consumo_i) \text{ índice de rotura}_j \cdot MTTR_j \cdot \frac{\omega_i}{\sum_{Nudos_i} \omega_i} \quad (3.16)$$

Donde  $\omega_i$  se refiere al coeficiente de importancia del nudo  $i$  respecto de la red, que a su vez permite identificar a los consumidores importantes en la misma. Los cálculos son

efectuados con la ayuda de un algoritmo específico. El instrumento utiliza un modelo hidráulico basado en el software Porteau® (CEMAGREF).

### 7.1.2 Relnet (Université de Technologie de Brno)

Propone un modelo que permite medir el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada en el funcionamiento de la red, tomando en consideración las presiones y los consumos en los nudos.

El modelo utiliza Epanet2® (Rossman, 2000) para efectuar las simulaciones hidráulicas. Permite calcular el HCI (Índice de Criticidad Hidráulica) que representa para una tubería dada, la relación entre el agua que es realmente consumida de la red y el agua demandada, lo cual se calcula con la expresión 3.17.

$$HCI_j = \frac{\sum_{Nudos_i} (Demanda_i - Consumo_i)}{\sum_{Nudo_i} Demanda} \quad (3.17)$$

Donde la  $Demanda_i$  se refiere a la demanda en el nudo  $i$ ,  $Consumo_i$  se refiere al consumo en el nudo  $i$  y la  $Demanda$  se refiere a la demanda total requerida por los nudos. El cálculo de los consumos en los nudos se basa en la presión de los nudos. Aquí son identificados dos aspectos: primero una presión mínima, a partir de la cual es posible el suministro de agua pero en cantidad proporcional para la demanda solicitada y una presión deseada, a partir de la cual el suministro de agua corresponde a la demanda del nudo. El segundo aspecto es que, para un nivel de presión inferior a la presión deseada, el consumo es inferior a la demanda de los nudos. La primera etapa consiste en analizar el funcionamiento hidráulico de la red, calculando las presiones en los nudos y determinando la demanda total sobre el conjunto de la red. La etapa siguiente es hacer indisponible (cerrándola) la tubería considerada. Para lo cual se efectúa una nueva simulación hidráulica, que permite calcular la presión en los nudos.

El consumo en el nudo dependerá de la comparación de los niveles de las presiones antes y después de la indisponibilidad de la tubería. El consumo en un nudo dado será cero, si la presión a este nudo es inferior a la presión mínima inicialmente definida. Para una presión comprendida entre la presión mínima y la presión deseada, el consumo será proporcional a la demanda del nudo y a la presión antes y después de la indisponibilidad de la tubería, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Consumo_i = Demanda \frac{\sqrt{presión \text{ despues}_i}}{\sqrt{presión \text{ antes}_i}} \quad (3.18)$$

Para una presión en el nudo superior a la presión demandada, entonces el consumo en el nudo será igual a la demanda en el nudo.

---

---

### 7.1.3 Aquarel (SINTEF)

El modelo desarrollado por el SINTEF utiliza el mismo enfoque basado en la simulación de fallo y la medida de impacto sobre el funcionamiento de la red. Aquarel considera el impacto de fallo en el nivel de los depósitos en la red. Puede considerar hasta 2 fallos simultáneos sobre la red. El modelo analiza el deterioro estructural de la tubería, a través de un índice de fuga con rotura o una probabilidad de fuga con rotura y el tiempo de indisponibilidad de la tubería. El modelo utiliza a Epanet ® para la simulación hidráulica. No existe una descripción precisa de las aproximaciones utilizadas en el cálculo.

## 8 Toma en consideración por el efecto en la red y medida de la importancia de una tubería

La red de abastecimiento de agua potable es una red conexas, cuya fiabilidad depende del estado de las tuberías y de la configuración de la red. Se utilizan dos índices para simular la incidencia de una rotura en la tubería sobre la red distribución. Una rotura es simulada por el cierre de la tubería, es decir se aplica el “estado” cerrado en la tubería. Entendemos que lo adecuado es simular la rotura de la tubería a través de un emisor que descarga a la atmosfera, pero consideramos que determinar el valor del coeficiente de dicha emisor, es sumamente complicado y agregaría un porcentaje de incertidumbre mayor a la simulación. Una vez que se realiza lo anterior, se mide el impacto desde un punto de vista hidráulico, considerando la posición topológica que guarda la tubería en la red en general, la naturaleza y el número de los abonados que pueden llegar a ser afectados en un tiempo dado. Todos los cálculos hidráulicos son efectuados con la ayuda de Epanet2 ®.

El impacto del fallo depende de la presión en los nudos de consumo, de modo que en el caso de un fallo aparecerá una nueva distribución de las presiones en los nudos de consumo, lo que provocará una disminución de la presión en ciertos nudos y un aumento en otros. En función de la variación del nivel de presión, la demanda en los nudos de consumo cambia indudablemente. Desde un punto de vista teórico, la medida del cambio de la demanda en los nudos de consumo es citado en Wagner *et al.* (1988) e Ivaltimir *et al.* (2004).

La medida de la importancia se obtiene comparando las medidas obtenidas antes y después de la supresión de la tubería. En el estado inicial, cada nudo de consumo que reagrupa un número de abonados dados, es caracterizado por una presión ( $P_{Init}$ ) y una demanda ( $Q_{Init}$ ). Para cada tubería dada son medidos los nuevos niveles de presión ( $P_{Nuev}$ ), en base a la demanda de los nudos de consumo ( $Q_{Nuev}$ ) consumo obtenido una vez que es realizada la simulación del fallo de la tubería.

Para cada tubería “cortada” se realiza una simulación hidráulica del funcionamiento de la red, y este proceso se realiza para cada una de las tuberías que constituyen la red con el fin de calcular el índice de criticidad de la tubería. La técnica se utiliza de manera análoga los trabajos de Wagner *et al.* (1988), que establecen una relación entre la cantidad de agua suministrada y la presión a un nudo de consumo. Se distinguen tres casos para los valores de la presión determinada por dos umbrales de presión, una presión inferior ( $P_{Inf}$ ) y una presión superior ( $P_{sup}$ ): El primer término es referente a los



nudos donde la presión está por debajo de la presión inferior requerida, y en este caso el suministro del agua no puede ser asegurado y por tanto la demanda en el nudo es nula.

$$Q_{Nuev} = 0 \quad (3.19)$$

El segundo caso se refiere a los nudos donde la presión ( $P_{Nuev}$ ), esta comprendida entre la presión inferior y la presión superior. En este caso el suministro del agua esta parcialmente asegurado, por lo tanto la demanda en los nudos de consumo ( $Q_{Nuev}$ ) es dada por la ecuación 3.20 que se muestra a continuación.

$$Q_{nuev} = Q_{inic} \cdot \sqrt{\frac{P_{Nuev} - P_{inf}}{P_{Sup} - P_{inf}}} \quad (3.20)$$

El tercer caso se refiere a los nudos cuya presión sobrepasa la presión superior ( $P_{sup}$ ), asegurando así un suministro normal del agua hacia los nudos de consumo, en este caso la demanda es dada por:

$$Q_{Nuev} = Q_{Init} \quad (3.21)$$

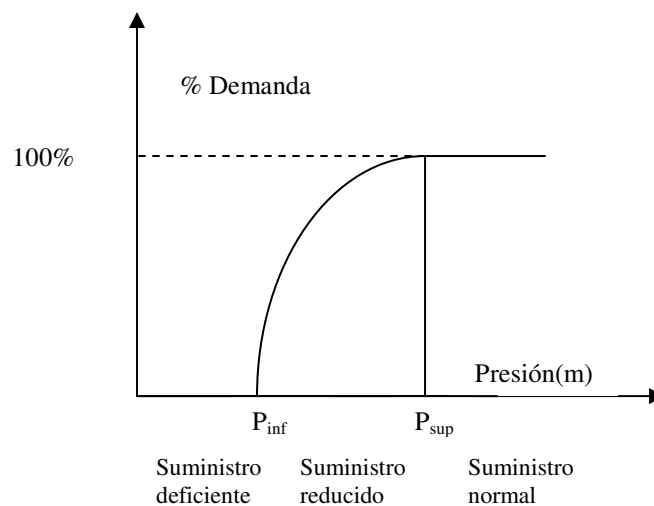


Figura 3. 5 Nivel de suministro en función de la presión (Adaptado de Wagner et al., 1988)

### 8.1 Índices hidráulicos de fiabilidad

Considerando los índices que aparecen en la literatura, se proponen dos índices que permiten medir el papel que juega una tubería dada en el suministro del agua.

### 8.2 Índice de criticidad hidráulica.

Este índice permite comparar la cantidad de agua suministrada en conjunto de la red, antes y después de la indisponibilidad de una tubería dada. Con el fin de calcular el índice de criticidad hidráulica (ICH) de una tubería  $j$ , es necesario calcular las presiones y los niveles de todos los nudos de consumo con arreglo a los casos mencionados. La ecuación siguiente define la expresión de cálculo del ICH para una red de  $n$  nudos:

$$ICH_j = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Init} - Q_{Nuev})}{\sum_{i=1}^n Q_{Init}} \quad \text{donde } ICH \in [0,1] \quad (3.22)$$

Donde ( $Q_{Init}$ ) es la demanda inicial, es decir antes de la simulación de la indisponibilidad de la tubería, como ya lo mencionamos; esto se realiza poniendo el estado de “cerrado” en la tubería al momento de la simulación cierre, con arreglo a la demanda de los nudos de consumo ( $Q_{Nuev}$ ).

La figura 3.6 presenta el diagrama de cálculo de los índices de fiabilidad para la red dada. El índice ICH obtenido para el conjunto de las tuberías de la red, traduce la cantidad de agua no suministrada en la indisponibilidad de una tubería dada.

### 8.3 Índice de deficiencia a los nudos

Este índice calcula el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada en el suministro del agua hacia los abonados. Asimismo, permite cuantificar el conjunto de los nudos de consumo donde el suministro no cumple con los requerimientos solicitados, o no cumple con la demanda requerida (Wagner *et al.*, 1988). Suponemos que por debajo de una cierta presión inferior ( $P_{Inf}$ ), el suministro del agua no esta satisfecho o no cumple con la demanda requerida.

Para cada tubería “cortada”, la simulación del cierre de la tubería se realiza aplicando el “estado” de cerrado en la tubería y entendemos, como se ha mencionado anteriormente, que lo idóneo es simular la rotura de la tubería a través de un emisor que descarga a la atmosfera. Pero consideramos que determinar el valor del coeficiente de dicho emisor, es sumamente complicado y agregaría un porcentaje de incertidumbre mayor a la simulación.

Con la ayuda de Epanet2 ® se realiza la simulación para determinar la presión de los nudos, seguidamente se realiza una comparación con la presión  $P_{Inf}$ . Si la presión obtenida en cada nudo de consumo con la simulación realizada es inferior a la presión inferior  $P_{inf}$ , entonces el nudo considerado será afectado mientras la tubería se encuentre indispueta. Este procedimiento permite identificar el conjunto de los nudos afectados por tal indisponibilidad de la tubería. Una vez identificados estos nudos para cada tubería “cortada” (con la simulación), se calcula el resultado entre el número de nudos no comunicados o afectados y el número de nudos total que conforman la red. El procedimiento para el cálculo del índice de deficiencia en los nudos será:

$$IDN_j = \frac{\text{Numero de nudos no comunicados}}{\text{Numero total de nudos}} \quad (3.23)$$

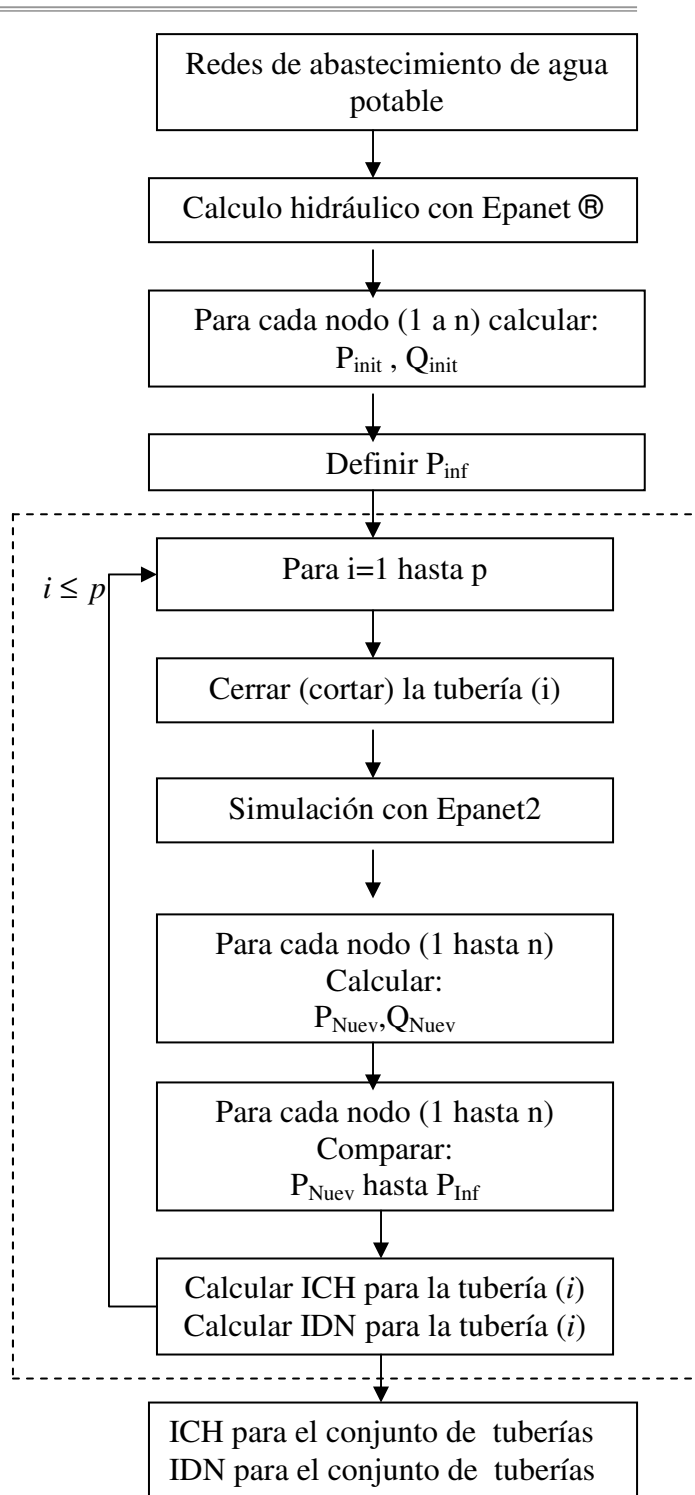


Figura 3. 6 Calculo del índice de fiabilidad hidráulica

---

---

## 9 Conclusiones

Se ha definido en el curso de este capítulo un conjunto de nociones que permiten comprender el funcionamiento de la red, funcionamiento que es descrito con la ayuda de un modelo hidráulico. El modelo hidráulico debe tener en cuenta un conjunto de parámetros y criterios para traducir escrupulosamente las características y el funcionamiento de la red tal como existe en realidad. Es indispensable encontrar un nivel de detalle adecuado en el que permite estudiar el deterioro estructural e hidráulico de la red.

Introducimos la noción de fiabilidad hidráulica, que traduce la capacidad de la red en la que hay que paliar una deficiencia de presión, debido a la ocurrencia de un fallo o al deterioro estructural. El análisis de la literatura muestra que la fiabilidad hidráulica depende no sólo de los niveles de presión, sino también de las características de las tuberías (rugosidad, diámetro, etcétera), de la topología de la red y la satisfacción de los abonados. Estos criterios determinan el funcionamiento de la red y deben ser tomados en consideración en la toma de decisiones en materia de renovación.

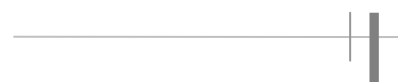
Se han presentado los modelos y los índices identificados en la literatura, para la medida de la fiabilidad hidráulica. Esto ha permitido definir una aproximación más flexible para la medida de índices de fiabilidad adaptados. Los índices propuestos permiten identificar las tuberías que desempeñan un papel importante en el suministro de los abonados. Estas tuberías requieren una atención particular de trabajos de renovación, y serán prioritarias con relación a otras tuberías.

# Capítulo 4

---

## **Factores de Influencia y los Modelos de Ayuda a la Decisión**





---

---

## 1 Factores de influencia en los fallos de las tuberías

Las causas de los fallos de tuberías han sido identificadas por varios autores (Morris, 1967; Shamir y Howard, 1979; Kelly y O'Day, 1982; Goulter y Kazemi, 1988). Han sido identificados y detallados una gran variedad de factores de influencia, que causan o provocan los fallos en las tuberías. Morris (1967) sugirió una serie de posibles causas principales en la roturas de las tuberías en los sistemas de distribución de agua, pero subrayó que "*la causa de las roturas en las redes de distribución de agua no siempre puede determinarse*".

Abordaremos de una manera general las diversas causas con un enfoque práctico. Mosevoll (1994) realiza una detallada descripción de las causas de los fallos de las tuberías para los materiales más comunes, utilizados en el abastecimiento de agua. En la literatura, la atención se centra principalmente en las deficiencias en las tuberías de fundición gris y tuberías de fundición dúctil, ya que estos materiales han sido utilizados en el pasado con una mayor frecuencia. Existe sin embargo, una tendencia creciente en el uso de materiales plásticos (PVC y PE), en el futuro cabe esperar una mayor ocurrencia de fallos en estas tuberías debido al envejecimiento.

Las variables más importantes que describen el deterioro estructural de las conducciones, y por ende, de las redes de abastecimiento de agua, pueden agruparse en cuatro categorías.

- ⇒ Variables estructurales o físicas.
- ⇒ Variables ambientales o externas.
- ⇒ Variables hidráulicas o internas.
- ⇒ Variables de mantenimiento (Rostum *et al.* 1997).

En la revisión de la literatura se ha encontrado una serie de clasificaciones y agrupaciones de los criterios o factores de influencia que provocan los fallos en las tuberías. Aquí se muestran dos de las clasificaciones que se consideran mas generales y a la vez, más completas, a saber: la clasificación realizada por Rostum (2000) y la clasificación realizada por Stone *et al.* (2002) para la EPA.

En la siguiente tabla 4.1, se muestran los factores de influencia en el deterioro estructural en las redes de distribución de agua (adaptada de Rostum, 2000).

<b>Variables estructurales</b>	<b>Variables ambientales/externas</b>	<b>Variables internas</b>	<b>Variables de mantenimiento</b>
Localización de la tubería	Tipo de suelo	Velocidad del agua	Fecha del fallo
Diámetro	Carga del suelo	Presión del agua	Fecha de reparación
longitud	Nivel freático	Calidad del agua	Localización del fallo
Año de construcción del material	Condiciones de la cama o plantilla	Fenómenos transitorios	Tipo de fallo
Método de unión	Índice de fugas	Corrosión interna	Historial de fallos previos
Protección interna	Temperatura		
Protección externa	Corrosión externa		
Clase de la presión	Otras redes		
Espesor de las paredes			
Profundidad de la tubería			

*Tabla 4.1 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Rostum, 2000).*

En la clasificación realizada por Stone *et al.* (2002) para la EPA se considera la edad y la temperatura de la tubería, la temperatura y el contenido de humedad del suelo, y también los defectos de la tubería observada. Por otra parte los factores dependientes del tiempo que pueden influir en el índice de roturas de tuberías enterradas, y pueden ser clasificados como dependientes de la presión o estadísticos<sup>1</sup>. La clasificación de Stone *et al.* (2002) se muestra en la tabla 4.2.

Como se ha mencionado, existen un numero considerable de trabajos sobre la forma de abordar y clasificar los factores que influyen en el índice de rotura de las tuberías de las redes de distribución de agua potable, de entre los cuales mencionamos algunos, así como la estructura que siguen algunos modelos para valorar el papel de los factores de influencia en el índice de roturas en las tuberías, como en el modelo desarrollado por Stephens (Earth Tech) y Jackson (OWASA) en 2003 para Orange Water and Sewer Authority (OWASA), North Carolina (EEUU), cuya clasificación de los factores de influencia se muestra la tabla 4.3:

<sup>1</sup> Kleiner y Rajani. Consideración de los factores dependientes del tiempo en la predicción estadística en las roturas de sistemas de agua. Ottawa, Ontario, Canada: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, American Water Works Association Research Foundation (AWWARF), Baltimore, MD. 2000.



<b>Categorización de los factores de influencia en el índice de fallos de roturas</b>	<b>Factores</b>
<b>Factores de la sección de las tuberías</b>	Material de las tuberías
	Diámetro de las tuberías
	Tipo de unión
	Edad de la tubería
	Profundidad de instalación de la tubería
	Condición de la tubería (espesor de las paredes, defectos, etcétera)
<b>Factores de operación y mantenimiento</b>	Presión de operación
	Naturaleza de la operación y mantenimiento (inspección con cámaras, limpieza de tuberías, protección catódica, etcétera)
	Naturaleza y dato del ultimo fallo (tipo causa, severidad)
	Naturaleza y datos de las ultimas reparaciones (tipo, longitud)
	Calidad del agua
	Métodos de construcción (tipo de relleno)
<b>Factores medioambientales y del clima</b>	Tipo de suelo
	Temperatura del suelo o profundidad de congelación
	Lluvia
	Contenido de humedad del suelo
	temperatura
	Tráfico y cargas

*Tabla 4. 2 Factores de influencia en el índice de fallos de roturas (adaptado de Stone et al., para EPA 2002)*

Condiciones específicas	Diámetro Material Edad Longitud
Condiciones físicas	Corrosión interna Corrosión externa Rugosidad
Historial de las reparaciones	Localización y datos de roturas y fugas Tipo de reparación
Calidad del agua trasegada	Localización Tipo (color, olor) Fecha del reporte
Características del sistema de distribución	Presión estática Presión dinámica Flujo en bocas contra incendios Velocidad teórica Perdidas de carga teóricas
Condiciones del suelo	pH Resistividad Sulfatos Cloruros
Planes en nuevas construcciones	Proyectos de telefonía, gas, electricidad, etcétera. Construcción de nuevos viales Construcciones de autovías Reasfaltado de avenidas

*Tabla 4. 3 Clasificación de factores tomada de Stephens y Jackson (2003).*

Para su evaluación, los factores previamente descritos se agrupan dentro de criterios que permiten elaborar un modelo basado en el nivel de servicio, siendo los criterios incluidos los siguientes:

- Edad
- Roturas y fugas
- Calidad del agua
- Importancia de las tuberías en la red
- Funcionamiento hidráulico
- Corrosión
- Material
- Presión
- Impacto de los fallos sobre abonados críticos

Una vez que se ha realizado la agrupación de los factores según los criterios, se asigna un factor de peso en un rango de 1 a 5, siendo el número 5 el valor mayor. Los factores de peso de cada criterio quedan a la consideración de la dirección y los técnicos de OWASA, por lo que pueden modificarse según las necesidades del momento a la hora de tomar las decisiones. Esta es, en síntesis, la descripción del modelo planteado.

Otro interesante trabajo es el realizado por Leng y Pratti (2002) para Seattle Public Utilities. En este caso, el trabajo se centra en la estructuración de un modelo en tres módulos, a saber: modelo de deterioro, modelo de vulnerabilidad y modelo de criticidad. Cada uno de estos modelos toma en consideración los factores descritos en la siguiente tabla.

<b>Modelos de deterioro</b>	<b>Modelos de vulnerabilidad</b>	<b>Modelos de criticidad</b>
Longitud de la tubería	Corrosividad del suelo	Si la conexión esta conectada con:
Diámetro	Corrosión de la protección	• Hospitales
Presión estadística de la tubería	Material de la tubería	• Instalaciones médicas
Material	Edad de la tubería	• Escuelas
Edad	Tipo de cama en la zanja	• Centros comunitarios
		• Usuarios de consumos considerables

*Tabla 4. 4 Factores de influencia considerados en cada uno de los modelos (Leng y Pratti, 2002)*

Los tres modelos están asociados a sistemas de información geográfica y en el análisis de la relación espacial entre las tuberías.

El modelo de deterioro se deriva de un análisis estadístico, del historial de fugas en las tuberías y de cómo se correlacionan estos eventos con los parámetros asociados a cada tubería, como por ejemplo, la longitud de la tubería, edad, diámetro, la presión de servicio, material, etcétera. Como resultado del análisis estadístico se calcula la probabilidad de fallo en las tuberías.

Los modelos de vulnerabilidad y criticidad están basados en una serie de parámetros, que pueden ser seleccionados y clasificados para evaluar subjetivamente la criticidad o vulnerabilidad de las tuberías, a través de factores de peso. Estos dos modelos proporcionarán la respuesta a preguntas como "*¿Cuáles son las tuberías que necesitan ser rehabilitadas o sustituidas, y que afectación tendrá la red en el caso de que se produzca una rotura?*".

Los parámetros de vulnerabilidad incluyen la corrosividad del suelo, protección contra la corrosión, material de tubería, la edad de la tubería, etcétera.

La aplicación puede ser utilizada para clasificar las tuberías, que deben de mejorar su

---

---

funcionamiento, dar prioridad a las tuberías que requieren de protección contra la corrosión o tuberías cuya rehabilitación puede mejorar la fiabilidad del servicio. Esta flexibilidad se logra al permitir a los usuarios crear "sesiones" que se adaptan a un determinado punto de interés. Con cada nuevo período de sesiones, el usuario será capaz de seleccionar los modelos a utilizar para evaluar las tuberías y dentro de cada modelo, el usuario puede seleccionar los parámetros que desea utilizar. Todas las contribuciones recibidas y la información generada dentro de un "período de sesiones" creada por un usuario, está a disposición de otros usuarios que requieren revisar los resultados. Este modelo está basado en análisis estadístico de la historia de las tuberías y su correlación con los parámetros asociados con las roturas parámetros.

## **1.1 Indicadores estructurales**

Estos indicadores están íntimamente ligados con el resultado de las condiciones físicas y estructurales (Stephens *et al.* 2003), son una importante entrada de datos en los modelos de deterioro, aunque desafortunadamente en ocasiones, no es posible utilizarlos debido a la carencia de información respecto a las condiciones físicas de las tuberías o en el entorno de las mismas.

### **1.1.1 La edad y el periodo de instalación**

Las tuberías instaladas en diferentes periodos muestran distintas características en lo referente a los fallos. Dichas características son más dependientes de la práctica de la construcción o proceso de instalación para cada periodo, que del tiempo que ha pasado desde su instalación (edad de la tubería). Las tuberías instaladas en determinados períodos presentan una mayor tasa de rotura que en otros (Andreou *et al.* 1987b; Mosevoll, 1994). En algunos casos, las tuberías de mayor edad son más resistentes al fallo, que las tuberías de menor edad. Para las tuberías de fundición gris, esto puede explicarse por la reducción del espesor de las paredes, conseguida con los nuevos métodos de fundición. El papel y la importancia del relleno de la zanja en el tiempo de vida de la tubería, no fue considerada hasta la década de 1930.

Las técnicas de unión o junteo de las tuberías han mejorado a lo largo de los años, permitiendo cada vez mayores deflexiones. En el período de desarrollo posterior a la II Guerra Mundial, el auge de la construcción de viviendas en la década de los 50 y los 60, dio paso a una desatención de la calidad constructiva frente a la cantidad. En lo referente a las construcciones de sistemas de tuberías, esta época se caracterizó por las malas prácticas en la aplicación del lecho o cama de la tubería en la zanja, así como en una deficiente calidad de la mano de obra (Mosevoll, 1994; Sundahl, 1997). Andreou *et al.* (1987b) reportan una tendencia de un mejor funcionamiento de las tuberías que fallaron en los primeros periodos de vida, que las tuberías que han fallado en períodos posteriores a los primeros periodos de vida.

Wengström (1993a) afirmó que los registros de fallos en las tuberías no ponen de manifiesto la dependencia de la edad con los fallos, concluyendo que las estrategias de reparación podrían ocultar la relación entre la edad y la tasa de fallos. Por ejemplo, algunas tuberías siguen en servicio después de más de cuatro reparaciones aproximadamente. Goulter y Kazemi (1988) también concluyen que la edad no debe ser el único parámetro utilizado para evaluar la condición de tuberías.

---

La mayor parte de modelos de rehabilitación están centrados en el envejecimiento de las tuberías, de modo que a mayor edad se presupone que necesitarán más mantenimiento y un mayor número de reparaciones. Por este motivo, muchos planes de rehabilitación están basados u orientados únicamente por la edad de las tuberías (Alonso *et al.* 2008). Diversas investigaciones realizadas en Estados Unidos y en Europa, demuestran que la edad de la tubería es un factor significativo pero no exclusivo en la tasa de fallos de las tuberías. Otros factores tales como las condiciones ambientales, el diámetro y la localización de las tuberías contribuyen notablemente en la ocurrencia de fallos.

Además de lo anterior, existen diversos estudios previos (O'Day *et al.* 1984; Ciottoni, 1985) que indican, en contra de lo esperado, una baja correlación entre la incidencia de fallos en las tuberías y su edad. En Boxall *et al.* (2007) se sugiere que la edad de la tubería es un indicador endeble, si se considera de forma exclusiva, de la necesidad para el reemplazo o rehabilitación de la tubería. Herbert (1994) valoró la utilidad de la edad como una medida indicativa de la necesidad de rehabilitación, pero concluyó que, para poder realizar una evaluación precisa, este factor debe ser utilizado en combinación con el conocimiento de la condición actual de la red y sus puntos débiles. También es habitual encontrar tuberías que han cumplido sobradamente su ciclo de vida útil y sin embargo, siguen proporcionando un servicio satisfactorio.

Otros estudios muestran que la edad de las tuberías puede ser, por sí sola, un indicador adecuado de la probabilidad de fallos, como por ejemplo Kettler y Goulter (1985), encuentran una fuerte correlación entre la edad y la tasa de fallo en las tuberías de amianto-cemento; Pascal y Revol (1994) también concluyen en un estudio sobre las tuberías de fundición, que la tasa de roturas se incrementa con la edad de las tuberías.

### **1.1.2 Número de roturas previas**

El historial de fallos de una tubería es un factor importante para la predicción de fallos futuros (Walski y Pelliccia, 1982). Por ejemplo, Andreou (1986) estudió las roturas en las tuberías de una red de distribución, mediante un modelo de riesgos proporcionales y encontró que tras cada rotura, la tasa de fallos de una tubería se incrementa, hasta la tercera rotura, tras la cual la tasa de fallos permanece constante, aunque con un valor ya muy elevado. El número previo de roturas previo se considera un factor significativo en la función de riesgo de de rotura en las tuberías. Eisenbeis (1994) observo un patrón similar.

Goulter y Kanzemi (1988) observaron la agrupación temporal y espacial de las roturas de redes de distribución de agua, indicando que un incremento previo en las roturas aumenta la probabilidad de futuras roturas en las proximidades de las roturas. Aproximadamente el 60% de todas las roturas subsecuentes ocurren dentro de los tres meses de las roturas previas. Ello sugiere que las subsecuentes roturas, son causadas por los daños durante la operación de las reparaciones.

Varios factores que no están relacionados con actividades en la reparación de roturas, también son responsables de la agrupación de las roturas en la red. Las tuberías que se encuentran en la misma localización geográfica o espacial, frecuentemente tienen la misma edad y los mismos materiales, se instalaron con el mismo método de unión.

---

También es probable que fueran expuestas a las mismas condiciones de corrosión interna y externa.

Las condiciones iniciales estructurales de las tuberías pueden ser representadas por el número previo de roturas. Muchas investigaciones (Eisenbeis, 1994; Gustafson y Clancy, 1999) han mostrado que el patrón de roturas depende del número previo de roturas que la tubería ha experimentado. Investigaciones como la realizada por (Clark *et al.* 1989) mostraron que, generalmente, cada vez que una tubería es reparada, el tiempo de la próxima reparación es cada vez mas corto. Ellos encontraron que después del primer fallo, el número de eventos de fallos se incrementa exponencialmente con el tiempo, utilizando análisis de regresión. De forma similar, en un estudio enfocado a tuberías de diámetros grandes mayores de 200 mm de diámetro, Andreou y Marks (1987b) encuentran que el tiempo de la próxima rotura, decrece después de cada rotura ocurrida. El resultado de estos análisis mostró que el índice de deterioro fue mayor para tuberías en condiciones iniciales malas.

### **1.1.3 Corrosión**

La corrosión es una de las principales razones para el reemplazo de las tuberías (Raestad, 1995). La corrosión interna y externa causa degradación en las tuberías de fundición gris, hierro dúctil y acero (Mosevoll, 1994). La corrosión interna depende del agua trasegada (por ejemplo el pH, alcalinidad, bacterias, contenido de oxígeno, etcétera) y la corrosión externa depende del entorno que rodea a la tubería (por ejemplo las características del suelo, humedad del suelo, aireación del mismo, etcétera). Kaara (1984) argumentó que la corrosión externa es un factor importante para incorporar en los modelos de predicción, que debe ser considerado por su intensidad, a diferencia de la corrosión interna, la cual variará dependiendo de las condiciones de la tubería y del suelo.

### **1.1.4 Diámetro**

Parece que hay un acuerdo total en la literatura que el mayor número de fallos se encuentran en las tuberías con diámetros pequeños (Andreou, 1986; Eisenbeis, 1994). Tuberías con diámetros inferiores o iguales a 200 mm tienen gran número de fallos. La frecuencia elevada de fallos en las tuberías de diámetros pequeños se explica por la disminución de la resistencia de las tuberías, la reducción de espesor de la pared, y las diferentes normas de construcción para la unión de tuberías pequeñas, las cuales las hacen menos fiables (Wengstrom, 1993b). Otra razón podría ser la baja velocidad en tuberías más pequeñas, resultando asentamientos de materiales en suspensión del agua, creando un buen entorno para el crecimiento bacteriano.

### **1.1.5 Longitud de la tubería**

La longitud de la tubería difiere de una tubería a otra tubería dentro de una red de distribución. Para tuberías largas (por ejemplo mayores de 1000 m) las condiciones externas como las condiciones del suelo y el tráfico puede variar a lo largo de la tubería. Rostum *et al.* (1997) recomendó longitudes de tubería en el orden de 100 metros con el fin de evitar condiciones diferentes para la misma tubería. Andreou (1986) consideró que la función de riesgo es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la

---

---

longitud. Similares resultados fueron obtenidos por Eisenbeis (1994), Lei (1997) y Eisenbeis *et al.* (1999).

### **1.1.6 Material de la tubería**

Muchos sistemas de agua están constituidos principalmente por tuberías de hierro fundido (es decir, fundición gris y fundición dúctil) y existen un amplio registro de fallos para estas tuberías. Muchos investigadores se han centrado en las tuberías de fundición gris (Andreou, 1986; Goulter y Kanzemi, 1988; Eisenbeis, 1994; UtilNets, 1997). En tiempos más recientes, los nuevos materiales como el PVC y PE se han introducido a gran escala en las redes de abastecimiento de agua. El material de estas tuberías tiene características muy diferentes, y los distintos materiales deben analizarse por separado (Mosevoll, 1994). El análisis estadístico de las tuberías de PVC y PE es el centro de estudios recientes (Eisenbeis *et al.* 1999). En un estudio realizado por Sundahl (1996) en Suecia, el índice de rotura más alto se observó en las tuberías de fundición gris y tuberías de PVC.

### **1.2 Variaciones temporales**

Es muy común para muchas redes de distribución de agua que se presente un patrón estacional con mayor número de fallos durante el invierno (Eisenbeis, 1994; Saegrov *et al.* 1999). Andreou (1986) encontró que las tuberías de diámetro más pequeño (menos de 200 mm) tienen mayores tasas de rotura en el invierno. Sundahl (1997) analizó cinco redes de abastecimiento de agua en Suecia. El número de roturas fue correlacionado con la temperatura del aire, pero no se encontró correlación a la precipitación y el grosor o altura de la nieve. En Trondheim, la mayoría de los fallos se presentan en la temporada de verano, a pesar de la carga de helada esperada en tiempo de invierno debido al clima frío (Rostum, 1997).

Esto se explica debido a un intenso programa de control de fugas que se llevó a cabo en la temporada de verano, detectando un gran número de incidencias de corrosión externa en tuberías de fundición dúctil desprotegidas. Wengstrom (1993a) analizó un sistema sueco de redes de abastecimiento de agua, y observó un alto índice de rotura en las tuberías de fundición dúctil durante el verano, pero un alto índice de roturas durante el invierno para tuberías de fundición gris. El autor llegó a la conclusión de que esto podría acabar modificando las tasas de rotura estacionales, a medida que más tuberías de fundición dúctil son utilizadas.

Saegrov *et al.* (1999) observaron un máximo en el índice de roturas tanto en invierno como en verano, en el Reino Unido. El máximo índice de verano se atribuyó al secado o deshidratación y posterior contracción de los suelos de arcilla. Mientras que el registro máximo de invierno, puede haber sido causado por las heladas o por los efectos de contracción térmica. Además, la tasa anual de rotura a lo largo de un período de diez años, se consideró relacionada con la media anual de temperatura durante el día y en relación inversa al total de precipitaciones anuales.

Los efectos climáticos pueden ser utilizados en una etapa preliminar, a fin de determinar su influencia de los fallos en las tuberías. Sin embargo, para la predicción de fallos futuros, no es fácil incluir los efectos climáticos como covariable en el tiempo, puesto que la evolución de estos factores es desconocida. Sundahl (1997) en su tesis trató de modelar las variaciones estacionales en las fugas utilizando una curva senoidal. Desde

---

---

el punto de vista del administrador de la red, la existencia de variaciones estacionales en los fallos de las tuberías, podría ser útil para la planificación/ organización diaria de la gestión de la redes de distribución de agua. Sin embargo, al calcular las necesidades futuras para la rehabilitación y la priorización entre las tuberías, tiene menos utilidad conocer la fecha exacta del fallo.

### **1.2.1 Condiciones del suelo**

Las condiciones del suelo afectan a los índices de corrosión externa, y desempeñan un papel importante en la degradación de la tubería. Clark *et al.* (1982) utilizaron la presencia de ambientes corrosivos del suelo en sus análisis de fallos en las tuberías, pero encontraron una baja correlación entre la longitud de la tubería instalada en ambientes corrosivos y las roturas. Malandain *et al.* (1998) utilizaron sistemas de información geográfica, relacionando las condiciones del suelo con el índice de rotura en la red de distribución de agua en la ciudad de Lyon, Francia. Eisenbeis (1994) utilizó la condición del terreno (definida como la presencia o ausencia de corrosión en del suelo), como una variable explicativa en el análisis de fallos de tuberías.

### **1.2.2 Proximidad en las excavaciones**

Las excavaciones en las proximidades de tuberías afectan las condiciones de la cama, resultando en el fallo de las tuberías. La investigación en el Reino Unido (CMR, 1998) muestra que los trabajos en los servicios adyacentes (por ejemplo, gas, electricidad, etcétera) puede causar el fallo de las tuberías.

### **1.2.3 Presión**

La presión hidrostática del agua y los aumentos repentinos de presión en un sistema de distribución, pueden afectar al fallo de las tuberías. Los aumentos repentinos de presión pueden ocurrir cuando las válvulas se abren y se cierran durante las operaciones en la red de distribución de agua. Estos aumentos repentinos pueden ser uno de los factores de fallo en agrupaciones de tuberías, dependiendo de las válvulas que están cerradas y abiertas durante las actividades de reparación. Andreou (1986) encontró que la presión hidrostática es un factor significativo cuando se realiza la modelación de fallos, pero la importancia de esta variable se consideró baja. Clark *et al.* (1982) utilizaron tanto la presión absoluta como la presión diferencial (incremento) en el modelado del tiempo hasta el primer fallo.

### **1.2.4 Uso del suelo**

El uso del suelo (por ejemplo, áreas de tráfico, zonas residenciales y áreas comerciales) se utiliza como un sustituto de cargas externas en las tuberías. Eisenbeis (1994, 1997) utiliza el uso del suelo sobre la tubería (es decir, sin tráfico vs tráfico pesado), como una variable en los modelos de fallos.

## **1.3 Fiabilidad de las redes de distribución de agua**

Las redes de distribución de agua son tradicionalmente diseñadas con el objetivo de que sean completamente fiables. Sin embargo, la creciente escasez de fondos públicos para la construcción, el mantenimiento y la avanzada edad de muchos sistemas de



abastecimiento de agua, hacen que los gestores de los sistemas de abastecimiento se centren en el análisis de fiabilidad de dichos sistemas. La fiabilidad de un sistema, de acuerdo con la norma ISO 8402 (Hoyland y Rausand, 1994) se define como la capacidad del sistema para realizar una función requerida, bajo condiciones operativas, medio ambientales y para un estado de período de tiempo dado.

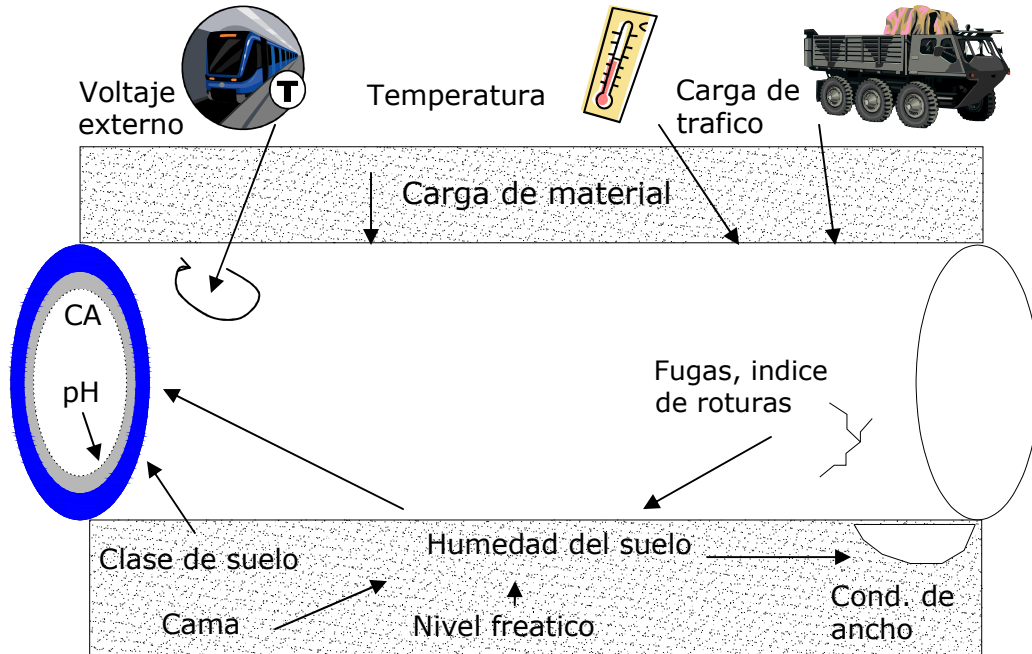


Figura 4.1.-Cargas en las tuberías utilizada en UtilNets (adaptada de Preston et al., 1999).

Los modelos de fiabilidad se han adoptado en otros ámbitos relacionados con las redes (por ejemplo, suministro de energía eléctrica, ingeniería informática, etcétera). Algunos de estos enfoques puede resultar útil para el análisis de redes de distribución de agua, aunque hay que tener en cuenta las diferentes leyes físicas que gobiernan el flujo en las distintas redes, así como los distintos efectos que tienen los fallos en estas redes. El análisis de fiabilidad de los sistemas de distribución de agua deben incluir los modelos de la red hidráulica.

Los análisis de los sistemas en anillo, comunes a las redes de abastecimiento de agua, son más complejos que los tradicionales análisis de la fiabilidad mecánica, donde se tiene en cuenta la fiabilidad de una sola línea entre la fuente y el suministro. Los modelos de las redes hidráulicas permiten el análisis de las dos rutas de abastecimiento alternativo, y la capacidad hidráulica de estas rutas. La fiabilidad mecánica corresponde a un límite superior para estimar la verdadera fiabilidad hidráulica de la red.

La fiabilidad de las redes de distribución se mide en referencia a la tasa de fallos. El fallo puede ser de tipo físico (por ejemplo, roturas o fugas). La fiabilidad de la red podrá ser interpretada como la probabilidad de que todos los puntos de demanda estén conectados a la fuente de abastecimiento. Esto, algunas veces se conoce como la definición de *conectividad* (Wagner et al. 1988a). Los resultados de la conectividad asociada a la fiabilidad se materializan en un valor único de la fiabilidad para toda la red y debe utilizarse a la hora de diseñar los nuevos sistemas (Quimpo, 1996).

---

---

La fiabilidad también puede ser definida como la probabilidad de que un determinado punto de demanda está conectado a la fuente. A pesar de que exista una ruta en pleno funcionamiento entre una fuente de suministro y un nodo de la demanda, la demanda de nodo puede no recibir el agua si no hay suficiente presión en la red. Esta definición es a veces denominada como *accesibilidad*. Según Quimpo (1996) la definición de accesibilidad es adecuada como una medida de fiabilidad en la optimización del mantenimiento. Tanto la conectividad y la accesibilidad deben considerarse en cualquier análisis de fiabilidad de redes de distribución de agua.

La mayoría de las investigaciones publicadas se ha concentrado en el análisis y proceso de toma de decisiones para mejorar la fiabilidad mecánica de una red de distribución de agua. La investigación sobre la inclusión de la capacidad en el análisis de fiabilidad, entre otras cosas ha sido llevada a cabo por Wagner *et al.* (1988a, b), Wu *et al.* (1993), Schneider *et al.* (1996) y Hansen y Vatn (2000).

Los métodos utilizados para analizar la fiabilidad de las redes de distribución de agua se pueden dividir en dos grupos: las simulaciones (por ejemplo, Monte Carlo) o los métodos de análisis (por ejemplo, conjuntos de corte). El principio básico detrás de los métodos analíticos, es transformar la topología de los sistemas en un modelo que considere sólo estructuras en serie y en paralelo.

Wagner *et al.* (1988a, b) proponen un modelo de simulación de la fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua en las redes, que se centra en los fallos de las tuberías y las bombas. El programa de simulación se divide en dos partes, una sección de simulación de fallos, que genera eventos de fallos y reparación de acuerdo a determinadas distribuciones de probabilidad (por ejemplo, la simulación Monte Carlo). En segundo lugar cuenta con una parte de simulación hidráulica, que calcula los flujos a través de la red y las presiones en cada nodo, para una demanda específica y un fallo en el sistema, ya sea parcial o total.

Los datos de los fallos de la tubería se generan sobre la base de una distribución exponencial. Los autores definen tres estados de operación para cada nodo, a saber: "normal" en el que la demanda es plenamente suministrada, "servicio reducido" en la que la presión cae por debajo de un valor umbral, pero sigue estando por encima de un valor mínimo y un "modo de fallo" en que la presión cae por debajo de un mínimo determinado y el suministro no es asegurado.

Del mismo modo, se definen tres estados de funcionamiento para todo el sistema: "Normal" se define como el estado del sistema cuando todos los nodos están funcionando normalmente; el estado de "fallo" se produce cuando uno o más nodos se encuentran en modo de fallo; finalmente, el sistema se considera en "modo reducido" cuando uno o más nodos están en un estado de los servicios reducidos, pero los nodos no se encuentran en un estado de fallo. Durante un período de sesiones de simulación, varios resultados son continuamente registrados. Considerando los eventos y el tiempo de duración en el que cada nodo está en cualquier modalidad de operación, así como el déficit de la demanda total, se calculan las estadísticas necesarias y se computan.

Quimpo y Shamsi (1991) utiliza la distribución exponencial al describir el índice de rotura para cada tubería, a fin de estimar la fiabilidad de la red de abastecimiento de

---

agua. Este modelo de fiabilidad utiliza el mínimo camino establecido para calcular la fiabilidad del sistema. Su enfoque incluye una simulación hidráulica para la determinación del flujo a través de todas las tuberías. La representación gráfica de las áreas de fiabilidad (es decir, las líneas de contorno con igual valor de las fiabilidades o isovalores) se utiliza para visualizar los resultados.

La fiabilidad del modelo se utiliza como una herramienta para la asignación de prioridad a las actividades de mantenimiento, sobre la base de un nivel predefinido de confiabilidad aceptable. Los puntos bajos en la gráfica de fiabilidad son inaceptables. Las tuberías localizadas en estas zonas se identifican como candidatos prioritarios para el mantenimiento preventivo o para la sustitución. El método de deficiencia de Quimpo y Shamsi (1991) considera que la función de fiabilidad desarrollada en el análisis, se basa únicamente en la conectividad entre un punto de demanda de una fuente de suministro. La capacidad hidráulica (accesibilidad) no se considera.

Wu *et al.* (1993) enfocan el problema de cuantificar la fiabilidad de las redes de distribución de agua, en base de la conectividad de los puntos de demanda a la fuente de distribución. Los autores introducen la capacidad de un índice ponderado que tenga en cuenta la satisfacción parcial de la demanda, además de un método con un camino mínimo o ruta mas corta para calcular la conectividad desde la fuente a un punto en la red. La capacidad de cada ruta se calcula, y por ende, la capacidad de cada ruta para transportar el flujo requerido para el nodo de la demanda. La fiabilidad de cada tubería es asumida que es conocida y constante. Wu *et al.* (1993) concluyen que la adición del modelo de la capacidad hidráulica sería la medida de la fiabilidad más realista.

En un análisis de fiabilidad de la red, llevada a cabo en la red de agua en la ciudad de Trondheim (Vatn y Tveit, 1997), sólo se utilizaron estimaciones aproximadas de la disponibilidad de la tubería. El estudio considero sólo la fiabilidad mecánica, mientras que la fiabilidad hidráulica no se incluyó en el análisis.

Camarinopoulos *et al.* (1996b) han desarrollado un instrumento para medir la fiabilidad de las redes de abastecimiento de agua. Se considera tanto la probabilidad de que un punto de demanda esté conectado a una fuente (conectividad), como la probabilidad de que el sistema podría cumplir con un determinado nivel de flujo, en cada punto de demanda (capacidad). El método de corte mínimo se utiliza para resolver el problema de conectividad, habiendo aplicado este método a grandes redes de carácter real. Camarinopoulos *et al.* (1996b) no utiliza un simulador hidráulico de flujo para el cálculo de la fiabilidad. Su método para medir la fiabilidad se incluyo dentro el sistema de apoyo a las decisiones UtilNets (1997) como un módulo de la confiabilidad de la red.

Walski (1993) señaló la importancia de la ubicación de las válvulas a la hora de evaluar la fiabilidad de las redes de distribución de agua, con el argumento de que una descripción del sistema de válvulas, proporciona una mejor representación de la fiabilidad más que el vínculo-nodo del enfoque utilizado normalmente. Walski introdujo el concepto de segmento (por ejemplo, la agrupación de las tuberías) para describir la parte de una red de distribución de agua, que puede ser aislada por el cierre de válvulas.

Hansen y Vatn (2000) combinan un modelo hidrostático, con un modelo de fiabilidad de la red de agua potable, para calcular la capacidad de una red para abastecer el punto de demanda con cantidades suficientes de agua. El simulador de EPANET desarrollado

---

---

por la división de investigación de agua potable de la EPA de los EE.UU., es utilizado para los diversos escenarios de simulaciones hidráulicas. Una herramienta de software llamado AQUAREL se desarrolló para llevar a cabo los cálculos. Su método utiliza diferentes módulos para reducir los tiempos de cálculo.

Esto implica la elaboración de modelos de la red de distribución de agua en dos fases o etapas. En la primera fase se conforma un modelo global, en el que se definen los nodos en la red de manera general donde se identifican posibles zonas de fuga. En la segunda fase, cada zona es modelada en detalle. La red de distribución de agua en Trondheim (Noruega) se utiliza como un caso de estudio. Al igual que otros análisis de la confiabilidad de la red, el modelo requiere la disponibilidad de datos para cada elemento tales como tuberías, bombas y válvulas, disponibilidad de datos, etcétera.

## **2 Modelos para la renovación de redes de agua (RAP)**

Los modelos para la renovación de las redes de agua potable dependen de los criterios tomados en consideración en el proceso de toma de decisiones. Describimos en este capítulo un conjunto de modelos y de aproximaciones, con el fin de identificar un paso coherente en la identificación de los trabajos de renovación y la programación en el tiempo. El análisis que efectuamos lleva principalmente sobre los criterios tomados en consideración, los métodos y las aproximaciones de jerarquización de las tuberías de la red, el estudio del deterioro hidráulico y, por fin, los métodos de optimización utilizados. Se trata, en el curso de este capítulo, de describir los lazos entre los puntos mencionados y su coordinación. El interés es comprender cómo son tomados en consideración en la construcción de modelos de ayuda a la decisión, que se describen a continuación.

Las aproximaciones de ayuda a la decisión son presentadas en la literatura con arreglo a la naturaleza de instrumentos matemáticos utilizados, los datos considerados y la toma en consideración del funcionamiento hidráulico de la red. Kleiner y Rajani (2001) identifican modelos probabilísticos monovariados y multivariados. En EPA (2002) se identifican modelos que no se basan en modelos hidráulicos para la renovación, sino que presentan aproximaciones probabilísticas o estadísticas que se interesan por el fenómeno de envejecimiento de la tubería, teniendo como base una reseña histórica de fallos y de los datos del entorno, de modo que buscan definir los vencimientos de renovación a partir de aproximaciones deterministas. La búsqueda de políticas de renovación a coste mínimo y las aproximaciones o modelos que se basan en métodos heurísticos, utilizan la opinión de experto y otros métodos de ponderación de criterios, con el fin de jerarquizar las tuberías e identificar prioridades.

Proponemos establecer una tipología con arreglo al objeto de cada aproximación, haciendo una distinción entre las aproximaciones para la jerarquización de las tuberías, que permite identificar tuberías prioritarias que necesitan una renovación. Las aproximaciones permiten determinar vencimientos para la renovación, y los modelos de ayuda a la decisión (prototipos u operacionales) que sirven de ayuda para proponer programas de renovación.



---

---

### 3 Las aproximaciones para la jerarquización de las tuberías

#### 3.1 Modelos basados en la previsión de fallos

Estas aproximaciones describen el envejecimiento de la red por la estimación de los fallos futuros, a partir de datos vinculados a la tubería y a su entorno. Estos datos son tomados en consideración con la ayuda de variables explicativas, con el fin de medir su influencia sobre el proceso de deterioro de las tuberías. Los datos son recogidos desde la fecha de instalación  $t_0$  o a partir de una fecha del principio de la observación  $t_d$ , hasta la fecha de fin de observación  $t_f$ . (Ver la Figura 4.2).

Estas aproximaciones identifican las tuberías más vulnerables que necesitan una renovación, describiendo el fenómeno de envejecimiento de las tuberías.

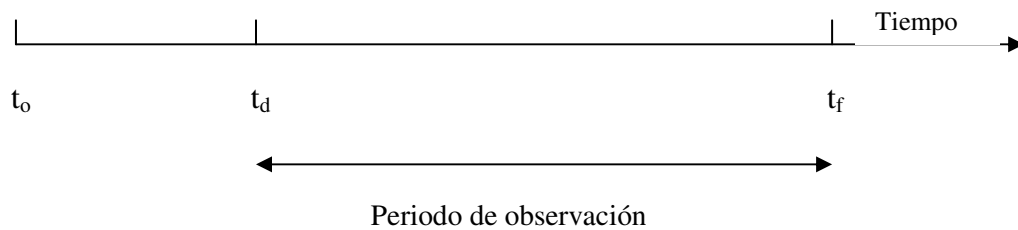


Figura 4. 2 Tiempos de la recolección de datos

#### 3.2 Modelos por cadenas de Markov

La aproximación utiliza las cadenas de Markov para describir el fenómeno de deterioro estructural de tuberías. Gofre *et al.* (2000) consideran grupos de tuberías homogéneas (el mismo diámetro, los materiales, año de colocación, etcétera), pudiendo ser obtenidas con la ayuda de una regresión de Poisson, que permite identificar la influencia de las variables explicativas (variables endógenas y exógenas a la tubería) y la aparición de fallos. Esta aproximación ha sido aplicada sobre la red RAP de una población por parte de Malandain (1999). El deterioro de la tubería necesita la descripción de los estados de degradación ( $k=1, \dots, K$ ), que serán caracterizados por una probabilidad  $P_k(t)$  de fallo en el instante  $t$ . La transición entre estados de degradación se incorpora con una función de riesgo  $h_k(t)$ , que puede ser representada por el índice de fallo de funciones exponencial ( $\lambda$ ) ó Weibull ( $\lambda, p$ ). La esperanza del índice de fallo  $FR(t)$  está dada por la expresión siguiente:

$$FR = \sum_{k=1}^K P_k(t) \cdot FR_k(t) \quad (4.1)$$

Esta aproximación necesita una descripción de los estados de deterioro de las tuberías, mediante unas inspecciones regulares y una definición de la función de transición entre estados. La caracterización de los estados de deterioro es difícil de establecer para las redes enterradas no visitables (inaccesibles). Esta aproximación se utiliza más en la gestión del infraestructura visitable: tuberías de saneamiento de diámetro importante (Abraham y Wirahadikusumah, 1999) (Kleiner, 2001), gestión de los puentes (Lounis y Vanier, 1998), autopistas, etcétera.

### 3.3 Modelos por Proceso de Poisson no homogéneo (NHPP)

Rostum (2000) aplica esta aproximación sobre la red RAP de Trondheim (Noruega), considerando que la sobrevenida del fallo sigue un proceso de Poisson no homogéneo, donde el índice de fallo  $\lambda$  es una función del tiempo (t) y de un conjunto de variables explicativas, tomadas en consideración por una covariable ( $z_k$ ) y parámetros de regresión ( $\beta_i$ ) para describir el fenómeno de deterioro. La expresión del índice de fallo es dada como sigue con, siendo  $\delta$  un parámetro de la ley:

$$\lambda(t, \beta, z) = \lambda \delta t^{\delta-1} \exp(z_k \beta) \quad (4.2)$$

La esperanza de número de fallos entre dos fechas  $t_a$  y  $t_b$  ( $t < (t_a, t_b)$ )

$$E(N(t_b) - N(t_a)) = \sum_{t_a}^{t_b} \lambda(u, \beta, z) du = \lambda(t_b^\delta - t_a^\delta) \exp(z\beta) \quad (4.3)$$

### 3.4 Modelo por análisis de supervivencia

El caso de un fallo se caracteriza por la variable aleatoria T. La distribución de probabilidad de T puede ser definida por varias funciones, y entre ellas, la función de supervivencia S(t) que corresponde a la probabilidad de tener una duración de vida superior a un tiempo t, que es:

$$\left\{ \begin{array}{l} S(t) = P(t < T), \text{ donde } t(0, +T) \end{array} \right. \quad (4.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S(t) = 1 \text{ y } \lim_{t \rightarrow +} S(t) = 0 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

La función de densidad de probabilidad.

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{-dS(t)}{dt} \quad (4.6)$$

La función de riesgo expresa la probabilidad condicional de supervivencia al tiempo T, y la sobrevenida de fallos en el intervalo [t, t+ Δt]

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t < T < t + \Delta t / T < t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (4.7)$$

Las variables explicativas que pueden ser cuantitativas o cualitativas, se toman en consideración mediante la introducción de covariables ( $z_k$ ) en la función de riesgo, que se expresa con la ayuda de una función de riesgo instantáneo  $h_0(t)$ , describiendo la evolución en el curso del tiempo y un término de regresión exponencial, que traduce el efecto de las variables explicativas. Presentamos en lo que sigue el modelo de riesgo proporcionales (Proportional Hazard Model, PHM), que ha sido aplicado a red RAP por Andreou (1986) y utilizado más tarde por Eisenbeis (1994), Arnoux (1998) y Wery (2000).

---

---

La aplicación llevada por Andreou (1986) con la ayuda de datos de fallos y de entorno de las tuberías, permitió estudiar el fenómeno de degradación de las tuberías de agua y distinguir dos estadios de degradación, el primero cualificado de "*Slow breaking stage*" y el segundo conocido como "*Fast breaking stage*". El autor determina un umbral de aceleración del proceso de deterioro correspondiente a 3 fallos, y a partir de este umbral la duración de supervivencia de una tubería disminuye más. Arnoux (1998) propone definir una duración de supervivencia crítica, que significa que una tubería se vuelve crítica si su duración de supervivencia es inferior a una duración crítica =1000 días.

La función de riesgo para el modelo PHM se expresa bajo la forma de una función de riesgos de base  $h_0(t)$  y un término exponencial que traduce las variables explicativas:

$$h(t, z_1, z_2, z_3, \dots, z_k) = h_o(t) \exp(\beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_k z_k) \quad (4.8)$$

Donde  $\beta_i$  representa los parámetros de regresión del modelo e  $i=1\dots k$  donde  $k$  es el número de variables explicativas.

#### 4 Discusión

El modelo NHPP y PHM presentan la ventaja de estudiar el deterioro de las tuberías basándose en datos recolectados sobre un periodo de observación, siendo los datos concernientes a la tubería: longitud, año de colocación, diámetro, número de fallos, naturaleza del material y siendo los datos del entorno de la tubería: ocupación o actividad del suelo, la naturaleza del suelo, el nivel de la circulación por la carretera, etcétera. Estos datos son tomados en consideración con la ayuda de las covariables en la función de riesgo. Las tuberías pueden ser jerarquizadas considerando la esperanza de los fallos futuros. Esta aproximación necesita del establecimiento de un umbral de fallos crítico para la renovación y la disponibilidad de los datos susodichos.

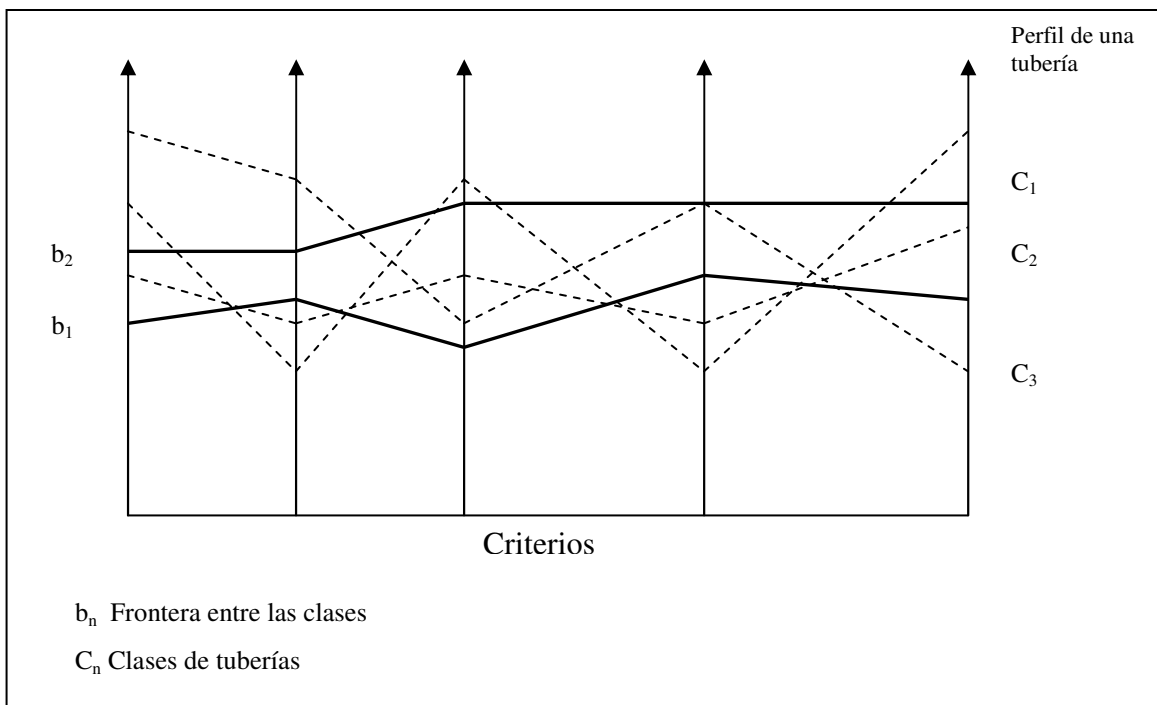
#### 5 Análisis multicriterio

La aproximación multicriterio ha sido utilizada para establecer prioridades de las necesidades en renovación (Le Gauffre *et al.* 2002a). La aproximación se basa en la noción de clasificación (Roy *et al.*, 1996) y utiliza el método ELECTRE-TRI (Mousseau *et al.* 2001). Este método procura determinar clases con arreglo a criterios precisos. Para la problemática de renovación, estas clases están representadas en las tuberías prioritarias para trabajos de renovación, basándose en criterios e indicadores de realización definidos (Le Gauffre *et al.* 2002b). Estos criterios están vinculados a:

- ⇒ A la coordinación entre los servicios que intervienen sobre la calzada (gas, electricidad, servicio de vías públicas, cable, etc.).
- ⇒ Al coste anual de reparación
- ⇒ A las pérdidas en agua y las interrupciones del servicio

- ⇒ A los daños y la molestia ocasionada: desviación de la circulación (tráfico), el daño de inundación
- ⇒ A la calidad del agua
- ⇒ A la fiabilidad hidráulica
- ⇒ A los costes de renovación
- ⇒ A la molestia que corresponde a las alternativas de renovación seleccionadas

Los autores definen clases que traducen el nivel de prioridad. Una evaluación de los criterios se efectúa para el conjunto de las tuberías, de modo que cuanto más importante es el valor del criterio, la deficiencia de la tubería es más importante. Para cada criterio, la frontera entre las clases debe ser definida por umbrales. El perfil de cada tubería es obtenido como se muestra en la figura 4.3:



*Figura 4. 3 Perfil del funcionamiento de 3 tuberías en consideración 5 criterios y 3 clases de tuberías*

La jerarquización de las tuberías se apoya en la comparación de los perfiles. La dificultad de utilización de este método reside en la determinación de los umbrales delimitados para cada clase, para el conjunto de los criterios y los umbrales de comparación de los perfiles. La agregación de criterios se efectúa con la ayuda de índices (índice de concordancia, índice de discordancia), que permiten comparar los perfiles sobre el conjunto de los criterios tomados en consideración.

Esta aproximación se apoya sobre la disponibilidad de varios índices de realización. Los modelos presentados en esta parte, procuran definir prioridades para las tuberías delante de ser objeto de trabajos de renovación, basándose en una reseña histórica de fallos y



datos sobre la tubería y su medio ambiente. Estos modelos no determinan el vencimiento de renovación, ni tampoco realizan ninguna estimación presupuestaria. La previsión se interesa por la descripción del estado de las tuberías y de la red.

## 6 El modelo de optimización de la fecha de renovación

Estos modelos procuran determinar la fecha óptima y la alternativa de renovación para una tubería dada, o en conjuntos de tuberías homogéneas susceptibles de deteriorarse del mismo modo. Se apoyan en un análisis económico de los costes de mantenimiento, los costes de renovación, los costes sociales vinculados a los impactos de los fallos, de los trabajos de renovación sobre los abonados y vecinos sobre un horizonte del tiempo definido. La comparación de estos costes permite generalmente determinar una fecha óptima de renovación. La resolución de este tipo de problemas necesita el recurso a métodos exactos o métodos no exactos (heurísticos).

## 7 Modelos de optimización con la ayuda de métodos exactos

La búsqueda de la fecha óptima de renovación trata de resolver el problema matemático definida por una o varias funciones objetivo y las correspondientes restricciones (económicas y técnicas). En lo que sigue, presentamos aproximaciones de resolución basadas en métodos exactos: búsqueda de mínimo de una función por derivación, programación dinámica y *Branch and Bound*.

### 7.1 El modelo de referencia

El modelo propuesto por Shamir y Howard (1979) está considerado como uno de los primeros modelos para la renovación, y se apoya en una regresión exponencial que describe el crecimiento de índice de fallo por km/año,  $N(t)_j$  en función del tiempo  $t$  (en años). En este caso, la hipótesis subyacente es que el fenómeno de sobrevenida del fallo sigue un proceso de Poisson.

$$N(t)_j = N(t_o)_j * e^{A_j(t+g_j)} \quad (4.9)$$

Donde  $N(t)_j$  es el número de roturas por unidad de longitud por año en el tubo  $j$  en el momento  $t$  ( $\text{km}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ );  $N(t_o)_j$  es el  $N(t)_j$  en el año de instalación del tubo  $j$  (tubo nuevo);  $t$  es el tiempo transcurrido en años;  $g_j$  es la edad inicial del tubo  $j$  (años); y  $A_j$  es el coeficiente de crecimiento de la tasa de roturas del tubo  $j$  ( $\text{años}^{-1}$ )

Shamir y Howard (1979) utilizan un modelo exponencial para analizar el coste de sustitución de las tuberías en términos del valor actual, tanto de la reparación de la rotura como la inversión del capital para la sustitución. Este análisis muestra que para determinar el tiempo de reemplazo se minimizara el coste total  $C(T)$  a través de la ecuación siguiente:

$$C(T) = C_r e^{-rt} + \int_0^T LC_b N(t_o) e^{A(t+g)e^{-rt}} dt \quad (4.10)$$

Donde  $C_b$  es el coste de una reparación en el tubo existente (\$).  $C_r$  es el coste de sustitución de la tubería (\$/km),  $T$  es el año de reemplazo de la tubería.  $L$  es la longitud de la tubería (km) y  $r$  es la tasa de descuento.

$$\text{Minimizar} \sum_{t_s}^T [C_{rep} N(t_s) e^{A(t-t_s)} \cdot e^{-at} + C_r \cdot e^{-at}] dt \quad (4.11)$$

El tiempo óptimo de reemplazo se calcula por aplicación de la primer derivada de  $C(T)$  de la ecuación 4.8. En la tubería nueva se considera que su proceso de envejecimiento es similar a la tubería reemplazada. La sustitución se efectuará periódicamente al cabo de  $T$  años. Este modelo ha sido repetido por Walski y Pellicia (1982) presentando un cálculo detallado del coste de reparación, en el que los autores identifican los costes de mano de obra, los costes de equipo, material para la reparación, el revestimiento y gastos generales vinculados a la intervención, así como la molestia ocasionada por los trabajos.

### 7.1.1 Discusión

El modelo de Shamir y Howard (1979) se revela interesante en el caso de ausencia de datos sobre el entorno de la tubería, y permite estudiar el fenómeno de envejecimiento basado en la reseña histórica de fallos. Sin embargo supone que la edad es el único factor de envejecimiento, lo que no es siempre el caso. La evaluación económica no permite tomar en consideración el funcionamiento de la red. El modelo puede aplicarse sólo sobre tuberías homogéneas. Supone que la renovación se efectúa a intervalos regulares (Período fijo), y considera que las tuberías reemplazadas sufrirán los mismos deterioros que las anteriores. La minimización de la función objetivo necesita la comprobación de la condición de continuidad y derivabilidad.

El modelo se apoya sobre hipótesis restrictivas que presentan una ventaja en ausencia de datos, pero que no pueden ser verificadas cuando se cuenta con datos sobre la condición de las tuberías y datos sobre el entorno que rodea a la tubería.

## 7.2 El Modelo MNRAP (Multistage Network Rehabilitation Analysis Procedure)

El modelo desarrollado en Kleiner (1997) se basa en una aproximación de Programación Dinámica (DP) combinada con una enumeración de escenarios. Para Kleiner (1997) la eficiencia de la red de agua potable (RAP) depende de su fiabilidad hidráulica, de la calidad del agua y del servicio otorgado a los usuarios. El modelo considera que todo cambio de una tubería en la red, engendra una nueva distribución de flujo en todo su conjunto. La previsión de los fallos y la estimación de los costes se basan sobre el modelo de Shamir y Howard (1979). El autor en la función objetivo tiene en cuenta los costes de mantenimiento de tuberías reemplazadas. Procura determinar la fecha de la primera sustitución y la periodicidad de las sustituciones que se harán a intervalos regulares, minimizando el capital invertido, los costes operacionales, los costes de mantenimiento y los costes de renovación. Kleiner (1997) considera varias

alternativas de renovación y las discrimina en función de su impacto sobre el funcionamiento hidráulico de la red y su coste. La utilización de la Programación Dinámica permite evaluar escenarios respecto a la política de renovación, que son considerados desde un punto de vista económico con la ayuda de la función objetivo mencionada, y desde un punto de vista técnico con la ayuda del software de simulación hidráulica Epanet ®.

### 7.3 Modelos de optimización por métodos de cohortes

La aproximación es utilizada desde los años 60's en el estudio de la demografía para preveer la evolución natural de la población. Herz (1996) utiliza el "Cohort Survival Model" que considera a la ayuda de índice de mortalidad, el número de supervivientes por cohortes (clases) de la misma edad. El mismo principio es aplicado sobre las diversas infraestructuras. La renovación de las infraestructuras no puede ser tratada como en el modelo demográfico. Debe ser modelado de modo que los elementos deteriorados sean reparados, rehabilitados o reemplazados por elementos nuevos. Para los elementos nuevos empieza un nuevo proceso de deterioro. Este deterioro es descrito de la misma manera que el modelo demográfico por cohortes.

El autor describe el proceso de envejecimiento a través de probabilidades de transición de un estado a otro (vivo o muerto, intacto o roto, en funcionamiento o averiado). Los índices de transición, índice de mortalidad, y el índice de fallo con la edad, depende de la utilización del material y a su funcionamiento. El modelo se apoya en la definición de una función de supervivencia, que describe el fenómeno de envejecimiento con la ayuda de tres parámetros "a" factor de envejecimiento, "b" factor de fallo y "c" período de resistencia (durante el período de resistencia, no se da paso a ninguna renovación). La función de densidad de probabilidad de vida útil es dada por las siguientes expresiones:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = 0 \quad \text{si } t < c \\ f(t) = \frac{(1+a)be^{b(t-c)}}{(a+e^{b(t-c)})^2} \quad \text{si } t > c \end{array} \right. \quad (4.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = 0 \quad \text{si } t < c \\ f(t) = \frac{(1+a)be^{b(t-c)}}{(a+e^{b(t-c)})^2} \quad \text{si } t > c \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Donde la función de supervivencia se expresa a través de la siguiente ecuación.

$$f(t) = \frac{a+1}{a+e^{b(t-c)}} \quad \text{si } t > c \quad (4.14)$$

### 7.4 Modelo de optimización *Branch and Bound*

Kim y Mays (1994) proponen una gestión de optimización de tipo *Branch and Bound*. El modelo permite encontrar un compromiso entre tres posibles decisiones: reparar, reemplazar o rehabilitar. Los autores proponen una función de coste que permita evaluar una política de renovación dada con arreglo a los costes de sustitución, de rehabilitación, de reparación y el coste de energía vinculado a la operación de bombeo. Este modelo integra también restricciones hidráulicas y utiliza un simulador hidráulico (KYPIPE) para validar las soluciones. Para cada tubería se efectúa una generación de cumbre de grafo que corresponden a las posibles decisiones que se pueden generar. Se

---

---

efectúa en cada cumbre una valoración de la función objetivo con una comprobación de las restricciones hidráulicas. La solución óptima será la que tenga un coste mínimo sobre el conjunto de las tuberías, recorriendo las cumbres del grafo. La secuencia descrita por las cumbres del grafo corresponde a los trabajos de renovación para el conjunto de las tuberías de la red.

## **7.5 Modelo de optimización por métodos no exactos**

Observamos que las aproximaciones exactas para la renovación de las redes de agua potable (RAP), permiten proponer soluciones únicas con arreglo a un modelo preciso. Estos métodos buscan la solución, valorando escenarios o políticas de renovación descritas por las cumbres del grafo, para la aproximación a través de la Programación Dinámica y a través de la aproximación de *Branch and Bound*. El inconveniente de estos métodos es la explosión del número de cumbres de grafo que presenta el conjunto de los escenarios posibles.

Con el fin de mejorarlos, se aplica la utilización de métodos no exactos que permiten reducir los tiempos de cálculo y proponer soluciones aceptables para el gerente de la red de agua potable (RAP). Entre estos métodos se encuentran los algoritmos genéticos que ya han sido utilizados para la optimización de los plazos de renovación (sustitución). Estas aproximaciones permiten generar escenarios que representan políticas de renovación de una manera estocástica, identificando así una o varias soluciones.

## **8 Los modelos de ayuda a la decisión**

### **8.1 Modelo KANEW**

Deb *et al.* (1998) pusieron en práctica esta aproximación con la ayuda del software "KANEW3", que utiliza un modelo de cohortes para estimar la vida útil para las tuberías del mismo tipo (homogéneo). El software se apoya en varios módulos para la programación de renovación: un inventario de las tuberías, conjunto de criterios de renovación, estimación de los costes y evaluación de alternativas de renovación. El modelo KANEW se ha utilizado en Alemania y permite proponer una programación de renovación, considerando las vidas útiles residuales de las tuberías y comparando la inversión de renovación al coste de mantenimiento y el coste que supone la pérdida de agua que se ha evitado. Sin embargo, el modelo no tiene en cuenta del funcionamiento hidráulico de la red, ni el efecto en la misma ni la topología de la red. La estimación empírica de los parámetros que describen la función de supervivencia de las tuberías puede aportar un sesgo.

### **8.2 Modelo UtilNets**

---

---

El modelo UtilNets (Hadzilacos *et al.*, 2000) es un modelo de ayuda a la decisión para la renovación de las redes de agua potable. Desarrollado inicialmente para las tuberías en fundición gris, el modelo se apoya en datos de fallos y del entorno que rodea a la tubería. Supone que la probabilidad de fallo es más importante al principio de la puesta en funcionamiento de las tuberías, luego este riesgo disminuye y aumenta de nuevo después de un período dado del tiempo. El modelo toma en consideración modelos físicos que miden el impacto de la carga y la corrosión sobre la tubería. Este modelo de ayuda a la decisión se articula sobre módulos que tiene en consideración lo siguiente:

- ⇒ Modelos que describen el deterioro estructural e hidráulico y la calidad del agua de la red de agua potable (RAP)
- ⇒ Evaluación de los impactos cuantitativos y cualitativos de los fallos y de la colocación de trabajos de renovación.
- ⇒ Elección de alternativas de renovación para las tuberías
- ⇒ Estimación de los montos presupuestarios
- ⇒ Evaluación de la fiabilidad de la red en términos de la satisfacción de la demanda.

Este modelo necesita un número importante de variables del entorno de la tubería.

### **8.3 Modelo WLC (Whole Life Costing)**

Skipworth *et al.* (2002) tratan sobre los instrumentos de análisis económico utilizado en el dominio de la gestión de la infraestructura. Presentan el concepto de "*Whole Life Costing*" (WLC) que, para una infraestructura dada, procura identificar a lo largo de su vida útil el conjunto de los costes de adquisición, costes de funcionamiento, coste de reparación y mantenimiento, y los costes de demolición o de desmontaje. El análisis de estos costes, se interesa por los costes internos ligados directamente a infraestructura, pero también a los costes externos en contacto con la interacción con su entorno. La aproximación WLC, utilizada en el área de la construcción, ha sido adaptada a la problemática de renovación de las redes enterradas a partir de los años 90. La aproximación se articula sobre dos tipos de análisis.

El primer tipo de análisis, "*Life Cycle Assessment*" (LCA), ha sido desarrollado en el área de la producción con el fin de describir interacciones a lo largo del ciclo de vida de un producto, de un proceso industrial o de una actividad con su entorno. Adaptada a la problemática de la gestión de la red de agua potable (RAP), *Life Cycle Assessment* procura describir la relación entre el funcionamiento de la red, usuarios y el entorno de la red. En este caso el análisis económico se refiere sobre las externalidades. Procura medir los costes indirectos de los servicios que hay que realizar en caso de rotura, los costes sociales en caso de trabajos o en caso de desviación, ocasionándoles una molestia a los usuarios lo que representa una falta que hay que penalizar.

El segundo tipo de análisis utilizado es "*Activity Based Costing*" (ABC). Esta aproximación desarrollada en los años 80 en Harvard, procura describir el coste de producción del bien relacionado con las actividades y el proceso que hay que realizar para su elaboración o fin deseado. Para la red de agua potable (RAP) se trata de analizar

---

---

el proceso de producción (extracción, fuente) del agua, y de las diferentes etapas que interactúan o toman parte en el análisis económico, como son los costes vinculados al funcionamiento y a los gastos de operación y mantenimiento de la red.

El modelo se apoya en una aproximación global de gestión de la red, integrando la renovación de las redes de agua potable, articulada sobre la generación de escenarios que representan programas de renovación con la ayuda de un algoritmo genético. La evaluación de diferentes escenarios se efectúa desde un punto de vista económico y técnico. El deterioro estructural de las tuberías es tomada en consideración a través del modelo de Shamir y Howard (1979). El modelo es utilizado en Inglaterra.

#### **8.4 Modelo PARMS (*Pipeline Asset and Risk Management System*)**

El modelo PARMS fue desarrollado en el CSIRO (Australia) por Burn *et al.* (2003) para el objetivo de la planificación a largo plazo de las necesidades en renovación y la estimación de los montos presupuestarios requeridos. El modelo utiliza una aproximación de previsión de los fallos, basada sobre el proceso de Poisson no homogéneo (NHPP), y una estimación de los costes sobre el ciclo de vida de las tuberías, que toman en consideración los costes vinculados al fallo y las externalidades vinculados a la interrupción de servicio, las molestias ocasionadas en caso de fallo o en caso de trabajos de renovación. El modelo ha sido completado por PARMS-PRIORITY (Mogolia *et al.* 2006), que permite jerarquizar tuberías a renovar y de asegurar una programación presupuestaria en el tiempo. Teniendo en cuenta los escenarios que permiten tomar en consideración riesgos vinculados a la gestión de la red, al igual que su evolución en el futuro a través del tiempo.

El modelo PARMS cuenta con los siguientes módulos de cálculo que consideran:

- ⇒ La evaluación de los riesgos
- ⇒ La previsión de los fallos
- ⇒ La evaluación de los costes
- ⇒ La generación y la evaluación de escenarios
- ⇒ La recolección y el procesamiento de los datos.

#### **8.5 Modelo CARE-W (*Computer Aided Rehabilitation of Water Networks*)**

El modelo CARE-W (Torterotot *et al.* 2003) es el resultado de un proyecto europeo, cuyo objeto es construir un instrumento de ayuda a la decisión para la rehabilitación de las redes de agua potable. El instrumento tiene por objetivo ayudar a los gerentes que desempeñan las acciones de rehabilitación de manera eficaz, mediante las siguientes acciones:

- ⇒ Construir y evaluar una estrategia a largo plazo
- ⇒ Establecer programas anuales
- ⇒ Ejecución y control de su realización.

---

---

El instrumento se construye alrededor de una estructura de bases de datos y de una interfaz, permitiendo administrar datos a través de la puesta en ejecución de instrumentos de gestión y módulos específicos. Estos módulos son:

- CARE-W-PI: "Performance Indicators". En este módulo se realiza la determinación de indicadores del funcionamiento de las redes en conjunto (o una parte de ellas). La puesta en ejecución de estos indicadores se apoya en los trabajos realizados por la International Water Association (IWA).
- CARE-W-LTP: "Long Term Planning". En este módulo se refiere a la elaboración de una estrategia de rehabilitación a largo plazo, a través de la generación de escenarios de evaluación general en el contexto de la población servida, consumo, precio del agua, etcétera. Este módulo utiliza el modelo KANEW para la programación a largo plazo.
- CARE-ARP: "Annual Rehabilitation Program". Se refiere a la programación anual de los proyectos de rehabilitación. Este módulo se apoya en la utilización del análisis multicriterio (Le Gauffre *et al.* 2002a)
- CARE-W-Fail: "Failure Forecast Models". Modelo estadístico de predicción de fallos de canalizaciones o conducciones. Utiliza el modelo NHPP, las cadenas de Markov y PHM para la previsión de fallos.
- CARE-W-REL: "Hydraulic Reliability Models". Modelo de análisis de la fiabilidad hidráulica de las redes.

## 9 Conclusión

Las aproximaciones para la renovación utilizan datos específicos para la jerarquización, la determinación de la fecha óptima y la programación de la renovación. La disponibilidad de estos datos determina el modelo a utilizar, mientras que la ausencia de ciertos datos puede conducir a la utilización de un modelo en lugar de otro. Sucede que los modelos de ayuda a la decisión se articulan sobre diferentes módulos donde la función principal es la evaluación de la red sobre varios criterios, vinculados al funcionamiento de la red, al deterioro estructural e hidráulico, la toma de decisiones sobre el conjunto de la red y la generación de escenarios.

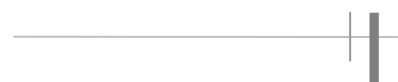
La comparación de estas aproximaciones permite identificar los criterios que hay que considerar en el proceso de decisión, en materia de renovación y construir un instrumento de ayuda a la decisión. Por tal motivo en la elaboración de un modelo de ayuda a la decisión, deben ser tomadas en consideración las siguientes características:

- ⇒ Todas las tuberías que constituyen la red no sufren trabajos de renovación en el mismo tiempo, y puesto que las tuberías por su localización y dimensión desempeñan un papel diferente en el suministro de agua, debemos identificar una aproximación para la jerarquización de las tuberías.
- ⇒ Definir objetivos tanto económicos como técnicos

- 
- 
- ⇒ Una programación de la renovación en el tiempo y la evaluación de escenarios, correspondiente a los trabajos de renovación sobre la red.
  - ⇒ Las soluciones propuestas deben ser viables desde un punto de vista económico y técnico.

El modelo de ayuda a la decisión debe tener en cuenta criterios vinculados a:

- ⇒ El deterioro estructural de las tuberías.
- ⇒ El deterioro hidráulico.
- ⇒ La toma de decisiones a la escala de la red en conjunto.





# Capítulo 5

---

## **Determinación de los Factores de Influencia**



---

## 1 Elección de criterios e identificación de alternativas

Los gestores encargados de estructurar los planes de renovación de redes de agua potable, acuden tradicionalmente a la experiencia, bien sea adquirida con el paso de los años, o por conocimiento de casos similares en otras compañías, y en muchos casos al seguimiento de políticas reactivas (manejo de emergencias), cuando el problema que atañe, es el relativo a las tuberías que con mayor prontitud deben ser objeto de intervención. Resulta claro que dadas las habituales circunstancias de limitación en el presupuesto, la problemática de fondo hoy día, no avala una solución que se base en la renovación de redes sin soportes ingenieriles. Esta opción, lejos de mejorar los indicadores técnicos relativos a las pérdidas reales o físicas en la red, actuará en clara contradicción con la intención de mantener una sana política de inversión en infraestructura física.

De este modo, una buena política de gestión de fugas con miras económicas eficientes, requiere que la renovación de la infraestructura sea selectiva, dado que sus costes asociados son siempre excesivamente altos. La selección debe fundamentarse en la identificación de aquellos criterios fundamentales a la hora de seleccionar la tubería, que debe ser afectada en primera instancia. La edad es, sin lugar a dudas, el primer criterio a incluir en la lista, pero no el único.

Un plan de renovación de la red con carácter selectivo, acoplado en el engranaje general con una política de gestión de fugas, se convierte en bastión esencial de cualquier estrategia global de gestión del sistema, si en él se evalúan todos los factores relevantes que pueden influir en el desgaste de la misma. Ello implica la consideración de múltiples criterios: además del criterio de la edad, se presenta como imprescindible la consideración de otros, como el historial de roturas sufridas por las tuberías de estudio, la predicción de los fallos que a futuro y basados en herramientas de tipo estadístico pueden ocurrir, la capacidad de transporte, la calidad del agua, los posibles efectos medioambientales que una rotura puede causar, etcétera; en resumen, todos aquellos criterios que aseguren el logro, ya no sólo de los objetivos técnicos tradicionales, sino además de objetivos ambientales y sociales. Cada día más requeridos por las legislaciones vigentes en los diversos países, que a su vez expresa el sentir de la sociedad.

Esto requiere del planteamiento de metodologías, que consideren variados criterios de diferente naturaleza, valorando la influencia de éstos en diferente grado de importancia, sobre el gran objetivo global del plan de renovación. Se pretende entonces, mediante la realización de este estudio, plantear los fundamentos y el uso de algunos Sistemas de Soporte a la Decisión Multicriterio (SSDM), ya aplicados en otros campos de la ciencia. Pero esta vez, con el objetivo de organizar prioritariamente los grupos de tuberías, en función de la premura con que urge una intervención técnica.

En definitiva, los procesos aquí planteados tienen como objetivo final, ordenar un número de tuberías de una red de distribución de agua potable, con base en su necesidad de ser renovada. Para ello se utilizan 8 criterios, en cada uno de los cuales cada grupo de tubería tomará un valor concreto, con un atributo dependiente de cada criterio, que se hace corresponder con un valor del 0 al 10. En un paso posterior se ponderarán todos los criterios en una proporción tal que la suma de todas las puntuaciones de todos los criterios, es 10 excepto del criterio de fiabilidad hidráulica, donde el criterio de

ponderación en conjunto, resulta difícil de alcanzar el valor de 10. La tubería de mayor valor será la primera en la lista para su rehabilitación; es decir, se va a hacer una ordenación de las mismas, pero sin entrar a poner condiciones mínimas o metas en los atributos de cada criterio. Posteriormente se plantea la aplicación de un método de optimización, para la priorización del conjunto del grupo de tuberías de cinco sectores de la red de la ciudad de Celaya, Gto. México, que son objeto de renovar en base a los factores ya descritos.

## 2 Modelo de la red de distribución de agua potable de Celaya

El municipio de Celaya pertenece al estado de Guanajuato, México. Dentro del sistema fisiológico de la mesa central o mesa de Anáhuac, encierra una superficie de 579.3 km<sup>2</sup>, lo que representa el 1.8% de la superficie del estado. Las coordenadas geográficas extremas son: al Norte 20° 41', y al Sur 20° 21' de Latitud Norte; al Este 100° 38', y al Oeste 100° 55' de Longitud Oeste. La ciudad de Celaya, cabecera del municipio, se encuentra situada a los 100° 48' 55" de latitud Oeste del meridiano de Guanajuato (ver figura 5.1), con 20° 31' 24" de latitud Norte y una altura sobre el nivel del mar de 1,755 metros ocupando la mancha urbana una superficie de 2,270 hectáreas.

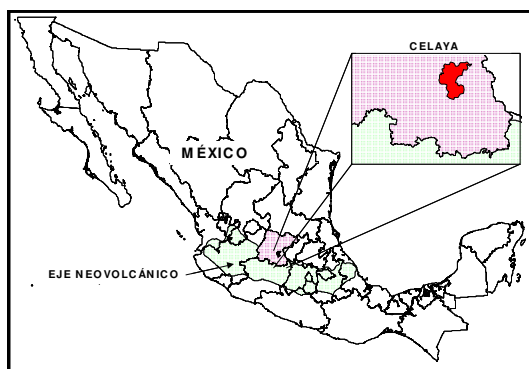


Figura 5. 1 Localización de la zona de estudio

La red de distribución de agua potable de la ciudad de Celaya se encuentra distribuida en 32 distritos hidrométricos o sectores hidráulicos, de los cuales, el número de acometidas en toda la red es de aproximadamente 86.312, y cuenta con una cobertura de micro medición del 92% como se muestra en la tabla 5.1. La demanda de los diferentes tipos de consumo de agua está cubierta gracias a aproximadamente 1.345 km de tuberías principales, con una densidad de 64 acometidas por km de tubería de distribución y una dotación inyectada que oscila entre 180 y 300 litros/hab. y día.

	<b>Acometidas</b>	<b>Porcentaje Contadores</b>	<b>Densidad de acometidas</b>	<b>Habitantes</b>
Número	86.312	92,30	64	431.502

Tabla 5. 1 Número de acometidas

Para la realización del presente trabajo se han seleccionado ocho sectores, entre los que se encuentra el sector centro que es el más amplio (ver figura 5.2), con mayor número de tuberías y de mayor edad. Cada distrito se encuentra dentro de una zona

perfectamente definida en términos hidráulicos, los cuales se abastecen de un depósito que a su vez es alimentado de uno o varios pozos según sea el caso. Cabe mencionar que los depósitos son elevados con una altura de 15 m y de diferentes capacidades.

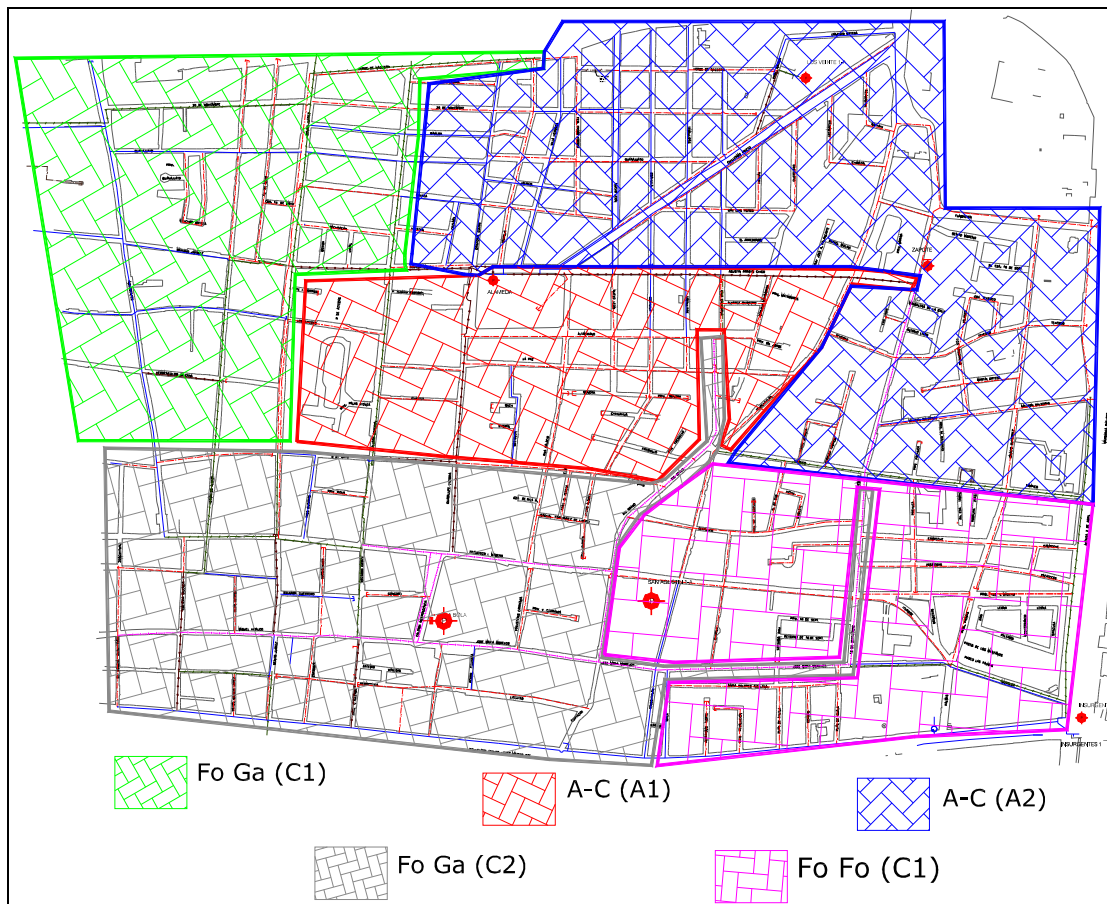


Figura 5. 2 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo

Es importante mencionar que la ciudad de Celaya es totalmente llana, en términos topográficos, donde la diferencia de cota de un punto a otro es de escasos metros, con algunas excepciones de algunos metros. Los consumos predominantes de agua potable en los diferentes sectores son en su gran mayoría de uso doméstico y comercial, como se muestra en el anexo 1, en el que se detallan a manera de ejemplo uno de los sectores. A manera de ilustración se presenta en la tabla 5.2 la cobertura de los contadores en el sector los Girasoles.

<b>COBERTURA EN MICROMEDICION LOS GIRASOLES</b>		
	No	%
<i>cuentas con contador</i>	1574	92.9
<i>cuentas sin contador</i>	121	7.1
<i>total de cuentas</i>	1695	100.0

Tabla 5. 2 Coberturas de contadores

Así mismo, se presenta en la tabla 5.3 la cobertura del tipo de tarifas con el número de abonados, clasificación realizada por el departamento comercial que se aplica en la conjunción de trabajos técnicos.

<i>Clave del servicio</i>	<i>Tipo del servicio</i>	<i>No de cuentas</i>	<i>%</i>
20C	COMERCIAL ALTO CONSUMO C	1.0	0.06
23C	COMERCIAL MEDIO ALTO C	1.0	0.06
24C	COMERCIAL MEDIO BAJO C	1.0	0.06
21C	COMERCIAL PEQUEÑO C	37.0	2.18
21D	COMERCIAL PEQUEÑO D	1.0	0.06
13C	DEPARTAMENTO C	13.0	0.77
16C	DOM. DEP. JUBIL. C	1.0	0.06
10C	DOMESTICO C	1288.0	75.99
12C	DOMESTICO INSEN C	74.0	4.37
11C	DOMESTICO JUBILADO C	275.0	16.22
35C	INST. EDUCATIVAS PREESCOLAR C	2.0	0.12
39C	INST. EDUCATIVAS PREESCOLAR PRIVADO C	1.0	0.06
		<b>1695.0</b>	<b>100.0</b>

*Tabla 5.3 Cobertura de tarifas*

El tipo de red es casi en su totalidad mallada, excepto en algunas partes donde existen algunos tramos de tubería ramificados, pudiendo dichas ramificaciones hacer parte de la red mallada, mediante un manejo previo de apertura y cierre de válvulas. En cada uno de los distritos se han realizado análisis y balances hídricos con el objeto de calibrar los modelos utilizados en este trabajo, dentro de los análisis realizados por el servicio de agua (JUMAPA), se encuentran las mediciones de los caudales inyectados (ver figura 5.3), donde se muestra una grafica del registro horario del caudal inyectado y de la presión.

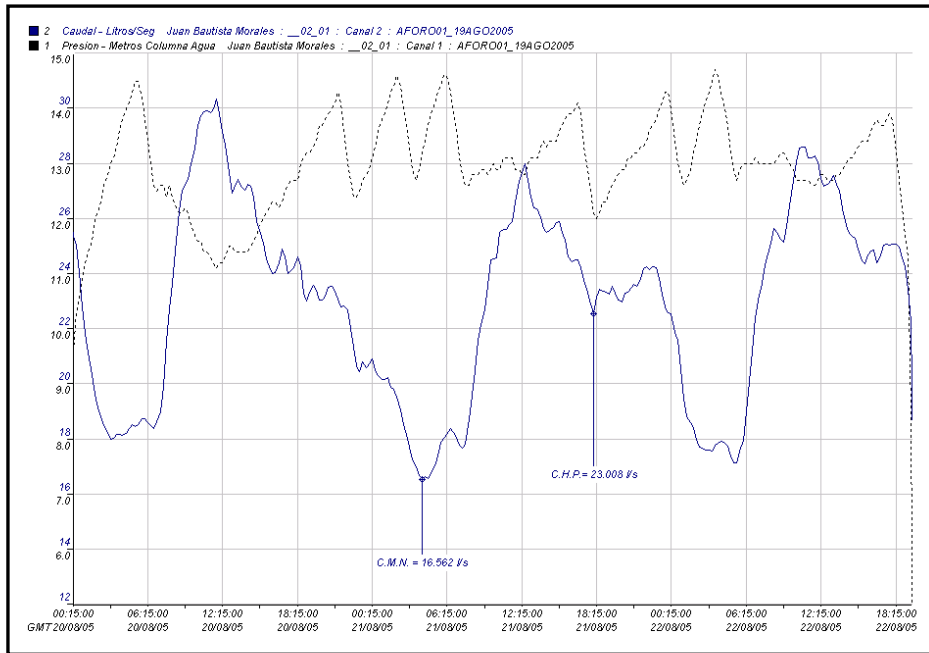


Figura 5. 3 Registro de consumo diario

También se han realizado análisis de exactitud de los contadores, donde se realiza la medición en campo, de una muestra representativa del universo de contadores; así de esta manera se lleva un registro de las mediciones y lecturas respectivas, las cuales se registran en los formatos como el que se observa en la figura 5.4.


 <b>Comisión Estatal del Agua de Guanajuato</b> <b>Dirección General de Desarrollo Hidráulico</b> <b>Dirección de Agua Potable</b> Departamento de Recuperación de Agua												
PRUEBA DE MICROMEDICIÓN												
Hoja de campo												
<b>Municipio:</b> CELAYA						<b>Sector Hidrométrico</b>						
<b>Organismo Operador:</b> JUMAPA						CAPILLA						
<b>Usuaria:</b>						<b>Ubicación:</b> CAPILLA ORIENTE # 131						
<b>Fecha:</b> 12-Ene-05			<b>No. Cuenta:</b>			<b>Diámetro de toma:</b>						
<b>Hora I:</b>			<b>Hora F:</b>									
Información del medidor												
<b>Marca:</b> CICASA			<b>Tipo:</b> Velocidad		<b>Modelo:</b> DELAUNET		<b>Diámetro:</b> 1/2"					
<b>No. Medidor:</b> 3008823			<b>No. de Serie:</b> -		<b>Estado de Carcasa:</b> no tiene							
<b>Filtro:</b> -			<b>Yál. a la entrada:</b> Si		<b>Yál. a la salida:</b> no tiene							
Desarrollo de Prueba												
Rango de Caudal	Tiempo de la Prueba	Micromedidor		Volumen	Micromedidor patrón		Volumen	% e RMP	% e RVR	Vol. Recip. (lts.)	Presión (Kg/cm2)	
		Lec. Inicial	Lec. Final		Lec. Inicial	Lec. Final						
Baja	1:12 1 47	18.6832	18.6853	2.1	4.2927	4.2947	2.0	5.00	5.00	2.0	1.600	
Media												
Alta	10:34 0 58	18.6853	18.6954	10.1	4.2947	4.3048	10.1	0.00	1.00	10.0	1.600	
Observaciones Generales						Croquis de toma						
El micromedidor esta dentro del rango permisible del ± 2%												
<b>Nombre y firma del responsable</b>												

Figura 5. 4 Formato para la evaluación de exactitud de los contadores

Dichas evaluaciones se han empleado para la calibración del modelo hidráulico. Respecto al modelo de la red se han realizado algunas simplificaciones del modelo, pero siempre conservando la topología con el objetivo de la representación lo mas apegado a la realidad, al momento de simular el funcionamiento de la red, contrastando los resultados obtenidos en el modelo, con los datos obtenidos de las diversas mediciones de presión y caudal en campo. Todo el trabajo se apoya en las mediciones de caudal, comportamientos de consumos horarios, calibración de contadores de todos y cada uno de los factores que intervienen en la simulación. Un ejemplo del modelo del sector centro se muestra en la figura 5.5.

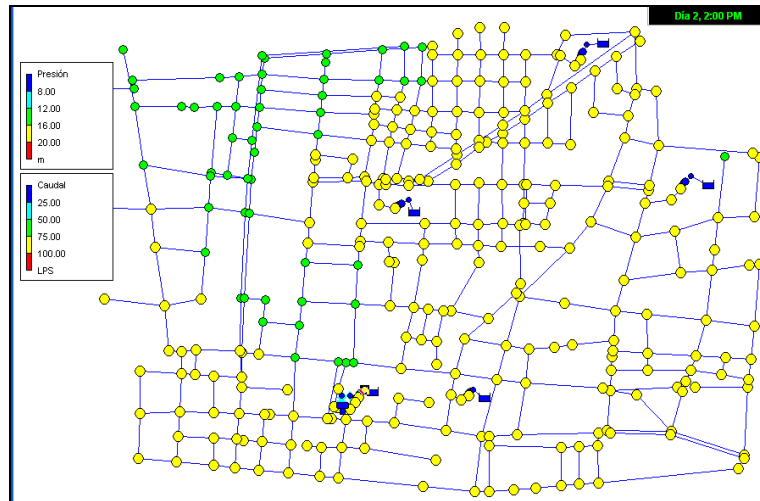


Figura 5. 5 Modelo de la red del sector centro.

Respecto a la composición de materiales de la red, en la tabla 5.6 se detalla la composición del material de cada uno de los sectores, cabe mencionar que en el sector centro, un gran número de acometidas son de acero galvanizado con el consecuente problema de oxidación, tanto exterior debido a la humedad del terreno, como interior; debido a la calidad del agua, lo cual se encuentra documentado por la empresa de aguas.

Diámetro (mms)	Sector Centro	Jardines	Girasoles	San Juanico	Número de tuberías	Porcentaje %
75	222	233	75	77	711	57.25
100	121	36	26	23	215	17.31
150	61	67	14	16	174	14.01
200	34	15	0	8	67	5.39
250	3	15	0	0	18	1.45
300	46	11	0	0	57	4.59

Tabla 5. 4 Número de tuberías de los sectores de la red

La distribución de diámetros, muestra que los diámetros referidos a la mayoría de las tuberías que constituyen la red oscilan entre 75 mm y 150 mm, como se puede observar



en las tablas 5.4 y 5.5. Se omitieron las tuberías de 50 y 60 mm.

<b>Diámetro (mms)</b>	<b>Sector Centro</b>	<b>Jardines</b>	<b>Girasoles</b>	<b>San Juanico</b>	<b>Longitud total</b>	<b>Porcentaje %</b>
75	21211	16472	6266	8256	52205	52,82
100	12108	2344	3255	2283	19990	20,22
150	6689	4199	2027	2339	15254	15,43
200	3065	622		987	4674	4,73
250	155	858			1013	1,02
300	5001	706			5707	5,77

*Tabla 5. 5 Longitud de las tuberías de los sectores de la red*

Respecto a las edades de las tuberías, las del sector centro son las de mayor edad con 50 años, así como diferentes materiales en los cinco sectores como: Fundición (Fo-Fo), Acero galvanizado (Fo-Ga), PVC y Polietileno. Como se muestra en la tabla siguiente.

<b>Sector</b>	<b>Centro</b>	<b>Jardines</b>	<b>Girasoles</b>	<b>San Juanico</b>
<b>Edad (años)</b>	50-40	30	20	10
<b>Material</b>	Fo-Fo, Fo-Ga, A-C	PVC	PVC	Polietileno
<b>Eficiencia</b>	56.25	66.91	61.06	82.45

*Tabla 5. 6 Material y eficiencia de las tuberías de los sectores de la red*

La red recibe diariamente un volumen inyectado de 85.437 m<sup>3</sup>, mientras que presenta un volumen registrado por sus contadores de 71.852 m<sup>3</sup>. Se ha realizado un balance hídrico de cada sector por parte de JUMAPA, que indica que el volumen incontrolado está principalmente constituido por las aportaciones del volumen fugado. La JUMAPA cuenta con un departamento de recuperación de agua donde se le da puntual seguimiento a las fugas no visibles.

El conocimiento de los volúmenes discriminados permite, además, afirmar que el sistema tiene un rendimiento global del 74.52 %, que se genera al multiplicar el 78.54% del rendimiento de la red, por el 94.88 % del rendimiento de la gestión técnica-administrativa. La dotación promedio de la red es de 198 l./hab/día, mientras que los valores medios considerados con los estándares nacionales señalados por la Comisión Nacional del Agua son de 321 l./hab. y día,

Para la asignación de consumos, se ha seleccionado el método de asignación de volúmenes por contribución de líneas concurrentes a un nodo, para cargar el modelo con los volúmenes registrados. En él, cada abonado cuenta con punto de consumo que está asignado a una línea. Se suman los caudales derivados de cada línea y se reparten por

---

mitades a cada uno de los dos nodos extremos. Así, en cada nodo se suman los medios caudales que llegan de aquellas líneas, que convergen a ese nodo obteniendo la demanda total para ese elemento. En el caso de algunos consumos de particular importancia, se han asignado en la totalidad de su magnitud a un nodo específico.

Como se muestra, el caudal de fuga es considerable por lo que es necesario representar dicho volumen en el modelo, y para tal propósito, se empleara el método de *asignación de las fugas como consumos dependientes de la presión*, método que se describe mas adelante. Cabe mencionar que existen diversos métodos, pero este método es el que representa de mejor y de manera más exacta el caudal fugado.

## **2.1 Asignación de las pérdidas volumétricas debidas a las fugas en la red**

En los métodos descritos con anterioridad, se ha realizado la asignación de cargas correspondiente al volumen facturado en la red de abastecimiento, esto es, a las lecturas o estimaciones realizadas en los contadores de cada abonado. Sin embargo como se ha comentado existen diferencias entre el caudal inyectado en la red, el caudal facturado y el caudal realmente consumido. Las diferencias existentes entre el volumen facturado y el volumen inyectado, también han de ser incluidas de uno u otro modo en el proceso de asignación de cargas. Sin embargo, de todas estas pérdidas volumétricas, quizás las más importantes son las fugas a través de fisuras en las tuberías, uniones y elementos accesorios.

En el caso de estas fugas su asignación es difícil, pues no se conoce ni su valor ni su localización. Cuando una fuga se localiza generalmente es porque tiene cierta importancia y se procede a su reparación, con lo cual a la larga, desaparece. No obstante, la principal dificultad en la consideración de las fugas en un modelo matemático, sigue estando en la imposibilidad de determinar su ubicación exacta, aun cuando se disponga de una estimación de su cantidad. Por ello, en la metodología propuesta hasta ahora se ha excluido el tratamiento de las fugas de la red durante el proceso de asignación de cargas. Sin embargo, a pesar de no estudiar con detenimiento las fugas que se producen en la red, éstas han de ser tomadas en cuenta si se desea un nivel de precisión adecuado en el modelo. A continuación se presentan algunas alternativas para su asignación.

### **2.1.1 Corrección de la demanda mediante el rendimiento.**

En general, el planteamiento utilizado para tener en cuenta las fugas y por extensión todos los consumos no registrados, ha consistido en corregir la demanda media en el nodo con un coeficiente igual al rendimiento de la red. Con esta forma de contabilizar las fugas se obtienen curvas de modulación más rizadas, esto es, con mayores diferencias entre los caudales en horas punta y caudales en horas valle.

### **2.1.2 Representación de las fugas como consumos dependientes de la presión.**

Sin embargo, las fugas tienen un comportamiento muy distinto al de cualquier caudal consumido. Estrictamente hablando, una fuga en la red es un consumo dependiente de la presión, que puede modelarse como una válvula parcialmente abierta que conecta la red

---

---

con el exterior (Iglesias *et al.*, 1999). El caudal que deja pasar la válvula depende de la diferencia de presiones entre sus extremos. Al estar abierta hacia el exterior, la presión aguas abajo es constante e igual a la presión atmosférica, por lo que la magnitud de la fuga depende del nivel de presiones en la red. Cuando las presiones son mayores (horas valle de consumo) las fugas lo son también, mientras que cuando las presiones en la red son mínimas (horas punta de consumo) el nivel de fugas en la red es también el mínimo. De hecho, una buena forma de diferenciar lo que son fugas de las que son otras pérdidas volumétricas, consiste en medir el consumo mínimo nocturno en un sector.

El principal inconveniente de esta forma de tratar las fugas, se deriva de la necesidad de calcular un coeficiente que represente la caída de presión en cada una de las fugas. Esto se traduce en un coeficiente que debe calibrarse para cada una de las tuberías de la red, lo cuál complica notablemente el ajuste del modelo.

### **2.1.3 Asignación del caudal de fugas mediante un caudal medio constante.**

Por último, una alternativa al uso del rendimiento de la red como coeficiente corrector consiste en hacer balance de volúmenes, y no de caudales. Así, las fugas se añadirán con posterioridad al proceso de asignación de cargas, como volúmenes diarios constantes calculados a partir del rendimiento volumétrico de la red, y repartidos en los nodos en función de la importancia relativa de estos. Este reparto se puede hacer bien proporcionalmente al volumen diario demandado por los mismos, bien en función de la longitud de tubería conectada con cada nodo, o el número de elementos accesorios de la misma. Este método implica asumir que el caudal de fugas se mantiene constante a lo largo del día, lo cual será tanto más cierto cuanto menor sea la fluctuación de presiones en la red. En cualquier caso, la variación diaria de los caudales de fugas es con diferencia, mucho menos acusada que la variación del consumo facturado.

### **2.1.4 Comparación de los distintos métodos propuestos.**

Para realizar una comparación de las tres estrategias de asignación del caudal debido a las fugas se tomo un ejemplo presentado por Meneghin (1999) correspondiente a un ensayo realizado en laboratorio. En él se estudia una red con alimentación desde un depósito a nivel constante. En el modelo de la misma, las fugas se han incluido como elementos dependientes de la presión y los caudales asignados corresponden al día de mayor consumo. Se observa que en horas nocturnas el caudal de fugas llega a representar el caudal total consumido, mientras que en las horas de mayor consumo éstas apenas representan el 10% del caudal total. Al tratarse de un ensayo de laboratorio, se parte de datos conocidos de caudal consumido, fugas y caudal total inyectado.

### **2.1.5 Ejemplo de la aplicación del modelo en el sector centro.**

A continuación, se desarrolla la aplicación del modelo para la representación de las fugas como consumos dependientes de la presión. Modelo explicado en el apartado 2.1.2. A manera de ilustración se ejemplifica el modelo en el sector centro, donde se muestra el desarrollo del mismo partiendo de los siguientes datos que se encuentran en la tabla 5.7.

<b>Volumen</b>	<b>Caudal</b>
Volumen inyectado	14.273,51 m <sup>3</sup> /día
Volumen consumido	8.340,01 m <sup>3</sup> /día
Volumen fugado	5.933,50 m <sup>3</sup> /día

*Tabla 5. 7 Datos de los volúmenes del sector*

El sector cuenta con 5 fuentes de abastecimiento con diferentes caudales y un depósito de regulación de 1000 m<sup>3</sup> de capacidad, los caudales se detallan en la tabla 5.8, así como el horario de operación, en los caudales asignados originalmente en el modelo no se considera el caudal fugado y son los siguientes:

<b>Tiempo</b>	<b>Nodo E1</b> <b>Q<sub>inyectado</sub></b>	<b>Nodo E2</b> <b>Q<sub>inyectado</sub></b>	<b>Nodo E3</b> <b>Q<sub>inyectado</sub></b>	<b>Nodo E4</b> <b>Q<sub>inyectado</sub></b>	<b>Nodo E5</b> <b>Q<sub>inyectado</sub></b>
<b>Horas</b>	<b>LPS</b>	<b>LPS</b>	<b>LPS</b>	<b>LPS</b>	<b>LPS</b>
0:00	-49,06	-11,9	-11,16	-13,92	-15,22
1:00	-49,06	-11,77	-11,16	-13,92	-15,22
2:00	-49,04	-11,65	-11,03	-13,77	-15,06
3:00	-48,78	-11,53	-10,9	-13,62	-14,89
4:00	-48,54	-11,41	-10,77	-13,48	-14,74
5:00	-48,3	-11,35	-10,64	-13,34	-14,58
6:00	-48,17	-11,33	-10,53	-13,23	-14,46
7:00	-48,09	-11,44	-10,48	-13,17	-14,4
8:00	-48,16	-11,55	-10,5	-13,21	-14,44
9:00	-48,28	-11,66	-10,57	-13,3	-14,54
10:00	-48,44	-11,71	-10,65	-13,4	-14,65
11:00	-48,57	-11,77	-10,72	-13,47	-14,73
12:00	-48,7	-11,8	-10,78	-13,54	-14,8
13:00	-48,8	-11,83	-10,83	-13,59	-14,86
14:00	-48,89	-11,84	-10,88	-13,64	-14,91
15:00	-48,95	-11,86	-10,91	-13,67	-14,94
16:00	-49	-11,88	-10,93	-13,7	-14,97
17:00	-49,05	-11,87	-10,96	-13,72	-15,00
18:00	-49,06	-11,86	-10,97	-13,73	-15,01
19:00	-49,06	-11,83	-10,97	-13,74	-15,01
20:00	-49,05	0,00	-10,96	-13,72	-15,00

21:00	-49,06	0,00	0,00	-13,8	0,00
22:00	-49,06	-11,75	0,00	-13,82	0,00
23:00	-48,99	-11,63	-10,99	-13,73	-15,01
24:00:00	-48,75	-11,5	-10,87	-13,6	-14,87
	1169,85	256,82	238	325,91	326,09
lps	48,743	10,700	9,916	13,579	13,587
<b>m<sup>3</sup>/día</b>	<b>4211,46</b>	<b>924,55</b>	<b>856,8</b>	<b>1173,27</b>	<b>1173,92</b>

Tabla 5. 8 Demanda horaria en nodos

**VOLUMEN INYECTADO SEGÚN MODELO M3/DIA  $\Sigma = 8340,01$**

Los datos en las celdas con valores en cero, es debido a que los pozos dejan de bombear en horario punta, que es desde las 20:00 hrs. hasta las 22:00.

El procedimiento es el siguiente: En este caso, el objetivo es hacer que el caudal no registrado o fugado (que no necesariamente es igual), dependa de la presión, posteriormente el prorrateo se realiza proporcional a la demanda base.

Volumen fugado                      5.933,50 m<sup>3</sup>/día                      68,67 lps.

Por lo tanto en la tabla 5.9 contamos con el caudal de la demanda base, y del caudal de las fugas en cada nodo (Qfugas), dicho caudal de fugas se determina a través de la ecuación 5.1.

$$Q_{fugas} = \frac{\text{Volumen fuga total}}{Q_{medio\ total} * Q_{medio_i}} \quad (5.1)$$

Donde el volumen total de fuga se refiere al volumen total fugado, que en este caso es de 68,67 lps., el Q medio total se refiere al caudal total de la demanda base, que en este caso es de 96.53 lps. y el Qmedio<sub>i</sub> se refiere a la demanda base en el nodo *i*.

Nodo	Q medio (lps) Demanda base	Q fugas
Conexión N10	0,291	0,207
Conexión N100	0,231	0,164
Conexión N101	1,641	1,167
Conexión N103	0,311	0,221
Conexión N104	0,901	0,641

Conexión N105	0,201	0,143
Conexión N106	0,101	0,072
Conexión N107	0,151	0,107
Conexión N108	0,111	0,079
Conexión N109	0,111	0,079
Conexión N11	0,311	0,221
Conexión N110	0,271	0,193
Conexión N111	0,341	0,243
Conexión N112	0,861	0,613
Conexión N113	0,231	0,164
Conexión N115	0,281	0,200
Conexión N117	0,271	0,193
Conexión N118	0,121	0,086
Conexión N119	0,411	0,292
Conexión N12	0,231	0,164
Conexión N122	0,371	0,264
Conexión N123	0,111	0,079
Conexión N124	0,441	0,314
Conexión N125	0,221	0,157
Conexión N126	0,161	0,115
Conexión N127	0,101	0,072
Conexión N129	0,241	0,171
Conexión N13	0,291	0,207
Conexión N130	0,331	0,235
Conexión N131	0,321	0,228
Conexión N132	0,231	0,164
Conexión N133	0,241	0,171
Conexión N134	0,161	0,115
Conexión N135	0,161	0,115
Conexión N136	0,121	0,086
Conexión N137	0,141	0,100
Conexión N138	0,301	0,214
Conexión N139	0,291	0,207

Conexión N14	0,441	0,314
Conexión N162	0,101	0,072
Conexión N174	0,571	0,406

Tabla 5. 9 Calculo del caudal de fugas

**Nota:** El sector analizado cuenta con 274 nodos, por lo tanto la tabla aquí mostrada es simplemente esquemática.

El caudal de fugas se reparte mediante emisores en los nodos que se calculan en el instante de menor caudal, que es desde las 0:00 hasta las 4:00 horas. Es decir cuando las presiones son mayores (horas valle de consumo), y las fugas resultan ser también mayores, debido al aumento de la presión. Esto sucede en cada nodo como se muestra en la figura 5.6.

Tabla de Evolución - Nudo N162				Tabla de Evolución - Nudo N174			
Tiempo Horas	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Tiempo Horas	Demanda LPS	Altura m	Presión m
0:00	0.05	171.54	17.84	0:00	0.33	171.50	17.30
1:00	0.05	172.06	18.36	1:00	0.34	172.02	17.82
2:00	0.05	172.56	18.86	2:00	0.35	172.53	18.33
3:00	0.05	173.05	19.35	3:00	0.35	173.01	18.81
4:00	0.05	173.51	19.81	4:00	0.36	173.48	19.28
5:00	0.07	173.88	20.18	5:00	0.46	173.85	19.65
6:00	0.08	174.06	20.36	6:00	0.52	174.03	19.83
7:00	0.10	173.91	20.21	7:00	0.66	173.87	19.67
8:00	0.10	173.61	19.91	8:00	0.72	173.58	19.38
9:00	0.11	173.27	19.57	9:00	0.75	173.24	19.04
10:00	0.11	173.03	19.33	10:00	0.74	173.00	18.80
11:00	0.11	172.80	19.10	11:00	0.73	172.77	18.57
12:00	0.10	172.62	18.92	12:00	0.71	172.59	18.39
13:00	0.10	172.47	18.77	13:00	0.70	172.43	18.23
14:00	0.10	172.37	18.67	14:00	0.67	172.34	18.14
15:00	0.10	172.28	18.58	15:00	0.66	172.24	18.04
16:00	0.10	172.19	18.49	16:00	0.66	172.15	17.95
17:00	0.09	172.15	18.45	17:00	0.63	172.12	17.92
18:00	0.09	172.15	18.45	18:00	0.62	172.11	17.91
19:00	0.08	172.20	18.50	19:00	0.58	172.17	17.97
20:00	0.07	171.87	18.17	20:00	0.50	171.79	17.59

Figura 5. 6 Evolución de la demanda en los nodos

Los resultados son recopilados en la tabla 5.10, así como también se muestran los cálculos de los coeficientes de los emisores.

SECTOR	Q medio(lps) Demanda base	Q fugas	Q <sub>dmin</sub> lps	Presión	P <sup>0,5</sup>	C <sub>emisor</sub>
Conexión N10	0,291	0,207	0,16	16,55	4,068	0,039
Conexión N100	0,231	0,164	0,13	14,99	3,872	0,034
Conexión N101	1,641	1,167	0,98	16,13	4,016	0,244

Conexión N103	0,311	0,221	0,18	17,67	4,204	0,043
Conexión N104	0,901	0,641	0,53	15,26	3,906	0,136
Conexión N105	0,201	0,143	0,11	15,61	3,951	0,028
Conexión N106	0,101	0,072	0,05	16,6	4,074	0,012
Conexión N107	0,151	0,107	0,08	16,16	4,020	0,020
Conexión N108	0,111	0,079	0,05	18,13	4,258	0,012
Conexión N109	0,111	0,079	0,05	17,84	4,224	0,012
Conexión N11	0,311	0,221	0,18	15,5	3,937	0,046
Conexión N110	0,271	0,193	0,15	15,67	3,959	0,038
Conexión N111	0,341	0,243	0,19	18,43	4,293	0,044
Conexión N112	0,861	0,613	0,51	15,53	3,941	0,129
Conexión N113	0,231	0,164	0,13	16,92	4,113	0,032
Conexión N115	0,281	0,200	0,16	14,5	3,808	0,042
Conexión N117	0,271	0,193	0,15	15,66	3,957	0,038
Conexión N118	0,121	0,086	0,06	15,64	3,955	0,015
Conexión N119	0,411	0,292	0,24	16,38	4,047	0,059
Conexión N12	0,231	0,164	0,13	15,5	3,937	0,033
Conexión N122	0,371	0,264	0,21	16,98	4,121	0,051
Conexión N123	0,111	0,079	0,05	15,67	3,959	0,013
Conexión N124	0,441	0,314	0,25	16,11	4,014	0,062
Conexión N125	0,221	0,157	0,12	15,48	3,934	0,030
Conexión N126	0,161	0,115	0,08	16,41	4,051	0,020
Conexión N127	0,101	0,072	0,05	16,54	4,067	0,012
Conexión N129	0,241	0,171	0,13	16,92	4,113	0,032
Conexión N13	0,291	0,207	0,16	16,04	4,005	0,040
Conexión N130	0,331	0,235	0,19	16,09	4,011	0,047
Conexión N131	0,321	0,228	0,18	14,18	3,766	0,048
Conexión N132	0,231	0,164	0,13	16,6	4,074	0,032
Conexión N133	0,241	0,171	0,13	17,77	4,215	0,031
Conexión N134	0,161	0,115	0,08	15,76	3,970	0,020
Conexión N135	0,161	0,115	0,08	16,49	4,061	0,020
Conexión N136	0,121	0,086	0,06	17,08	4,133	0,015
Conexión N137	0,141	0,100	0,07	18,13	4,258	0,016



Conexión N138	0,301	0,214	0,17	17,51	4,184	0,041
Conexión N139	0,291	0,207	0,16	15,06	3,881	0,041
Conexión N14	0,441	0,314	0,25	17,08	4,133	0,060
Conexión N162	0,101	0,072	0,05	15,86	3,986	0,013
Conexión N174	0,571	0,406	0,33	17,30	4,159	0,079

*Tabla 5. 10 Cálculo de los coeficientes de los emisores*

Donde  $Q_{\text{dmin}}$  se refiere a las horas de mínima demanda, que en este caso son en el lapso de entre las 0:00 hrs. y las 4:00 hrs. Respecto a la columna de la presión, se refiere a la presión disponible precisamente en el rango del periodo de tiempo de las 0:00 hrs. y las 4:00 hrs. Los coeficientes se determinan dividiendo la columna  $Q_{\text{dmin}}$  entre la columna correspondiente a  $P^{0,5}$ .

Una vez que se determinan los coeficientes de los emisores, se asignan al modelo y se obtienen los resultados que muestra la tabla siguiente.

Tiempo	Nodo E1 $Q_{\text{inyectado}}$	Nodo E2 $Q_{\text{inyectado}}$	Nodo E3 $Q_{\text{inyectado}}$	Nodo E4 $Q_{\text{inyectado}}$	Nodo E5 $Q_{\text{inyectado}}$
Horas	LPS	LPS	LPS	LPS	LPS
0:00	-69,31	-23,17	-29,3	-26,47	-25,54
1:00	-69,27	-23,97	-29,09	-26,22	-25,28
2:00	-68,8	-23,78	-28,88	-25,97	-25,02
3:00	-68,46	-23,23	-24,21	-20,29	-24,96
4:00	-68,35	-23,51	-24,49	-20,64	-24,89
5:00	-68,42	-23,04	-28,07	-24,99	-24,92
6:00	-68,51	-23,68	-28,7	-25,76	-24,8
7:00	-68,38	-23,8	-28,73	-25,82	-24,85
8:00	-68,47	-23,88	-28,78	-25,89	-24,92
9:00	-68,37	-23,87	-28,75	-25,85	-24,88
10:00	-68,52	-23,93	-28,81	-25,93	-24,96
11:00	-68,39	-23,86	-28,75	-25,85	-24,89
12:00	-68,47	-23,88	-28,78	-25,89	-24,92
13:00	-68,37	-23,82	-28,73	-25,83	-24,86
14:00	-68,49	-23,85	-28,78	-25,88	-24,92
15:00	-68,37	-23,8	-28,73	-25,82	-24,85
16:00	-68,47	-23,84	-28,77	-25,87	-24,9
17:00	-68,39	-23,78	-28,73	-25,82	-24,85

18:00	-68,44	-23,79	-28,75	-25,84	-24,88
19:00	-68,41	-23,75	-28,73	-25,81	-24,85
20:00	-68,41	0,00	-8,00	-25,95	0,00
21:00	-68,41	0,00	-8,00	-25,91	0,00
22:00	-68,36	-23,62	-28,69	-25,74	-24,78
23:00	-68,4	-23,26	-28,73	-20,64	-24,85
lps	68,47	21,72	26,64	24,95	22,82
<b>m<sup>3</sup>/día</b>	<b>5915,88</b>	<b>1876,72</b>	<b>2302,02</b>	<b>2155,86</b>	<b>1972,47</b>

Tabla 5. 11 Resultado del modelo aplicando los coeficientes de los emisores

**VOLUMEN INYECTADO SEGÚN MODELO  
CON COEFICIENTES DE FUGAS**

m<sup>3</sup>/día

**Σ = 14.222,95**

Comparando los resultados con el volumen inyectado real y el volumen del modelo:  
 $14.273,51 - 14.222,95 = 50,56 \text{ m}^3/\text{día}$ , esta diferencia es debido a los decimales que maneja Epanet® que son dos, pero podemos considerar que los coeficientes asignados son idóneos porque representan el comportamiento real de la red.

Por tal motivo y en base a los resultados obtenidos, este método será el que se empleará en los demás sectores para representar en el modelo el caudal fugado.

### 3 Determinación de los factores de influencia

En la revisión de la literatura, han sido identificados y enumerados por varios autores, un gran número de factores de influencia en el fallo de las tuberías. Por mencionar algunos autores, podemos citar a Morris (1967), Shamir y Howard (1979), Kelly y O'Day (1982), Goulter y Kazemi (1988) y otros. Existe un gran espectro de posibles orientaciones para determinar los factores de influencia, que se consideraran para evaluar la red de distribución de la ciudad de Celaya. He tenido la oportunidad en dos ocasiones de estar al frente de la gestión de sistemas de agua, y resulta realmente complicado y ambiguo, en el momento de tomar la decisión de cómo aplicar los recursos financieros disponibles, en la rehabilitación de tuberías del sistema de distribución, de tal forma que en base a los datos obtenidos en la revisión de la literatura, la experiencia personal y la consideración con los gestores de la red de la ciudad de Celaya se determinan los factores.

En los factores seleccionados, consideramos los factores estructurales de las condiciones físicas de las tuberías, factores que involucran a la edad, el periodo de instalación de las tuberías y el número de roturas previas, estos factores se agrupan en el cluster del grupo “Básicos o estructurales”. Otro grupo de factores que se consideran en este trabajo, son los relacionados con la operación y mantenimiento de los sistemas de distribución, los cuales también influyen de manera considerable, en la priorización para la rehabilitación de las tuberías, estos factores son los que involucran a la variación de la

---

capacidad hidráulica de la tubería con el tiempo, otro factor es el índice de deficiencia en los nodos, el cual se relaciona con el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada, al suministro de agua hacia los Abonados. Agregamos otro factor en este grupo como es el impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia óptimo. Como su nombre lo indica este factor se relaciona con el comportamiento de la red frente al caudal fugado.

Por último, se ha considerado un grupo que relacione el aspecto de criticidad del funcionamiento de la red, es decir considerar el tipo de usuario que se encuentra conectado a la red, el impacto que se pueda tener en un punto de la red que se encuentre indispueta, o no se encuentre en un nivel óptimo de abastecimiento. Lo cual es muy variable, por ejemplo no se puede considerar en la misma importancia, el efecto que pueda tener un suministro deficiente o nulo a un hospital, escuela o usuarios de consumos considerables, que el impacto que ha tener para un abonado doméstico. En este grupo se encuentran los factores del tiempo de renovación de Shamir-Howard, el factor de la influencia de un corte de agua, en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua, por último; el factor del impacto de una rotura en el medio.

### **3.1 Criterios Básicos**

Dentro de este grupo, consideramos aquellos criterios que se clasifican habitualmente como básicos en cualquier análisis de renovación de tuberías, y que han sido contrastados y consensuados en la literatura y en gran número de estudios previos. Probablemente, se trata de una información con la que contarán las empresas de agua, con el propósito de analizar y evaluar el sistema. Dichos factores son la edad de la tubería y el número de roturas nuevas que aparecen cada año, a partir de un determinado año de referencia.

#### **3.1.1 La edad y el periodo instalación de la tubería**

El paso del tiempo deteriora las condiciones físicas y operativas de las tuberías. En el caso de las tuberías de material plástico, el paso del tiempo y la pérdida de las sustancias plastificantes rigidiza el material, incrementando la posibilidad de rotura. En el caso de materiales más durables, como los metales, aparece la corrosión y como consecuencia la fragilización de la tubería. El paso del tiempo contribuye también a empeorar el estado superficial de las tuberías al incrementar su rugosidad. El envejecimiento de la tubería empeora también otras condiciones, tales como la calidad del agua que la atraviesa. Además de todo lo expuesto, se presenta en la práctica una fuerte correlación entre la edad de la tubería y la posibilidad de roturas y fallos. Por tal motivo es necesario considerar en la valoración como un factor de influencia, la edad de la tubería y también el periodo de instalación de la misma; que como ya se ha comentado, aparece en diversos estudios como un factor determinante que establece diferencias entre tuberías de la misma edad.

#### **3.1.2 Número de roturas acaecidas**

El número de fallos y roturas que ha sufrido una tubería, es un indicador de gran valor para poder establecer correlaciones con todos los posibles factores de influencia (diámetro, material, edad, etcétera). El registro de estos eventos o incidencias,

---

---

constituye un material de gran valor para poder modelizar estadísticamente los fenómenos de fallo o rotura, al igual que también planificar adecuadamente las acciones de mantenimiento preventivo, y no deberían escatimarse los esfuerzos por parte de la compañía de aguas, en conseguir unos informes completos y fiables de cada incidencia acaecida. Puesto que pueden constituir, una de las herramientas más importantes en la gestión técnica del sistema y en la planificación futura del mismo.

## **3.2 Criterios Funcionales**

### **3.2.1 Disminución de la capacidad hidráulica de la tubería**

Con este factor, se busca evaluar la evolución decreciente de la capacidad hidráulica de la tubería, debido a la disminución del diámetro y el aumento del coeficiente de rugosidad. Además de la posibilidad de fallos o roturas, la pérdida de funcionalidad de una tubería constituye un criterio de valor, para determinar si debe ser sustituida o rehabilitada, puesto que si una tubería deteriorada ya no alcanza la capacidad funcional que de ella se espera, será necesario intervenir para recuperar dicha capacidad. Para evaluar la pérdida de capacidad de las tuberías, se puede utilizar cualquier software de simulación de redes, planteando los escenarios apropiados para la evaluación.

### **3.2.2 Índice de deficiencia en los nodos**

Este índice traduce el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada al suministro de agua hacia los abonados. Permite censar el conjunto de los nodos de consumo donde el suministro no está asegurado (Wagner *et al.* 1988a), de modo que suponemos que debajo de una cierta presión  $P_{inf}$  el suministro del agua ya no puede ser asegurado. Para cada tubería “cortada”, se efectúa un cálculo de la presión con la ayuda de Epanet®, luego se realiza una comparación con la presión  $P_{inf}$ . El umbral inferior permitido para la ciudad de Celaya es de **10 mca.**, según el manual de lineamientos y normas técnicas vigente. Si la presión medida en el nodo de consumo es inferior a la presión mínima, entonces el nodo considerado será considerado como “afectado” mientras la tubería se encuentra indisponible. Este procedimiento permite identificar el conjunto de los nodos perjudicados o afectados. Una vez que estos nodos son identificados, se calcula y se elabora un informe para cada tubería cortada, entre el número de nodos no comunicados y el número total de nodos que constituyen la red.

### **3.2.3 Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia óptimo.**

En cualquier sistema de distribución se desconoce que lo que ocurre con una porción, mayor o menor, del agua que se inyecta en el sistema. Esta agua “incontrolada” no se pierde a través de las fugas en su totalidad (aunque si probablemente en su mayoría), sino que se debe también a otras causas tales como: errores de medición, consumos no medidos y/o no autorizados.

Una de las primeras acciones que se debe emprender el responsable de la gestión del sistema de abastecimiento, es la realización de una auditoria con el fin de evaluar el balance hídrico del sistema. Ahora bien, una vez identificados y cuantificados los distintos componentes del balance, las preguntas inmediatas resultan ser tales como: ¿ la

---

cantidad de agua incontrolada que se ha calculado, es mucha o poca? ¿Excesiva o no? ¿Qué cuantía de recursos debe destinarse a recuperarla y en que proporción?, en general ¿cuan buena o mala es la situación en que se encuentra el sistema, y que es lo que mejor que debe hacerse?.

El análisis de las diferentes opciones existentes, para mejorar la gestión de una red de distribución de agua, requiere previamente como se ha mencionado, la realización de una revisión y valoración del estado del sistema, es decir una auditoria mínima.

Es bastante que nos indique claramente cuales son las insuficiencias encontradas en todo el proceso de calculo de los indicadores objetivo programados, pues una vez conocido el diagnóstico, corresponde a la empresa del sistema tomar la decisión de sumergirse o no en la política de la mejora continua de la red.

La auditoria, y más concretamente, la metodología de discriminación de los volúmenes incontrolados de fuga, y los volúmenes incontrolados consumidos, proporciona el valor de las pérdidas reales anuales, es decir el cuanto de la gestión, pero no nos dice en principio nada sobre el “que hacer”, “hasta cuando seguir así”, “como hacer” y por tanto si merece la pena o no. Por ejemplo la ejecución de un plan inmediato o futuro, de una planificación de actuación cíclica mensual o quizás anual de detección de fugas. Conocer el volumen de fugas existentes no es suficiente para su reparación, porque entre otras cosas, no se conoce su localización, y para su eliminación esto es algo obviamente imprescindible.

### **3.3 Criterios Misceláneos**

#### **3.3.1 Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir yHoward**

Pese a que el modelo propuesto por Shamir y Howard (1979), es considerado como uno de los primeros modelos para la renovación de tuberías, no ha perdido aplicabilidad y sigue siendo interesante su aplicación en el contexto que experimenta con la edad de la tubería como un factor más de influencia. Lo más relevante del modelo de Shamir y Howard, es que está basado en una regresión exponencial, que describe el crecimiento del índice de fallos por km y año. Este factor permite, además, iniciar una primera aproximación para la valoración económica en la decisión de la renovación de tuberías. En resumen, este modelo sopesa los costes de las reparaciones, contra los costes de la sustitución de las tuberías, dando como punto óptimo de sustitución, aquel en el que los costes de mantenimiento de la tubería superan el coste de sustitución o rehabilitación. En nuestro caso, las tuberías cuyo tiempo de renovación óptimo sea más corto (esté más cercano), serán penalizadas con un puntaje mayor en la jerarquía.

#### **3.3.2 Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua.**

Dentro de las redes de distribución existen abonados con una gran variedad de volumen de consumo, que pueden ser más importantes para la compañía atendiendo a ese volumen, y en consecuencia, no se puede valorar igual una afectación en el servicio, de modo que sea deficiente o que no se llegue a realizar el suministro por completo, o de manera momentáneamente en un sector que otro de la red. Es de suma importancia para la empresa de aguas valorar para cada tubería el grado de afectación de los usuarios,

---

---

dependiendo del tipo de usuario, así como la influencia respecto al comportamiento de la presión y del servicio prestado. Por ejemplo, la empresa de agua JUMAPA de la ciudad de Celaya tiene localizados geográficamente los consumidores importantes desde el punto de vista de los volúmenes consumidos, los cuales son considerados como consumidores “mayores”, y estos grandes usuarios reaccionaran de forma diferente que los abonados domésticos ante un servicio deficiente o inexistente. Este factor pretende poner el valor en cuanto a la diferencia cuantitativa de los usuarios.

### **3.3.3 Impacto de una rotura en el entorno**

En la bibliografía se menciona el esfuerzo que se ha hecho para considerar la cuantificación de una rotura en el entorno de las redes de agua potable, lo cual resulta por demás complejo; dado que no son magnitudes numéricas que se puedan traducir a una misma escala, resultan ser valoraciones que en ciertas ocasiones sobrepasan el límite de la objetividad, al generarse como interpretaciones de la situación por parte de la persona que evalúa. Es entonces imprescindible, si lo que se desea es evaluar este aspecto, utilizar escalas semánticas que traduzcan al lenguaje matemático conceptos que como ya se ha dicho son de naturaleza cualitativa.

Las valoraciones que se realizan en general en la bibliografía, son valoraciones semánticas y se valora el impacto que pueda tener una rotura en el entorno, como se ha mencionado, una rotura podrá tener diferente impacto según donde se localice geográfica y topológicamente. Tanto en los daños que pueda ocasionar en el aspecto económico, administrativo como social, por ejemplo si las roturas se sufren continuamente en un sector muy transitado vehicularmente, tendrán repercusiones fuertes para la empresa de aguas, caso contrario si la rotura sucede en una zona de tráfico moderado o escaso, de tal manera que es indispensable realizar dicha consideración.

## **4 Identificación de alternativas: tuberías objeto de estudio**

Para la determinación respecto a las tuberías que deberán ser objeto de este estudio, se consideraron sectores hidráulicamente aislados y grupos de tuberías homogéneas respecto al diámetro, edad, sector, etcétera. Como se ha venido mencionando en párrafos anteriores, cabe resaltar que los sectores fueron seleccionados contemplando que fueran representativos de la red de la ciudad de Celaya, un factor importante es la consideración las tuberías mas antiguas, que se localizan en el sector centro, el cual cuenta con diferentes tipos de material de la tubería. Se harán estudios y modelación de los sectores mencionados.

Dicha aplicación requerirá la disposición de una base de datos completa y enlazada con un sistema de información geográfica, además de los recursos informáticos que permitan procesarla con agilidad. Otra consideración importante es que los factores seleccionados y la priorización que se obtenga, se tomaran en consideración por la empresa de aguas de la ciudad de Celaya para aplicar los recursos financieros disponibles. En la figura 5.7 quedan reflejadas las tuberías planteadas y la topología de las diferentes redes en cada uno de los sectores, obtenidas del modelo en funcionamiento normal de la red.

Los esquemas mostrados, que corresponden a los modelos hidráulicos de los cuatro sectores analizados, se realizaron con Epanet®, y son parte esencial en el proceso del presente análisis.

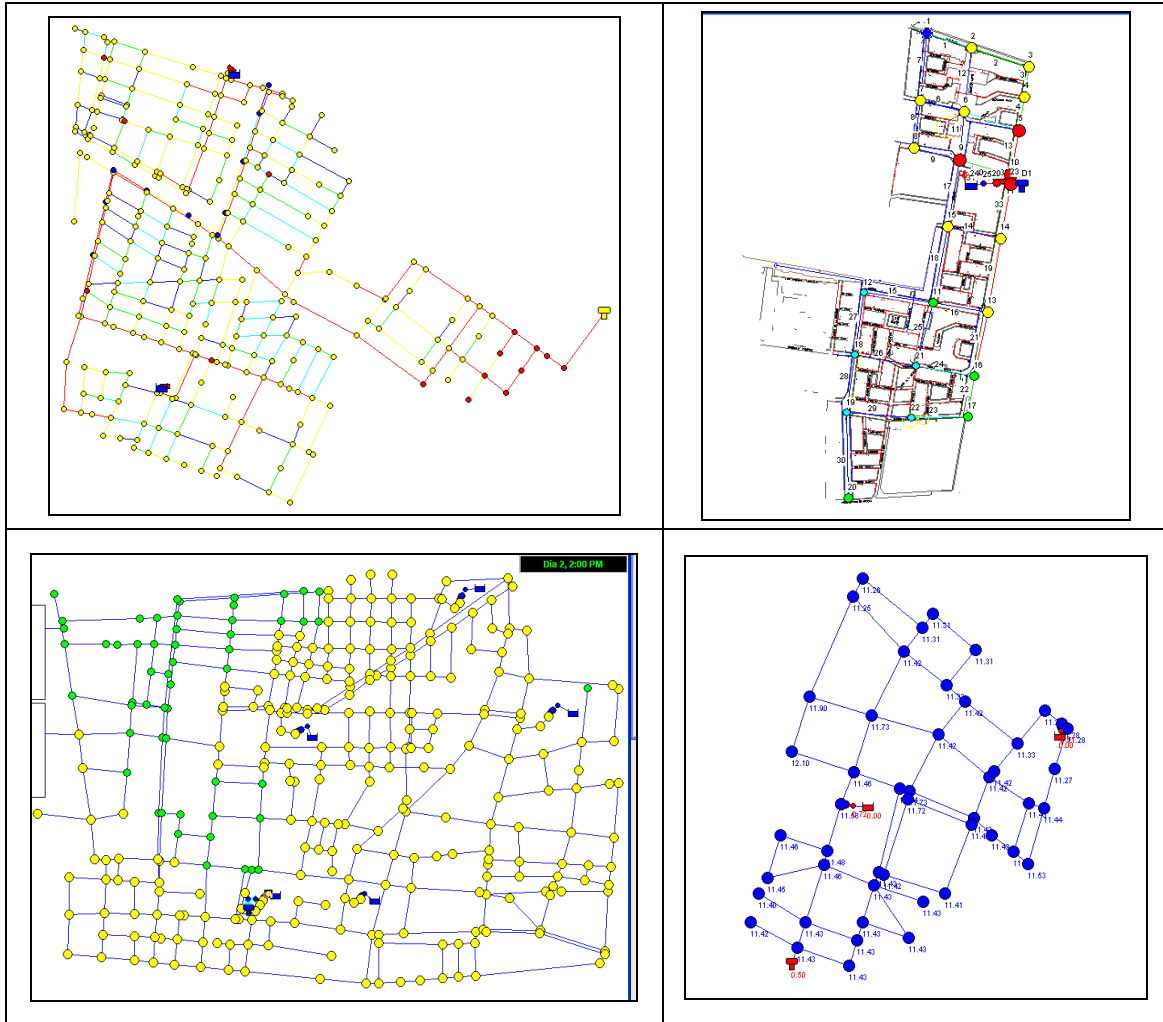


Figura 5. 7 Modelos hidráulicos de los cuatro sectores analizados

## 5 Evaluación de las tuberías seleccionadas según los criterios definidos

Seguidamente a la definición de los factores que se van a tomar en consideración, para la evaluación de las tuberías, se procederá a la evaluación y valoración de dichos factores, lo que nos indicará la importancia de cada uno de ellos en las diferentes tuberías.

### 5.1 Criterios Básicos

#### 5.1.1 La edad y el periodo de instalación de la tubería

Las tuberías más antiguas de la red de distribución de la ciudad de Celaya, son de fundición (Fo-Fo) y acero galvanizado (Fo-Ga), le siguen las de asbesto-cemento (A-C)

las cuales se instalaron en la década de los 70's, siendo el estado de Guanajuato uno de los pioneros en la instalación de este material en México. Posteriormente se continúa con materiales constituidos por polímeros como el PVC y el polietileno de diferentes densidades, en el caso del distrito analizado en este trabajo, denominado San Juanico las circunstancias identificadas por la empresa de agua, es que el proceso de "junteo" de este tipo de material no se realizó como marca la normativa vigente, esto se ha detectado al momento de reparar el número significativo de fugas que se reparan en el sector, a pesar de ser la tubería con menor antigüedad. De tal manera como se ha comentado, los diferentes periodos de instalación, muestran diferentes características en los fallos de las tuberías, y estas características son más dependientes de la práctica de construcción o proceso de instalación, para cada periodo.

Por tal motivo, para la valoración de este factor, se contempla la conjugación de ambos elementos, tanto la edad de la tubería como el periodo de instalación, y la ecuación que valora dicho factor es la siguiente:

$$Puntuación (edad) = \frac{Edad}{T_{ev}} * Valor P_{inst.} \quad (5.2)$$

donde  $T_{ev}$  se refiere al tiempo de vida esperado, Valor  $P_{inst.}$  Es el valor del periodo de instalación y dependerá de la calidad de instalación en cada época, para cada uno de los distintos materiales de la tubería. Cabe mencionar que el valor del periodo de instalación se basa en los antecedentes y en la recopilación de datos por parte de JUMAPA, el rango es de 1 a 5; donde el mayor valor se refiere a la peor calidad de instalación, del periodo de instalación para cada tipo de material. En la tabla 5.12 se muestran los resultados para este factor.

ID Linea	Valor periodo instalación	Tiempo vida esperado	Edad	Edad/Tvr	Edad/Tvr * Vpinst.	Interpolación
AC A1	2	50	40	0.80	1.60	10.00
AC A2	1.5	50	30	0.60	0.90	5.63
Fo Fo C1	2	90	50	0.56	1.11	6.94
Fo Ga C1	2.5	80	50	0.63	1.56	9.77
Fo Ga C2	3	80	40	0.50	1.50	9.38
PVC 30	2	60	30	0.50	1.00	6.25
PVC 20	2	60	20	0.33	0.67	4.17
Polietileno	5	60	10	0.17	0.83	5.21

Tabla 5. 12 Resultado de la valoración de la edad y periodo de instalación

Una vez que se han realizado los cálculos, se determina la interpolación, donde el valor mas alto del resultado de la ecuación 5.2, se le asignara un valor igual a 10, y el resto de manera proporcional como se muestra en la grafica de la figura 5.8.



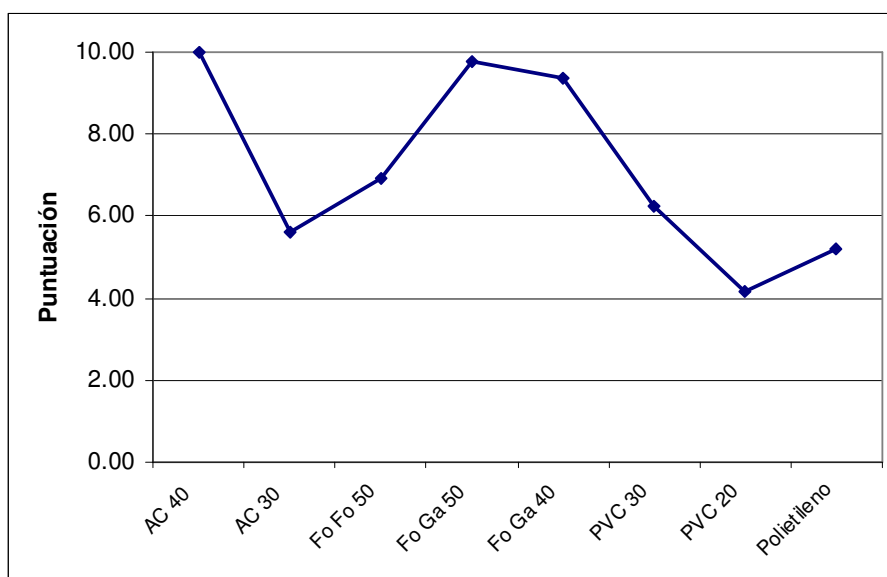


Figura 5. 8 Valoración de la edad de la tubería

### 5.1.2 Historial de fugas de cada tubería

La red de la ciudad de Celaya dispone de un historial de roturas y fugas producidas durante los últimos 10 años, y de años anteriores de manera intermitente. El número de fugas de cada uno del grupo de tuberías de estudio está representado en la tabla 5.13. Podemos observar que la mayor cantidad de fugas, corresponde al sector de Jardines, donde la tubería es de PVC y cuenta con una edad de 30 años, pero también es el sector con una mayor longitud. El material que ha tenido menos fugas es el de asbesto-cemento con una edad de 30 años, siendo el grupo de tuberías de menor longitud total.

ID Línea	Longitud m	Edad	Número de roturas (año)
AC (A1)	12605	40	310
AC (A2)	7243	30	164
Fo Fo (C1)	11613	50	240
Fo Ga (C1)	8600	50	196
Fo Ga (C2)	7540	40	184
PVC30	25201	30	425
PVC20	11548	20	208
Polietileno	13865	10	311

Tabla 5. 13 Número de roturas por tipo de tubería

Para poder establecer una base uniforme de comparación, no podemos hacerlo directamente computando las tasas de fallo o rotura en una tubería, sino que es necesario calcular el número de roturas por unidad de longitud (km) y unidad de tiempo (año), para poder realizar la valoración de cada una de las tuberías (ver tabla 5.14). La valoración se realizará mediante una interpolación lineal, asignando un valor de 10 al máximo número de roturas y un valor 0 a la tubería que obtenga 0.5 roturas por km y año.

ID Línea	Longitud m	Edad años	Número de roturas (roturas/km/ año)	Interpolación
AC (A1)	12605	40	4,09	10,00
AC (A2)	7243	30	3,77	9,18
Fo Fo (C1)	11613	50	3,44	8,36
Fo Ga (C1)	8600	50	3,79	9,25
Fo Ga (C2)	7540	40	4,06	9,92
PVC30	25201	30	2,81	6,78
PVC20	11548	20	3,00	7,26
Polietileno	13865	10	3,73	9,10

Tabla 5. 14 Puntuación de cada tubería en función del número de roturas / km/ año

## 5.2 Criterios Funcionales

### 5.2.1 Capacidad de transporte de cada tubería

Como ya se mencionó en este apartado, se valora la capacidad de transporte de cada tubería, y por lo tanto es necesario conocer su diámetro y su rugosidad absoluta real. Se considera que la rugosidad de la tubería aumenta con el paso del tiempo y con otras características, como son el tipo de material, la calidad del agua trasegada, etcétera, pudiendo determinar (o estimar) la rugosidad absoluta para un momento de tiempo dado a través de la ecuación 5.3.

$$k_{si}(t) = k_{soi} + a_i(t + g_i) \quad (5.3)$$

Donde  $k_{soi}$  es la rugosidad de la tubería nueva (mm),  $a_i$  es el crecimiento de la rugosidad (mm/año),  $t$  es el número de años entre el actual y el momento para el cual se quiere determinar la rugosidad,  $g_i$  es la edad inicial del tubo (años),  $D_i$  es el diámetro del tubo  $i$  (mm).

Por otro lado, el diámetro real del tubo para un instante de tiempo dado es calculado mediante la ecuación 5.4:

$$D_i(t) = D_{oi}(1 - red_i(t + g_i)) \quad (5.4)$$

Donde  $D_{0i}$  es el diámetro real en mm. para el tubo nuevo según catálogos, y  $red_i$  es la reducción anual del diámetro del tubo ( $\text{años}^{-1}$ ).

Con la formulación anterior tomada del modelo planteado por Sharp y Walski (1998), se puede determinar el funcionamiento de una red de distribución de agua potable, para un instante de tiempo dado, considerando el incremento de la rugosidad de las tuberías y el taponamiento de las mismas, por incrustación de materiales, considerando que ambos fenómenos varían linealmente respecto al tiempo. Derivado de lo anterior se puede calcular las pérdidas de carga por km de tubería reales, lo que se realiza a través del modelo de simulación empleando Epanet®.

ID Línea	Longitud m	Edad	Reducción del diámetro %
AC (A1)	12605	40	6,00
AC (A2)	7243	30	5,26
Fo Fo (C1)	11613	50	8,12
Fo Ga (C1)	8600	50	7,08
Fo Ga (C2)	7540	40	7,46
PVC30	25201	30	3,14
PVC20	11548	20	2,45
Polietileno	13865	10	1,80

Tabla 5. 15 Porcentaje de reducción del diámetro

La forma de valorar este criterio es realizar el cálculo de la pérdida de la capacidad hidráulica, mediante una simulación hidráulica de los dos escenarios –antes y después de la pérdida de capacidad-, para una tubería con características nuevas y para la tubería en condiciones actuales, para lo que se emplearan las siguientes expresiones:

$$\text{Pérdida de capacidad hidráulica} = h'f - hf \quad (5.5)$$

$$\text{puntuación} = \frac{h'f - hf}{h'f} * 10 \quad (5.6)$$

ID Línea	Longitud m	Edad	Perdida de la capacidad (mca)	Puntuación
AC (A1)	12605	40	2,73	3,98
AC (A2)	7243	30	2,44	4,64
Fo Fo (C1)	11613	50	3,51	5,02
Fo Ga (C1)	8600	50	3,26	4,73
Fo Ga (C2)	7540	40	3,11	4,10
PVC30	25201	30	1,12	4,92
PVC20	11548	20	2,31	4,27
Polietileno	13865	10	0,98	2,86

Tabla 5. 16 Puntuación de la capacidad hidráulica

### 5.2.2 Índice de deficiencia en los nodos

Con este índice, se pretende evaluar el impacto al suministro de agua hacia los abonados en cada uno de los sectores, con la indisponibilidad de una tubería dada, en lo que se refiere a la presión inferior disponible en horas punta. Se evaluará con la ayuda de Epanet® el comportamiento de la presión de la red, al simular el cierre de cada una de las tuberías, con lo cual se conocerá la importancia de las mismas y su impacto en el comportamiento de la presión en la proximidad, y en general de la tuberías que se cerrarán en la simulación, estableciendo la comparación con la presión inferior permitida, que es de 10 mca. Este procedimiento permite identificar el conjunto de los nodos afectados o que no cumplen con los requerimientos mínimos demandados por los abonados, como ya se mencionó. Una vez que estos nodos son identificados, se calcula para cada tubería “cortada” el número de nodos no comunicados, y se elabora el informe entre el número de nodos no comunicados y el número total de nodos que constituyen la red. La implementación se ha realizado con la macro IDN en VBA con la ayuda de la herramienta Toolkit de Epanet®, desarrollada por la EPA (ver figura 5.9). La evaluación del índice en específico se llevará a cabo a través de la expresión:

$$IDN_j = \frac{\text{Numero de nodos}_{inf}}{\text{Numero de nodos total}} \quad (5.7)$$

Se realizará una penalización por el número de tuberías que afecten a los nodos por debajo de la presión inferior permitida, siendo esta mayor cuanto mayor sea el número de tuberías que afecten a los nodos que se encuentran por debajo de la presión mínima permitida, es decir, el sector que cuente con menor número de tuberías “importantes” tendrá una mayor penalización, debido al factor de redundancia en cada uno de los sistemas de distribución. La puntuación será establecida con un valor de diez para el IDN mayor y cero para el índice menor, de forma proporcional al valor del IDN.

Cabe mencionar que este mismo criterio será utilizado posteriormente en otro apartado, pero se agregaran otras variantes.

Una vez realizada la aplicación de la expresión 5.6 en cada uno de los grupos de las tuberías se obtienen lo resultados mostrados en la tabla 5.17.

ID Línea	IDN %	Número de tuberías "importantes"	Puntuación
AC (A1)	21	6	4,1
AC (A2)	38	5	5,8
FoFo (C1)	32	4	5,2
Fo Ga (C1)	26	4	4,6
Fo Ga (C2)	35	4	5,5
PVC30	16	7	3,6
PVC20	35	4	5,5
Polietileno	80	3	10,0

Tabla 5. 17 Valores de los índices de deficiencia en los nodos

El valor mayor resulta para la tubería de polietileno, localizada en el sector San Juanico.

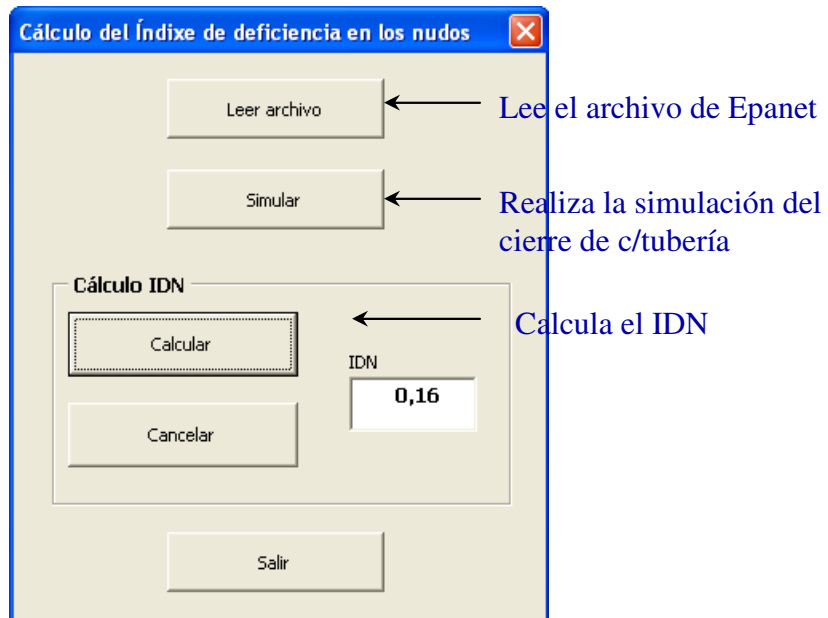


Figura 5. 9 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos

Respecto a la elaboración de la macro, su funcionamiento es el siguiente: se carga el

archivo de salida de EPANET con extensión \*.inp, lee los datos de EPANET a través de la herramienta de la librería Toolkit. La herramienta Toolkit permite a los desarrolladores personalizar la ingeniería computacional de EPANET para necesidades específicas personales, a través de interfaces de diversos lenguajes computacionales entre ellos Visual Basic, que es el que se utiliza en esta aplicación. Esto se puede hacer directamente en Excel, desde un botón de comando en Visual Basic, una vez que es llamado el archivo. Se realiza la simulación del cierre de cada una de las tuberías, a través del botón de comando de “simular”, como aparece en la figura 5.9.

Posteriormente, se obtiene el conjunto de resultados y se vuelcan sobre la hoja de Excel dichos resultados, obteniendo los resultados de la simulación. Se realiza el algoritmo de cálculo del índice respectivo, en donde se aplica la solución de las ecuaciones, mediante el uso de subrutinas. Es así de una manera general, como se elaboro la macro que nos facilitara el cálculo del índice mencionado.

### 5.2.3 Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo.

En la red de la ciudad de Celaya, el caudal de fugas es muy significativo. Como se ha podido constatar por el departamento de recuperación de agua, el mayor problema al que se han encontrado es la localización espacial de dichos volúmenes, los cuales según su dimensión afectan al comportamiento de la red, disminuyendo la presión y demeritando el servicio prestado a los usuarios.

De esta manera, y dado que el caudal fugado en la red es de una importante proporción respecto al total inyectado, resulta necesario evaluar la manera en que la red se resiente ante la existencia de las fugas, en cada una de las tuberías que se han incluido en el presente estudio. Considerando que los efectos de la ocurrencia de una fuga son diferentes, dependiendo de la tubería donde sucede, se antoja acertado asumir que aquella que genere una mayor afectación (traducida en una disminución de la presión) en más nodos ante dicho fallo, sea penalizada con mayor intensidad, que otra que no tenga tanta influencia en la red. Se analiza el descenso de presión en los nodos vecinos y se efectúa la penalización en función del número de nodos afectados, y del descenso de presión en horas punta de la demanda. Este criterio de alguna manera sanciona la influencia en el consumo de los nodos afectados, además de las variaciones sufridas en el nodo de la tubería analizada, donde se presenta la fuga.

Se compara la simulación realizada con Epanet® de la red con una eficiencia física del 85%, ratio considerado como satisfactorio (AWWA Leak Detection and Water Accountability Committee, 2004), contra los resultados de la simulación realizada con los datos reales actuales. Todo esto se realizara con el método descrito en el apartado 2.1.5 respecto al asignación de las fugas dependientes de la presión. Lo mismo sucede con el porcentaje del 85% de eficiencia, donde el caudal fugado en cada nodo se realiza en base a la presión, la evaluación se realizara con la expresión 5.8.

$$IIQ_{fuga} = \frac{Num.nodos_{inf\ 85\%} - Num.nodos_{inf\ real}}{Numero\ de\ nodos\ total} \quad (5.8)$$

La puntuación se realiza del siguiente modo: el valor mayor obtenido de la expresión 5.8 para cada grupo de tubería, se le asignara el valor de 10 y para el menor el valor de cero, realizando una interpolación lineal para los valores intermedios.

ID Línea	IIQ <sub>fuga</sub>	Puntuación
AC (A1)	21	0,00
AC (A2)	38	2,45
FoFo (C1)	17	0,55
Fo Ga (C2)	62	4,62
Fo Ga (C2)	52	3,72
PVC30	48	3,24
PVC20	92	10,00
Polietileno	36	2,23

Tabla 5. 18 Valores de los índices de impacto del caudal fugado

La implementación es realizada con la macro IIQ en VBA con la ayuda de la herramienta Toolkit de Epanet® desarrollada por la EPA, en la figura 5.10 se muestra el esquema de la macro.

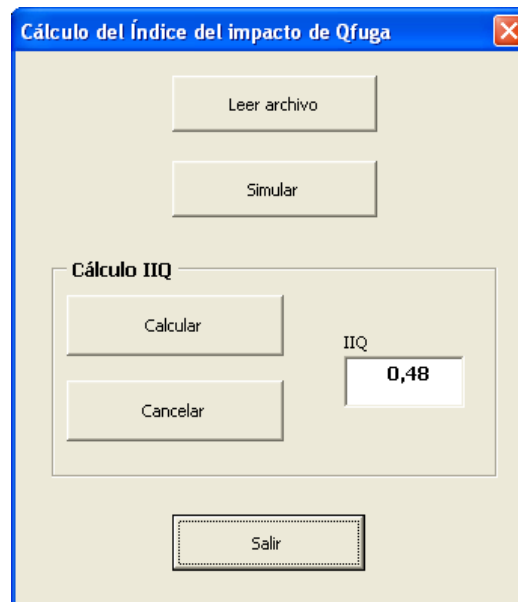


Figura 5. 10 Macro IIQ que calcula el índice del impacto del  $Q_{fuga}$  en la red

## 5.3 Criterios Misceláneos

### 5.3.1 Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir y Howard

En la gran mayoría de las empresas de agua se cuenta con una base de datos de registro de fugas, en unos con una mejor estructura que otras, también con una variación muy amplia en cuanto a la calidad y cantidad de los datos. Este registro de fugas es la primera aproximación en el intento de obtener una estructura y una metodología, para la toma de decisiones en la rehabilitación de tuberías, es claro que se deben de considerar una serie de factores, como ya se han mencionado a lo largo de este trabajo.

Se han publicado una serie de enfoques analíticos y de optimización para la ayuda en la toma de decisiones sobre el reemplazo de tuberías, basado en el historial de fugas. Un trabajo clásico que la inmensa mayoría de los documentos publicados toman como referencia es el trabajo presentado por Shamir y Howard (1979), trabajo que propone un modelo analítico para la toma de decisiones en la sustitución de tuberías, basado en el historial de las roturas de las tuberías, así como el coste de reparación y sustitución de las mismas. Shamir y Howard fueron los primeros en sugerir que el índice de roturas en las tuberías se incrementa de manera exponencial con la edad de la tubería, pudiendo obtener predicciones de roturas futuras. Asimismo afirman que el momento óptimo para la sustitución de tuberías existentes se puede obtener utilizando esta metodología.

En este factor se consideran la edad, el material, la distribución hidráulica de una manera homogénea para todas las tuberías de cada sector analizado de la red de Celaya.

$$N(t)_j = N(t_o)_j * e^{A_j(t+g_j)} \quad (5.9)$$

Donde  $N(t)_j$  es el número de roturas por unidad de longitud por año en el tubo  $j$  en el momento  $t$  ( $\text{Km}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ );  $N(t_o)_j$  es el  $N(t)_j$  en el año de instalación del tubo  $j$  (tubo nuevo);  $t$  es el tiempo transcurrido en años;  $g_j$  es la edad del tubo  $j$  en la actualidad (años); y  $A_j$  es el coeficiente de crecimiento de la tasa de roturas del tubo  $j$  ( $\text{años}^{-1}$ ).

ID Línea	Longitud m	Edad	Número de roturas (roturas/km año)	A (año <sup>-1</sup> )	N(t <sub>o</sub> ) (Nº/km/año)
AC (A1)	12605	40	4,099	0,063	0,910
AC (A2)	7243	30	3,774	0,075	0,654
Fo Fo (C1)	11613	50	3,444	0,068	0,638
Fo Ga (C1)	8600	40	3,798	0,067	0,854
Fo Ga (C2)	7540	50	4,067	0,072	0,721
PVC30	25201	30	2,811	0,070	0,487
PVC20	11548	20	3,002	0,058	0,731
Polietileno	13865	10	3,738	0,061	0,876

Tabla 5. 19 Índices y coeficientes de roturas

Observamos que los coeficientes en las tuberías de Fo Fo y Fo Ga, son muy similares y



especialmente se encuentra en zonas contiguas. Estas ecuaciones nos permiten predecir las futuras roturas por kilómetro y año, de cada grupo de tuberías que se representan en la figura 5.11.

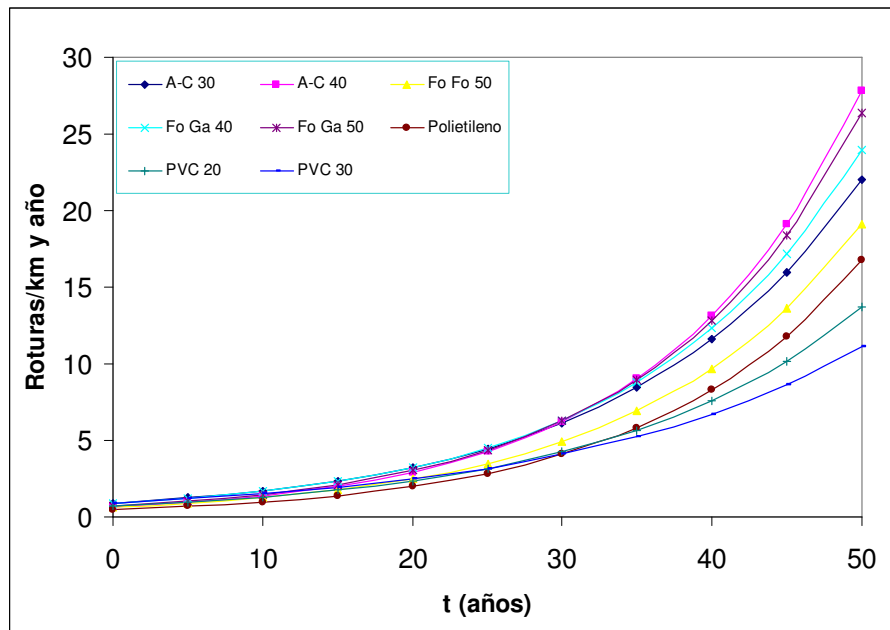


Figura 5. 11 Predicción de roturas en el tiempo

Shamir y Howard (1979) obtienen una expresión (5.10) para calcular el momento óptimo de sustitución de una tubería ( $t_s$ ), sumando el coste de sustitución de la tubería ( $C_s$ ) y los costes de reparación ( $C_r$ ) que hay en el periodo  $t_s-t_0$ , derivando respecto a  $t_s$  se puede obtener el año de sustitución para coste mínimo. En la siguiente ecuación, la variable  $i$  representa el índice anual de inflación y  $t_0$  el año de referencia.

$$t_s = -g_j + \frac{1}{A_j} \ln \left[ \frac{C_s + \ln(1+i)}{C_r N(t_0)} \right] \quad (5.10)$$

El coste de sustitución de una tubería incluye todos los conceptos de la integración de los precios unitarios, desde la demolición de pavimento en calzada o acera, el proceso de excavación, suministro e instalación de la tubería incluidas las piezas especiales, el montaje y las pruebas necesarias, plantillas y rellenos con material de banco, así como la correspondiente reposición del pavimento existente en acera o calzada. También se incluye la retirada de los escombros a vertedero y el canon de vertido, en la tabla 5.20 se resumen los costes de sustitución para los diversos diámetros.

<b>COSTE DE SUSTITUCION</b>					
<b>Diámetro</b>	<b>Fofo</b>	<b>FoGa</b>	<b>A-C</b>	<b>POLIET.</b>	<b>PVC</b>
75	439,55	439,55	439,55	439,55	439,55
100	484,44	484,44	484,44	484,44	484,44
150	546,31	546,31	546,31	546,31	546,31
200	654,91	654,91	654,91	654,91	654,91
250	793,76	793,76	793,76	793,76	793,76
300	869,94	869,94	869,94	869,94	869,94
350	1217,74	1217,74	1217,74	1217,74	1217,74

*Tabla 5. 20 Costes de sustitución para los diversos diámetros*

En el análisis de precios unitarios de la empresa “JUMAPA” para el coste de reparación, los conceptos que se consideran para la integración del precio unitario son: los referentes a el coste de excavación, el material para reparar la fuga, mano de obra, el material de banco para el relleno de la excavación, la rotura y reposición del asfalto, retiro del material sobrante de la excavación y los costes indirectos correspondientes.

<b>COSTE DE REPARACION</b>					
<b>Diámetro</b>	<b>FoFo</b>	<b>FoGa</b>	<b>A-C</b>	<b>POLIET.</b>	<b>PVC</b>
75	1657,44	1657,44	1657,44	1657,44	1657,44
100	1746,23	1746,23	1746,23	1746,23	1746,23
150	1894,20	1894,20	1894,20	1894,20	1894,20
200	1921,74	1921,74	1921,74	1921,74	1921,74
250	2042,31	2042,31	2042,31	2042,31	2042,31
300	2286,00	2286,00	2286,00	2286,00	2286,00

*Tabla 5. 21 Costes de reparación para los diversos diámetros*

Para la valoración subjetiva de este criterio, se propone no penalizar las tuberías cuyo año de renovación óptimo es mayor o igual de 25 años, y penalizar con 10 puntos a las tuberías con un valor de  $t_s - t_c = 0$  años, considerando que las tuberías mas recientes y de mejor material cuentan con una edad entre 20 y 30 años, excepto las de polietileno, que como ya se ha mencionado cuenta con características muy particulares desde su instalación. Las puntuaciones intermedias se obtendrán realizando una interpolación lineal entre los valores de 0 y 10. Los resultados se presentan en la Tabla 5.22

ID Línea	Longitud (m)	Edad (años)	ts	ts-t	Interpolación
AC (A1)	12605	40	45,87	5,87	7,19
AC (A2)	7243	30	54,53	24,53	0,00
Fo Fo (C1)	11613	50	57,57	7,57	6,33
Fo Ga (C1)	8600	40	52,44	12,44	3,85
Fo Ga (C2)	7540	50	50,36	0,36	10,00
PVC30	25201	30	61,44	31,44	0,00
PVC20	11548	20	62,21	42,21	0,00
Polietileno	13865	10	51,24	41,24	0,00

Tabla 5. 22 Puntuación para los tiempos de renovación

### 5.3.2 Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua.

En los diferentes sectores que se han seleccionado, existen abonados con consumos mensuales considerables por encima de 100 m<sup>3</sup>, usuarios de diversos usos para los que la falta de suministro o un servicio deficiente, puede causar pérdidas considerables, y problemas administrativos y sociales a la JUMAPA. En el sistema geográfico de la empresa de aguas (JUMAPA), existe una base de datos con los consumos “mayores” mensuales de cada abonado en cada sector, localizados geográficamente. En la figura 5.12 se muestra la localización geográfica de los consumidores mayores, de uno de los sectores, así como en la tabla 5.23 se presenta el número de consumidores “mayores” en cada sector.

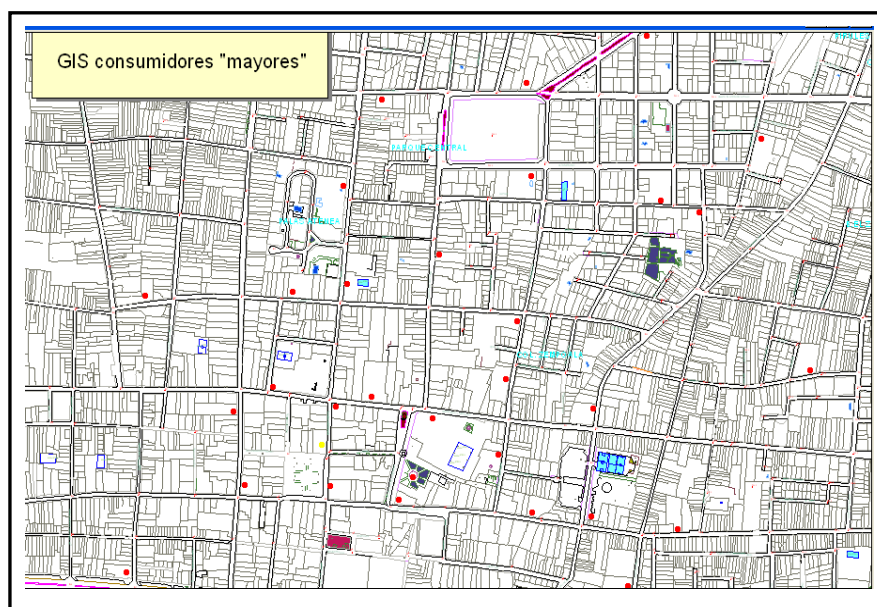


Figura 5. 12 Esquema de un sector de la localización geográfica de los consumidores “mayores”

Se han considerado para el tipo de usuario, la clasificación de la JUMAPA para los consumidores denominados “mayores”, que son aquellos usuarios que consumen 100 m<sup>3</sup> mensuales por acometida o más. En la tabla 5.23 se presenta el número total de usuarios mayores en cada sector.

TIPO USUARIO	Centro	Jardines	San Juanico	Girasoles
Asistencia social	4	1	0	0
Comercial alto	31	3	1	1
Comercial medio	12	2	2	1
Domestico C	10	21	0	1
Industrial A	3	0	0	0
Instituciones educativas	5	3	3	2
Mercados distritales	3	0	0	0
Servicios públicos	4	0	0	1
Hospitales	2	0	1	0
<b>total</b>	<b>74</b>	<b>30</b>	<b>7</b>	<b>6</b>

*Tabla 5. 23 Tipo y número de usuarios mayores por sector de análisis*

A continuación, se simula en el programa Epanet® (EPA, 2000), el corte de cada tubería iniciando por las tuberías de la red principal, y se analizan el número de nodos afectados en hora punta (09:00 h). Además del grado de influencia de este corte en cada nodo, se mide el descenso de presión originado, así como el número de nodos donde se localizan los consumidores importantes.

El comportamiento de la red, al hacer la simulación del cierre de las tuberías, es diferente en cada sector; por ejemplo, en los sectores de Girasoles y San Juanico que se alimentan de una sola fuente, el comportamiento al cerrar cada una de las tuberías en lo que respecta a la línea común, que sale de cada uno de los pozos y posteriormente se divide en dos ramales principales, da lugar a una caída de presión en una gran parte de los nodos, debido a la gran afección de las tuberías principales de alimentación.

En la misma proporción se ven afectados los consumidores “mayores” que se encuentran en cada área del sector. En lo que respecta a los sectores del Centro y Jardines, que cuentan con dos o más fuentes de alimentación, el comportamiento es diferente. Consideramos que es debido al factor de la redundancia, pues influye en el momento de la valoración.

En la tabla 5.24 se ilustra los cálculos realizados para un sector, en el que un nudo considerado crítico debe de cumplir dos condiciones:

- 1ª.- El nodo debe estar por debajo del umbral permitido, para la ciudad de Celaya es de **10 mca.**

- 2ª.- No cumplir con el suministro parcial o totalmente, según sea el caso a un usuario considerado como “mayor”.

ID Nodo	Consumo	Tuberías cerradas					Tuberías cerradas				
		13	23	33	19	21	13	23	33	19	21
							Presión m	Presión m	Presión m	Presión m	Presión m
Conexión 1	0	no	no	no	no	no	6,75	0,00	12,32	14,72	14,79
Conexión 2	0	no	no	no	no	no	6,74	0,00	12,49	14,76	14,82
Conexión 3	0	no	no	no	no	no	6,64	0,00	12,97	14,84	14,89
Conexión 4	0	no	no	no	no	no	6,84	0,00	13,42	15,13	15,17
Conexión 5	0	no	no	no	no	no	6,85	0,00	13,63	15,21	15,25
Conexión 6	0	no	no	no	no	no	7,47	0,00	11,82	15,09	15,17
Conexión 7	0	no	no	no	no	no	7,08	0,00	11,11	14,57	14,66
Conexión 8	1	1	1	no	no	no	8,32	0,00	11,04	15,07	15,16
Conexión 9	1	1	1	no	no	no	8,47	0,00	11,13	15,17	15,26
Conexión 10	0	no	no	no	no	no	16,38	0,00	15,78	16,28	16,3
Conexión 11	2	no	2	2	2	2	12,87	7,52	0,00	0,00	0,00
Conexión 12	0	no	no	no	no	no	12,46	7,14	0,00	0,00	0,00
Conexión 13	2	no	2	2	2	no	13,83	8,69	0,00	0,00	15,29
Conexión 14	0	no	no	no	no	no	14,04	9,06	0,00	0,00	14,9
Conexión 15	0	no	no	no	no	no	13,77	7	0,00	0,00	14,68
Conexión 16	0	no	no	no	no	no	12,80	7,56	0,00	0,00	0,00
Conexión 17	0	no	no	no	no	no	12,76	7,52	0,00	0,00	0,00
Conexión 18	0	no	no	no	no	no	12,27	7,02	0,00	0,00	0,00
Conexión 19	0	no	no	no	no	no	12,67	7,42	0,00	0,00	0,00
Conexión 20	0	no	no	no	no	no	12,80	7,55	0,00	0,00	0,00
<b>Max</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>22</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>9</b>
		<b>0,33</b>	<b>1</b>	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,33</b>	<b>0,41</b>	<b>1,00</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,41</b>
		0,74	2,00	1,21	1,21	0,74					
<b>Promedio N=30</b>	<b>1.18</b>	<b>3,70</b>	<b>10,0</b>	<b>6,03</b>	<b>6,03</b>	<b>3,70</b>					

Tabla 5. 24 Concentrado y puntuación del resultado del cierre de las tuberías

Para realizar los cálculos de una manera más ágil y sistematizada, se creó la Macro\_Influencia de un corte en los usuarios. Al igual que en los otros factores se empleó la herramienta de Epanet® Toolkit para la elaboración de dicha macro y la simulación del cierre de cada una de las tuberías. En la figura 5.13 se muestra el esquema de la macro mencionada.

La valoración de la puntuación es bastante subjetiva, pero en este caso, optamos por darle un peso a la fiabilidad de cada una de las tuberías en cada sector, así como un peso en el mismo sentido a la fiabilidad del suministro, con una presión mínima a los

consumidores “mayores”.

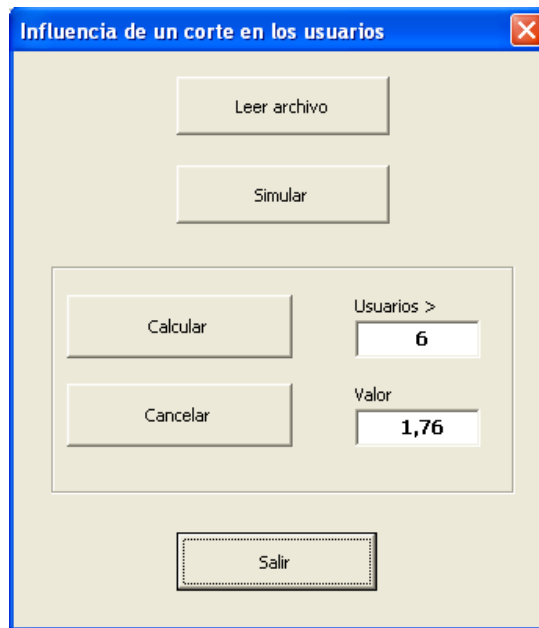


Figura 5. 13 Macro IDN que calcula el índice de deficiencia en los nodos

Como mencionamos, la puntuación es demasiado subjetiva, y por tal motivo nosotros hemos considerado darle la misma importancia a la valoración del número mayor de nodos afectados, igual que al número de los nodos de afectación, de donde se alimentan los consumidores “mayores”, resultando las siguientes puntuaciones que se muestran en la tabla 5.25.

ID Línea	Puntuación
AC (A1)	3,26
AC (A2)	3,04
FoFo (C1)	4,46
Fo Ga (C1)	4,57
Fo Ga (C2)	4,10
PVC30	0,12
PVC20	1,76
Polietileno	1,12

Tabla 5. 25 Puntuación final

Cabe mencionar que la puntuación en ninguno de los sectores alcanza el valor de 10, porque se realizó un promedio del número de tuberías que afectaban a cada criterio seleccionado, es decir; a la disminución de la presión de los nodos que se encuentran por debajo del umbral de la presión mínima permitida, y por la afectación de la presión

de los nodos de los cuales se alimentan los usuarios “mayores”. Algunas tuberías dentro de cada sector si alcanzaron el valor de 10 pero existían otras en el mismo sector con valores bajos; por tal motivo al realizar la media aritmética ningún sector alcanza el valor de 10.

### 5.3.3 Impacto de una rotura en el entorno

Existe el antecedente en la ciudad de Celaya, de roturas con efectos e impactos económicos catastróficos para la empresa de aguas “JUMAPA”, por citar alguno, como fue el evento sucedido en pleno centro de la ciudad al reventarse una línea de 150 mm, que afectó a varias edificaciones y ocasiono daños estructurales a las mismas, donde su coste de reparación giró alrededor de los 62.000 euros; otro caso fue el más reciente en el año 2005 en el boulevard Adolfo López Mateos, donde una línea de 200 mm alojada sobre las aceras, al reventar ocasionó daños a cuatro vehículos y algunos comercios, con un coste considerable para la “JUMAPA”.

Otro caso particular de la red de abastecimiento de la ciudad de Celaya, es que una gran cantidad de las tuberías se encuentran sobre las aceras, donde las dimensiones son estrechas, por lo que en algunas zonas se encuentra demasiado próximas a las cimentaciones de las edificaciones, complicando su reparación y aumentando el riesgo de ocasionar daños a las mismas. Además, en el centro de la ciudad se encuentra una gran cantidad y variedad de monumentos históricos, con un valor patrimonial e histórico incalculable, con algunas importantes tuberías que se encuentran próximas a ellos, factor que se tiene identificado por la empresa de agua “JUMAPA”.

ID Línea	Densidad del tráfico	Densidad edificios y/o monumentos históricos
AC (A1)	fuerte	medio
AC (A2)	moderado	bajo
FoFo (C1)	moderado	bajo
Fo Ga (C1)	fuerte	alto
Fo Ga (C2)	moderado	medio
PVC30	extremo	nulo
PVC20	débil	nulo
Polietileno	débil	nulo

Tabla 5. 26 Puntuación final de las densidades del trafico/edificios

La puntuación en este caso se realizará con una valoración de 10 para una densidad de tráfico extremo, el valor de 6 para una densidad fuerte, 3 para el caso de una densidad de tráfico moderado y 0 para una densidad débil. Se considera un peso relativo del 60 % para cada uno de los 4 factores analizados, así mismo se aplica la misma escala de valores de la densidad de los edificios y/o monumentos históricos, obteniéndose la puntuación de cada tubería como se muestra en la tabla 5.27.

ID Línea	Puntuación
AC (A1)	6,00
AC (A2)	4,80
FoFo (C1)	4,80
Fo Ga (C1)	10,00
Fo Ga (C2)	4,20
PVC30	6,00
PVC20	0,00
Polietileno	0,00

*Tabla 5. 27 Puntuación final*

Las tuberías menos penalizadas son las de los sectores de Girasoles y San Juanico, donde la densidad de tráfico es relativamente baja, al igual que la nula presencia de edificaciones importantes o monumentos. El caso contrario lo encontramos en la tubería de Acero Galvanizado (Fo-Ga) que se localiza en el centro de la ciudad, donde se encuentran edificios de gran tamaño y varios monumentos históricos con una densidad alta. Finalmente, obtenemos el concentrado de la puntuación final de todos y cada uno de los factores de influencia (ver tabla 5.28), en donde se observa la suma total realizada de manera aritmética.

ID línea	Edad t inst.	Historial fugas	Capacidad transporte	IDN	IIQ <sub>fuga</sub>	Tiempo renovación	Influencia rotura Q	Impacto medio amb	$\Sigma$ aritmética
AC (A1)	10,0	10,00	3,98	4,1	0	7,19	3,26	6	44,53
AC (A2)	5,63	9,19	4,64	5,8	2,45	0	3,04	4,8	35,54
FoFo (C1)	6,94	8,36	5,02	5,2	0,55	6,33	4,46	4,8	41,67
FoGa (C1)	9,77	9,25	4,73	4,6	4,62	3,85	4,57	10	51,39
FoGa (C2)	9,38	9,92	4,1	5,5	3,72	10	4,1	4,2	50,92
PVC30	6,25	6,78	4,92	3,6	3,24	0	0,12	6	30,91
PVC20	4,17	7,26	4,27	5,5	10	0	1,76	0	32,96
Polietileno	5,21	9,10	2,86	10	2,23	0	1,12	0	30,52

*Tabla 5. 28 Concentrado final de valores y la suma aritmética*

Como se puede observar, la puntuación mas alta es para el grupo de tuberías de acero galvanizado (FoGa C1), seguido de las tuberías también de acero galvanizado de 40 años de edad, y de ahí sigue el grupo de tuberías de asbesto-cemento (A1). Esto es sin considerar, ningún peso en cada uno de los factores de influencia, considerando que todos tienen la misma prioridad en la jerarquización.



# Capítulo 6

---

## Modelos de Vulnerabilidad y Eficiencia





---

## 1 Modelo de Vulnerabilidad

Para los gestores de las empresas de agua que operan y toman decisiones, identificar los factores que influyen en la determinación para la priorización en la renovación de las tuberías, no es tarea sencilla, dado que la selección debe soportarse en primera instancia, en la identificación de aquellos criterios fundamentales a la hora de seleccionar la tubería, que debe ser considerada prioritariamente para su renovación. La edad es sin lugar a dudas, el primer criterio a incluir en la lista pero no el único. Aunado a la disponibilidad de los recursos financieros requeridos, y los recursos financieros con los que disponen las empresas de agua que operan las redes de agua potable. El objetivo es mejorar la fiabilidad y el funcionamiento de la red. La priorización en la renovación de las tuberías se efectúa según un proceso de toma de decisión, que tiene en cuenta un conjunto de variables vinculadas a las tuberías y a su medio ambiente, las condiciones de operación de la red, restricciones técnicas y por supuesto financieras.

Los gestores encargados de estructurar los planes de renovación de redes de agua potable acuden tradicionalmente a la experiencia, bien sea adquirida con el paso de los años, o por conocimiento de casos similares en otras compañías, y en muchos casos al seguimiento de políticas reactivas (manejo de emergencias) cuando el problema que atañe, es el relativo a las tuberías que con mayor prontitud deben ser objeto de una intervención. Resulta claro que dadas las habituales circunstancias de limitación en el presupuesto, la problemática de fondo hoy en día no avala una solución, que se base en la renovación de redes sin soportes ingenieriles. Esta opción, lejos de mejorar los indicadores técnicos relativos a las pérdidas reales o físicas en la red, actuará en clara contradicción, con la intención de mantener una sana política de inversión en infraestructura física.

Un plan de renovación de la red con carácter selectivo, acoplado en el engranaje general de una política de gestión de fugas, se convierte en bastión esencial de cualquier estrategia global de gestión del sistema, si en él se evalúan todos los factores relevantes que pueden influir en el desgaste de la misma. Ello implica la consideración de múltiples criterios: además de otros criterios, la edad se presenta como imprescindible; así mismo la consideración de otros como el historial de roturas sufridas por las tuberías de estudio, la predicción de los fallos que a futuro y basados en herramientas de tipo estadístico pueden ocurrir, la capacidad de transporte, la calidad del agua, los posibles efectos medioambientales que una rotura puede causar, etcétera, y en resumen, todos aquellos criterios que aseguren el logro ya no sólo de los objetivos técnicos tradicionales, sino además de objetivos ambientales y sociales, cada día más requeridos por la legislaciones vigentes en los diversos países.

Esto requiere de tal manera, el planteamiento de metodologías que consideren variados criterios de diferente naturaleza, valorando la influencia de estos en diferente grado de importancia sobre el gran objetivo global del plan de renovación. Se pretende entonces, mediante la realización de este estudio, plantear los fundamentos del uso de métodos y herramientas ya aplicados en otros campos de la ciencia, pero esta vez con el objetivo de organizar prioritariamente los grupos de tuberías, en función de la premura con que urge una intervención técnica.

---

Para algunos gestores, aquellas tuberías que han tenido un comportamiento de un número “alto” de incidencia de fugas resultan candidatas a una urgente renovación, pero si se localiza en una zona aislada que abastece a pocos abonados y de tráfico menor, tal vez desaparezca la urgencia como tal. Como para otros gestores aquellas tuberías que llegan a presentar un fallo en zonas con un tráfico de las vías importante, se convierten potencialmente en prioridad para la renovación, o aquellas tuberías de las cuales se abastecen consumidores importantes o grandes consumidores, siendo más importante renovarlas para minimizar el riesgo de fallo y evitar quejas de los abonados.

Hoy en día en México se empiezan a aplicar recursos para la renovación de las infraestructuras hidráulicas, pero el gran problema es el establecimiento del orden de prioridad, dado que en la gran mayoría de las ciudades se cuenta con un porcentaje alto de fugas en las tuberías de edad avanzada, índice de tuberías con fallos altos, etcétera. Y como se menciona en párrafos anteriores, es a través de la experiencia o en ocasiones con escasos datos estadísticos como se toman las decisiones en la renovación.

Por tal motivo, se diseñó un método híbrido de ayuda para la toma de decisión en la priorización de la renovación del grupo de tuberías con características homogéneas, en base a la consideración de la disponibilidad de datos con los que cuentan o pueden contar las empresas de agua. Cabe mencionar que respecto a la disponibilidad de datos en las empresas de agua, ésta es muy variada, como también es la calidad de dichos datos. En lo que se refiere a la ciudad de Celaya, consideramos que el conjunto de datos es bueno en cuanto a calidad y cantidad.

Siguiendo los criterios establecidos, se les aplica una valoración que previamente se determina en un rango del 0 al 10, para su inclusión en el presente estudio.

Como mencionamos anteriormente, la edad de la tubería es un factor importante, pero no el único al momento de tomar la decisión de priorizar las tuberías para la renovación, existen otros factores de influencia que son considerados en la metodología propuesta tales como:

- ⇒ La edad y el periodo de instalación de la tubería
- ⇒ Historial de fugas de cada tubería
- ⇒ Capacidad de transporte de cada tubería
- ⇒ Índice de deficiencia en los nudos
- ⇒ Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia óptimo.
- ⇒ Tiempo de renovación óptimo de la tubería según Shamir y Howard
- ⇒ Influencia de un corte de agua en los diferentes tipos de usuarios de la red de distribución de agua
- ⇒ Impacto de una rotura en el entorno

---

---

## 1.1 Herramientas a utilizar

Para realizar un modelo de aproximación para la priorización en la renovación de tuberías, es necesario el uso de programas de cómputo tales como el programa el Epanet®, que no se utiliza propiamente para la priorización pero si se aplica para las diferentes simulaciones hidráulicas; por otro lado, utilizaremos el programa Evolver para realizar el programa de priorización.

Para la realización del modelo se contempló utilizar una herramienta accesible para las empresas de agua y que una vez que está elaborado, sea de fácil manejo para manipular los datos, además de contar con una sencilla y clara interpretación. El programa Evolver (para mas detalles consultar el anexo 2) sirve a estos objetivos y es un potente programa que se instala sobre la hoja Excel, trata de superar y resolver todos los problemas que en aquella no pueden ser resueltos, tanto por su complejidad como por tratarse de problemas no lineales. Es un programa que optimiza empleando la técnica de los algoritmos genéticos. Con este programa se realizara la programación para la priorización para la renovación de las tuberías de la red de agua potable analizada.

Cabe mencionar que para la aplicación de la herramienta Evolver se realizo un intenso trabajo previo de tratamiento, selección y procesamiento de la información como se detalla párrafos posteriores.

## 1.2 Información necesaria

Como en todo modelo, la calidad y la cantidad de la información es fundamental para obtener buenos resultados, y por tal motivo el proceso de selección, tratamiento y procesamiento de la información existente es fundamental. Debemos mencionar que la información proporcionada por la empresa de aguas de la ciudad de Celaya, Guanajuato. Se encuentra a través de la base de datos en el Sistema de Información Geográfica.

Primeramente se requiere de la información de la topología de la red, donde se detallen las siguientes características:

- ⇒ Longitud
- ⇒ Diámetro
- ⇒ Material
- ⇒ Fuente de alimentación
- ⇒ Edad de la tubería
- ⇒ Dispositivos y accesorios

Es conveniente, si se han realizado mediciones de los coeficientes de rugosidad de las tuberías, contar con dicha información, para realizar las calibraciones de los modelos hidráulicos, así como las mediciones de las presiones y caudales. Seguidamente se debe contar con la información de los abonados, tanto en el aspecto espacial como estadístico. La información estadística en cuanto al consumo y el tipo de uso es de

utilidad para determinar el comportamiento de los consumos en el tiempo si no se cuenta con las curvas de modulación, y también para realizar la clasificación del consumo de los abonados, la localización espacial de todos y cada uno de los abonados en referencia a la red.

Uno de los datos relevantes es el historial de fugas de la red de los sectores analizados, y aquí es conveniente contar con un historial lo mas amplio posible en el tiempo, con el registro del número de roturas por año. También es conveniente disponer de información adicional sobre las características del entorno de la tubería, la presión de operación y el tipo de material de la misma. Otro dato es la localización de las fugas, porque muchas veces aparecen en las acometidas domiciliarias y no sobre la tubería; aunque se trata de situaciones similares para el análisis, este dato es útil si se quiere discriminar el tipo de rotura.

Para el análisis es necesario obtener los costes de reparación y sustitución de todos los diámetros analizados, con un análisis detallado de los conceptos que intervienen en el análisis de los costes unitarios de las rehabilitaciones y sustituciones, e incluso contando con diferentes alternativas, si es posible.

Otro dato necesario es el tipo de tráfico que circula por donde se localizan las tuberías, para determinar la importancia del vial y el impacto que tendrá la rotura en dicho vial.

## 2 Metodología para la priorización del grupo de tuberías

En primer lugar se han definido y establecido los factores de influencia y se ha realizado la evaluación de los mismos, según los criterios establecidos. El siguiente paso es alimentar la hoja de Excel con el grupo de tuberías y los factores de influencia, como se muestra en la tabla 6.1

ID línea	Edad	Historial	Capacidad	IDN	IIQ <sub>fuga</sub>	Tiempo	Influencia	Impacto
	t inst.	fugas	transporte			renovación	rotura Q	medio amb
AC (A1)	6.33	10,00	3,98	4,1	0	7,19	3,26	6
AC (A2)	5.28	9,19	4,64	5,8	2,45	0	3,04	4,8
FoFo (C1)	5.54	8,36	5,02	5,2	0,55	6,33	4,46	4,8
Fo Ga (C1)	7.07	9,25	4,73	4,6	4,62	3,85	4,57	10
Fo Ga (C2)	6.97	9,92	4,1	5,5	3,72	10	4,1	4,2
PVC30	4.81	6,78	4,92	3,6	3,24	0	0,12	6
PVC20	5.30	7,26	4,27	5,5	10	0	2,27	0
Polietileno	4.94	9,10	2,86	10	2,23	0	1,12	0

Tabla 6. 1 Grupo de tuberías y valores de los factores de influencia

---

---

## 2.1 Metodología para la asignación de prioridades de renovación de tuberías mediante el uso del sistema soporte a la toma de decisión de las sumas ponderadas

Los problemas que requieren la optimización simultánea de más de un objetivo se conocen como problemas de optimización multiobjetivo. Habrá que optimizar por tanto una función de la forma  $f : S \rightarrow T$ , donde  $S \subset \mathbb{R}^n$  y  $T \subset \mathbb{R}^k$ . El problema está en que normalmente no existe un elemento de  $S$  que produzca un óptimo de forma simultánea para cada uno de los  $k$  objetivos que componen  $f$ . Esto se deberá a la existencia de conflictos entre objetivos, que harán que la mejora de uno de ellos dé lugar a un empeoramiento de algún otro. Pensemos, por ejemplo, en el caso de un avión con dos objetivos que fuesen su velocidad y el ahorro de combustible: un aumento de la velocidad traería consigo un aumento del consumo de combustible. Habrá que llegar por tanto a una situación de compromiso, en la que todos los objetivos sean satisfechos en un grado aceptable, desde el punto de vista de diseño.

A diferencia de los problemas de optimización con un único objetivo, el concepto de óptimo es ahora relativo y será necesario decidir de alguna forma cuál es la mejor solución (o cuáles son las mejores soluciones) al problema.

En términos matemáticos, el problema de optimización multiobjetivo puede establecerse de la siguiente forma:

Encontrar un vector  $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ , que satisfaga las  $m$  restricciones:

$$g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.1)$$

Y las  $p$  restricciones:

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.2)$$

Y optimice la función vectorial

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (6.3)$$

Donde  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  es el vector de variables de decisión.

En otras palabras, se desea determinar la solución particular  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ , del conjunto  $S$  formado por todos los valores que satisfacen las ecuaciones (6.1) y (6.2), que dé lugar a los valores óptimos para todas las funciones objetivo. Pero como ya se ha comentado, no existe normalmente una solución que optimice de forma simultánea todas las funciones objetivo.

## 2.2 Métodos de solución

Para tratar el problema comentado del conflicto entre objetivos se han utilizado diversos métodos, que pasamos a revisar a continuación.

---

### 2.2.1 Métodos basados en el concepto de eficiencia de Pareto.

Se trata de métodos basados en la combinación de objetivos. Dentro de estos métodos se puede mencionar el **método de la suma ponderada**, en el que se optimizará el valor obtenido mediante la suma de los valores correspondientes a los distintos objetivos, multiplicados cada uno por un coeficiente de peso. Estos coeficientes de peso establecerán la importancia relativa de cada objetivo. El problema de optimización multiobjetivo se transforma así en otro de optimización mono-objetivo o escalar, que para el caso de la minimización será de la forma.

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (6.4)$$

Donde  $w_i \geq 0$  es el coeficiente de peso correspondiente al objetivo  $i$ .

Existen variantes del método anterior, como el método de la programación por metas, en el que se establece una meta para cada objetivo, y lo que se suma ahora (multiplicado por el correspondiente coeficiente) es la distancia de cada objetivo a su meta. Para un caso de minimización sería.

$$\min \sum_{i=1}^k w_i |f_i(x) - M_i| \quad (6.5)$$

Donde  $M_i$  representa la meta del  $i$ -ésimo objetivo.

### 2.2.2 Matriz de ponderación de alternativas

Maino M. (1993) dice “*De los distintos enfoques utilizados para generar el conjunto de soluciones eficientes, este fue el primero en desarrollarse. Zadeh en 1965 fue quien propuso este método. Su idea básica consiste en combinar (agregar) todos los criterios en una función única. Con este propósito, se asocia un peso o coeficiente de ponderación a cada uno de los (objetivos) criterios, procediéndose después a agregar todos los criterios, para luego, parametrizando los valores de los coeficientes de ponderación, conseguir generar el conjunto eficiente*”.

De esta manera, cada alternativa será evaluada en función del criterio de evaluación, obteniendo un valor  $V_{AJ}$ ; dicho valor es multiplicado por el peso asignado a dicho criterio  $W_{Cr}$ . De esta forma se concentra un conjunto de  $m$  criterios y  $n$  alternativas, agregando  $m$  productos con la alternativa  $J$  para obtener el producto  $V_{AJ} * W_{Cr}$ , representados por un sumatorio. En la figura 6.1 se presenta la matriz de decisión que incluye las  $n$  sumatorias correspondientes a  $n$  alternativas.



	Criterio 1	Criterio.....	Criterio m	Suma final de cada alternativa
	↓	↓	↓	↓
	(Peso 1)	(Peso .....)	(Peso m)	
Alternativa 1 ↓ (Valoración 1)	$V_{A1} * W_{Cr1}$	$V_{A1} * W_{Cr.....}$	$V_{A1} * W_{Crm}$	$\rightarrow \Sigma (V_{A1} * C_i)$
Alternativa..... ↓ (Valoración.....)	$V_{A.....} * W_{Cr1}$	$V_{A.....} * W_{Cr.....}$	$V_{A.....} * W_{Crm}$	$\rightarrow \Sigma (V_{A...} * C_i)$
Alternativa n ↓ (Valoración n)	$V_{An} * W_{Cr1}$	$V_{An} * W_{Cr....}$	$V_{An} * W_{Crm}$	$\rightarrow \Sigma (V_{A1} * C_i)$

Figura 6. 1 Estructura típica de la matriz de ponderación de alternativas

### 3 Valoración final de los resultados

Para nuestro caso en particular, que consiste en priorizar un grupo de tuberías para la renovación, debemos de construir una ordenación de prioridad, partiendo de que cada criterio se refiere a una necesidad mayor en la renovación, conforme mayor sea el sumatorio de la puntuación obtenida. Al obtener un mayor resultado en el sumatorio de las multiplicaciones, significa que su necesidad de renovación es mayor. De esta manera los resultados obtenidos en las alternativas, se organizan de mayor a menor en un cuadro de manera sinóptica. Dicho cuadro se presenta en la figura 6.2.

Prioridad 1	$A_j :$	$\Sigma_{final} A_j >$	$\Sigma_{final} A_n >$	$\Sigma_{final} A.... >$	$\Sigma_{final} A_i$
Prioridad 2	$A_n :$	$\Sigma_{final} A_n >$	$\Sigma_{final} A.... >$	$\Sigma_{final} A_i$	
Prioridad....	$A...., :$	$\Sigma_{final} A.... >$	$\Sigma_{final} A_i$		
Prioridad n	$A_i :$				

Figura 6. 2. Orden de prioridad de alternativas en función del valor de la agregación final de cada una de ellas

---

---

### **3.1 Aplicación del sistema soporte a la decisión de las sumas ponderadas para la asignación de prioridades de renovación en ocho grupos tuberías de la red de Celaya, Gto. México**

Debemos hacer algunas precisiones respecto a la composición de la red de distribución analizada, respecto a los diámetros referidos a la mayoría de las tuberías que constituyen la red, los cuales oscilan entre 75 mm. y 150 mm., y donde se omitieron las tuberías de 50 y 60 mm. Respecto a las edades de las tuberías, las del sector centro son las de mayor edad con 50 años, así como diferentes materiales en los cinco sectores tales como: Fo-Fo, Fo-Ga, A-C, PVC, y Polietileno. En dicha zona fueron seleccionados ocho grupos de tuberías homogéneas en cuanto al tipo de material y edad.

#### **3.1.1 Agrupación de puntuaciones parciales de cada tubería respecto a cada uno de los criterios considerados**

Para realizar la agrupación de cada tubería respecto a cada uno de los criterios, se suman los valores de las ponderaciones por el peso asignado a cada criterio, para lo cual se obtendrá un sumatorio final para cada una de las alternativas. Seguidamente, realizando una ordenación en base a la valoración obtenida, se obtiene un orden de priorización de las tuberías que deberán ser renovadas más prontamente.

En lo referente al criterio de la edad y el periodo de instalación, existe una diferencia de edad de 40 años, es decir la tubería mas antigua es de 50 años y la de menor edad es de 10 años, debiendo ser reflejada y penalizada esta diferencia de edad. Respecto al periodo de instalación, la referencia existente a la calidad del periodo de instalación es muy variada, para los diversos tipos de materiales y en base a ello se realiza su valoración.

Respecto al número de roturas de cada tubería, en general, se trata de valores altos, resaltando la más penalizada que es la tubería de Asbesto-Cemento con la clave AC (A1), con un valor realmente alto (4,09 roturas / km y año), especialmente si consideramos los valores manejados en Alemania (Hirner, 1997) donde se propone un valor de 0,1 para un buen comportamiento, y el valor de 0,5 ya es considerado alto. Con una longitud promedio de 12.605 m., esta tasa de fallos registrados es relativamente importante. La clasificación de la OFWAT (Parsons, 1997) es menos exigente: 0,25 (bueno) y 2 (inaceptable) roturas/km y año. En general los valores de los ocho grupos de tuberías son altos, dado que el menor es de 2,81, siendo esta la tubería de mayor longitud de material de PVC y de una edad de 30 años.

Respecto a los criterios hidráulicos, el criterio de la capacidad de transporte refleja la pérdida porcentual de carga de cada tubería debido a su envejecimiento, manifestada a través de una reducción de diámetro y de un aumento de la rugosidad. Las tuberías analizadas tienen una pérdida de carga porcentual que va desde un 39,7% hasta un 18,1%. Las tuberías mejor colocadas son las más grandes y las peor colocadas las más pequeñas, debido fundamentalmente a que las pérdidas de carga son inversamente proporcionales a la quinta potencia del diámetro. Como sucede con las tuberías del sector centro donde se localizan los mayores diámetros, pero en ese mismo sector se encuentran las tuberías de Fo-Fo, Fo-Ga. y A-C, las cuales poseen las mayores incrustaciones y por consiguiente una mayor reducción en el diámetro.

---

Con el criterio del índice de deficiencia de los nodos, como su nombre lo indica, se pretende evaluar el impacto de la indisponibilidad de una tubería dada al suministro de agua hacia los abonados, en cada uno de los sectores en cuanto a la presión inferior disponible en horas punta.

Las tuberías con menor redundancia en el servicio resultan con una puntuación mayor, y en este caso, se trata del grupo de tuberías de polietileno del sector San Juanico, donde la topología de la red hace que al “cortar” en la simulación las tuberías importantes, prácticamente afecta a todos los nodos del sistema; por el contrario, el menor valor corresponde a las tuberías de PVC30 del sector de Jardines.

En la red de la ciudad de Celaya, el caudal de fugas es muy significativo. Como se ha podido constatar por parte del departamento de recuperación de agua, el mayor problema al que se han enfrentado es la localización espacial de las fugas, cuyo volumen de agua perdido afecta significativamente al comportamiento de la red, disminuyendo la presión y demeritando el servicio prestado a los usuarios. Por tal motivo, según el criterio del Impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, las tuberías para las que el caudal fugado influye menos en la red, corresponden a las tuberías AC(A1) del sector centro. En la evaluación de este criterio, existe una gran dispersión de los valores; por ejemplo, el menor valor del  $IIQ_{fuga}$  es de 1.16 correspondiente a la puntuación de 0, y el mayor de 12.12 que equivale al valor de la puntuación de 10.

Como observamos, existe una gran variación en los valores. Por último debemos mencionar que el sector donde influye más este criterio es el sector de Girasoles con tuberías de PVC20.

En lo que se refiere al grupo de criterios funcionales, los resultados no son tan distantes. Entre ellos, considero que debido a su relación en el aspecto funcional, sobre todo cabe destacar la proximidad de las valoraciones, en el criterio de la capacidad de transporte. Esto tal vez sea debido al planteamiento de la valoración que se propuso. También debemos comentar que el comportamiento de los valores del índice de deficiencia de los nudos está condicionado de alguna manera por la topología de la red.

Respecto al grupo de los criterios misceláneos, son de alguna manera una mezcla de diversas consideraciones, en las cuales se debe resaltar el aspecto económico. En este caso, la evaluación del método de Shamir y Howard resulta ser una aproximación inicial buena, que requiere aun más elementos para poder evaluar más firmemente este criterio. Aun así, cabe resaltar que aunque existen algunas modificaciones a las expresiones originales, siguen siguiendo las más empleadas hoy en día para determinar el tiempo de renovación óptimo. Son varias las tuberías que cuentan con un tiempo de sustitución considerable, como las tuberías de PVC de 20 y 30 años, así como la tubería de polietileno al igual la tubería de A-C (A2), y por lo contrario existe la tubería de Fo Ga (C1) donde el tiempo de sustitución es imperante.

En lo que se refiere a la influencia de un corte los diferentes sectores que se han seleccionado, existen abonados con consumos mensuales considerables por encima de  $100 \text{ m}^3$  mensuales. Dentro de este factor, las puntuaciones mayores corresponden a sectores donde hay un mayor número de consumidores mayores, y específicamente en el sector centro, donde el corte de una tubería afecta considerablemente al resto. En otros sectores no es tanta la afectación: por ejemplo en los sectores de Girasoles y San

---

Juanico, que se alimentan de una sola fuente, los nudos de sector quedan muy afectados en cuanto a la presión en cuanto de cierra la línea de alimentación.

En lo que respecta a los sectores del Centro y Jardines, que cuentan con dos o más fuentes de alimentación, la afectación del corte de alguna de las líneas de alimentación es menor.

Respecto a los efectos originados por un reventón ocurrido en una tubería, en este criterio las tuberías localizadas en el sector centro son las de mayor impacto, dado que es donde se localizan la mayor densidad de edificios de gran envergadura, y una gran cantidad de monumentos históricos. Debemos de mencionar que en lo que respecta al sector de Jardines de material PVC30, en dicho sector se localiza una de las avenidas mas importante de la ciudad de Celaya, y es justo donde se aloja paralelamente una línea de 200 mm de diámetro, de una longitud considerable.

Por tal motivo obtiene una puntuación de 6.0. Al momento de realizar las ponderaciones relativas de cada criterio, cabe recordar que el valor numérico del peso relativo de cada criterio, responde más a la visión global de la red que tengan los responsables de cada abastecimiento, que a un valor que pretenda ser definitivo.

De esta forma, en primera instancia se concede a las consideraciones básicas un peso conjunto del 45%, debido tanto a su importancia, como al hecho de que se trata de una información asequible, al menos en sistemas con un aceptable nivel de gestión. Se ha valorado en un 5% más la edad de la tubería y el periodo de instalación, que el historial de roturas. Seguidamente se han ponderado las consideraciones hidráulicas, que tienen un peso del 40%, debido a la relevancia que consideramos que juegan en la red dichos criterios: concretamente se ha valorado con un 10% al criterio del índice de la capacidad nodal, un 5% menos respecto los otros dos criterios a los cuales se les asigna un valor de 15%. Las consideraciones misceláneas, fundamentalmente económicas, tienen un valor del 15% debido a su influencia subjetiva de evaluación, repartidas de una manera equitativa entre los tres criterios.

Finalmente, se presenta en la tabla 6.4 la puntuación parcial y ponderada de cada tubería, en cada uno de los criterios. La suma de las puntuaciones de cada tubería, respecto a un valor máximo de 100 se presenta en la tabla 6.2, así como la posición de cada tubería de cara a su renovación.

<b>Orden de priorización</b>	<b>Puntuación definitiva (sobre 100)</b>	<b>Posición de cada tubería</b>
1	7.07	Fo Ga (C1)
2	6.97	Fo Ga (C2)
3	6.33	AC (A1)
4	5.54	FoFo (C1)
5	5.30	PVC20

6	5.28	AC (A2)
7	4.94	Polietileno
8	4.81	PVC30

*Tabla 6. 2 Resultado de la puntuación sobre 100*

Una vez que se obtiene la priorización del grupo de tuberías, tenemos en primer lugar a las tuberías de acero galvanizado, donde en primer lugar se encuentran las tuberías de acero galvanizado de 50 años de edad, seguido de las tuberías de acero galvanizado de 40 años de edad, las cuales están por encima de las tuberías de fundición de mayor edad FoFo(C1). Lo mismo sucede con las tuberías de PVC, las cuales son más prioritarias en esta lista las tuberías con menor edad, es decir las de PVC de 20 años, donde en los criterios funcionales y básicos, obtiene puntuaciones más altas que las de PVC30.

Un dato que salta a la vista, son los valores muy cercanos de las tuberías del sector centro, donde las tuberías FoGa(C1), FoGa(C2), AC(A1) son muy cercanos, lo mismo sucede con las tuberías de Asbesto Cemento AC(A2), y las de Fo Fo(C1). Esto nos habla de la homogeneidad, en cuanto a las características de la edad y de los materiales, pero además de su comportamiento hasta la fecha. Así lo demuestra el comportamiento hidráulico. Otro dato que debemos resaltar es la cuarta posición que ocupa las tuberías de PVC de 20 años de edad, lo cual indica que en los factores de valoración, cuentan con calificaciones altas, lo cual provoca que obtengan en suma valores altos, muy por encima que las de asbesto-cemento.

### **3.1.2 Análisis de sensibilidad de los resultados ante variaciones en la consideración de los valores en los pesos de los criterios**

Si los valores del peso relativo en las consideraciones básicas se hubiesen intercalado, es decir, se hubiese valorado un 20 % la edad y el periodo de instalación y un 20 % el historial de roturas, y en las consideraciones funcionales se hubiese valorado un 10 % la capacidad de transporte y un 20% el índice del caudal fugado, así como en las consideraciones misceláneas, se aumentaría el índice de la influencia de una rotura de un 5% a un 10% , el ordenamiento variaría tal y como refleja la tabla 6.3.

<b>Orden de priorización</b>	<b>Puntuación definitiva (sobre 100)</b>	<b>Posición de cada tubería</b>
1	6.68	Fo Ga (C2)
2	6.42	Fo Ga (C1)
3	5.79	AC (A1)
4	5.49	PVC20
5	5.20	FoFo (C1)
6	5.04	AC (A2)

7	4.71	Polietileno
8	4.42	PVC30

Tabla 6. 3 Valores del análisis de sensibilidad

La tubería de acero galvanizado de menor edad (40 años), ahora obtienen el primer lugar y posicionando en segundo lugar, las tuberías de FoGa de 50 años de edad. Otro intercambio de posiciones se da en el cuarto y quinto sitio, entre las tuberías de FoFo(C1) y las tuberías de PVC20 correspondientes al sector de San Juanico.

El resto no sufren variación alguna, cabe destacar que el ultimo grupo de tuberías en la priorización son el grupo de tuberías de PVC de 30 años de edad, mejor posicionada que las tuberías de polietileno, otro grupo que obtiene una buena posición debido a sus condiciones, son las tuberías de asbesto-cemento de 40 años, mejor que las tuberías de PVC de 20 años de edad.

Como se puede observar, al modificar el valor de los pesos, el orden de priorización cambia de manera significativa, sobre todo en las primeras cinco posiciones. Por tal motivo, es importante realizar un análisis mas profundo del siguiente grupo de tuberías, que deben ser consideradas para su renovación, y en base a los factores establecidos definir cual tubería tiene mas impacto, en cada factor individualmente. En base a lo anterior, proponemos el método para jerarquizar a cada uno de los grupos de tuberías, para cada factor de influencia considerado, aplicando el programa Evolver, que utiliza precisamente algoritmos genéticos como método de solución (ver anexo 2 para más detalle).

ID	Edad		Historial fugas		Capacidad transporte		IDN		IIQ <sub>fuga</sub>		Tiempo renovación		Influencia rotura		Impacto medio amb.		Σ
	Periodo Inst.		W = 20.0%		W = 15.0%		W = 10.0%		W = 15.0%		W = 5.0%		W = 5.0%		W = 5.0%		
	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	
AC (A1)	10.0	2.50	10	2.00	3.98	0.60	4.10	0.41	0.00	0.00	7.19	0.36	3.26	0.16	6.00	0.30	6.33
AC (A2)	5.63	1.41	9.19	1.84	4.64	0.70	5.80	0.58	2.45	0.37	0	0.00	3.04	0.15	4.80	0.24	5.28
FoFo (C1)	6.94	1.74	8.36	1.67	5.02	0.75	5.20	0.52	0.55	0.08	6.33	0.32	4.46	0.22	4.80	0.24	5.54
Fo Ga (C1)	9.77	2.44	9.25	1.85	4.73	0.71	4.60	0.46	4.62	0.69	3.85	0.19	4.57	0.23	10.00	0.50	7.07
Fo Ga (C2)	9.38	2.34	9.92	1.98	4.1	0.62	5.50	0.55	3.72	0.56	10	0.50	4.1	0.21	4.20	0.21	6.97
PVC30	6.25	1.56	6.78	1.36	4.92	0.74	3.60	0.36	3.24	0.49	0	0.00	0.12	0.01	6.00	0.30	4.81
PVC20	4.17	1.04	7.26	1.45	4.27	0.64	5.50	0.55	10.00	1.50	0	0.00	2.27	0.11	0.00	0.00	5.30
Polietileno	5.21	1.30	9.1	1.82	2.86	0.43	10.00	1.00	2.23	0.33	0	0.00	1.12	0.06	0.00	0.00	4.94

Tabla 6. 4 Matriz de valores de las sumas ponderadas.

### 3.1.3 Función Objetivo

Nuestra función objetivo, es maximizar el valor del sumatorio de los índices correspondientes a cada grupo de tuberías, en base a la puntuación de los factores de influencia planteados. Esto se plantea en el Evolver de la forma como se muestra en la figura 6.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>FACTORES DE INFLUENCIA</b>										
2	VALORACION	45		40			15				
3		25	20								
4		Edad	Historial	Cap							
5	ID Línea	t inst.	fugas	tran					Impacto		
6	AC (A1)	10.0	10.00						6	1	10.00
7	AC (A2)	5.63	9.19						4.8	2	9.19
8	FoFo (C1)	6.94	8.36						4.8	7	4.46
9	Fo Ga (C1)	9.77	9.25						10	8	10.00
10	Fo Ga (C2)	9.38	9.92						4.2	6	10.00
11	PVC30	6.25	6.78						6	3	4.92
12	PVC20	4.17	7.26						0	5	10.00
13	Polietileno	5.21	9.10						0	4	10.00
14											
15											<b>68.57</b>
16											
17											

Figura 6. 3. Planteamiento de la función objetivo

### 3.1.4 Método de Ordenar

El método de solución del Evolver es el método de solución “order” (ordenar), que consiste en realizar una permutación de un número de valores dados previamente, por lo que ordena las tareas o actividades planteadas, que en este caso son el grupo de tuberías. Para nuestro caso, un grupo de tuberías al que se les asigno un valor en cada evaluación de los factores de influencia del 1 al 10, donde el número 10 correspondía al peor valor del factor. Por ejemplo en el factor de la edad la tubería mas antigua se le otorgaba un valor de 10, otro ejemplo es el historial de fugas, en el cual la tubería con mayor número de fugas por kilómetro por año, se le asignaba el valor mas alto o sea el valor de 10, y así sucesivamente con cada uno de los factores, como se detallo en el capítulo anterior.

En la gran mayoría de empresas del agua se dispone de ciertos parámetros, pero no de un método determinado para establecer la priorización en la rehabilitación de las tuberías, y este ha sido el principal motivo de aplicar la técnica de los algoritmos genéticos y el programa Evolver. El programa encuentra para cada grupo de tuberías, los factores con valores más altos y ordena a cada una de las categorías de tubería, en base a los valores más altos de cada factor. En la figura 6.4 las columnas con bordes azules, son las que Evolver cambia y pone la jerarquización de la indexación. La celda con bordes de color rojo, es donde se localiza la función objetivo a maximizar en este caso.





---

#### 4.1 Determinación de la relación del coste de energía y las fugas en las tuberías

Primeramente es necesario comentar las escasas aportaciones de investigación que encontramos en la literatura, sobre la relación que existe entre las fugas en los sistemas de abastecimiento y el aumento del coste de la energía eléctrica derivado por las mismas, de tal forma que es necesario mencionar, el trabajo desarrollado por Colombo y Karney (2002), del que se han tomado algunas consideraciones para el desarrollo del análisis del caso de aplicación para la ciudad de Celaya.

En los programas de detección y control de fugas, el factor fundamental es la pérdida de agua, que suele ser costosa y requiere ser tratada con detenimiento y la aplicación de recursos de toda índole, tanto financieros como humanos. Sin embargo, las tuberías con fugas provocan un incremento de la energía de bombeo y de los costes del sistema de rehabilitación, pudiendo aumentar el riesgo de afectar la calidad del agua, al permitir la intrusión de agua subterránea contaminada.

Las fugas pueden llegar a causar daños como la socavación de autovías, avenidas, erosionar el suelo subyacente e incluso, puede llegar a dañar las estructuras de las edificaciones de las zonas urbanas, en una proporción suficiente para plantear un riesgo para la construcción de las mismas (Price y Reed, 1989).

Las fugas son costosas en términos de dinero y recursos; ésta es una idea bien establecida. En una de las primeras encuestas relacionadas con las fugas, se puso de manifiesto que en Chicago se llegó a bombear más del doble del agua necesaria (Cole, 1912), y dicho nivel aun hoy en día no es inhabitual. Un rango típico para el agua no contabilizada (Unaccounted For Water, UFW) en Europa es de 9-30% (Lai, 1991), mientras que las tasas en Malasia es del 43% (Lai, 1991) o para Bangladesh del 56% (Chowdhury *et al.*, 1999). En Norteamérica, Brothers (2001) sugiere que alguna experiencia de empresas de servicios públicos ha cuantificado las pérdidas de agua entre 20-50%. Las fugas son el componente dominante del UFW.

Aunque se conoce desde hace mucho tiempo que las fugas en los sistemas de distribución requieren más energía para mantener los niveles de servicio en un nivel deseable requerido, hay una marcada ausencia en la literatura sobre el tratamiento del coste energético en las fugas. Tradicionalmente, los esfuerzos de reducción de fugas se han centrado en reducir el coste de la pérdida de agua, y sin embargo, los actuales precios de la energía son tales que toma un protagonismo muy superior al coste del agua perdida, en la mayoría de los casos. En muchas comunidades, el consumo de energía en los sistemas de bombeo, es a menudo el mayor componente de gastos de operación para el suministro de agua. En México representa entre el 30% y el 40% de los egresos totales.

Además, la energía aplicada en la “alimentación” de las fugas imputa una gran carga medioambiental, relacionada con los impactos asociados con la producción y consumo de energía, incluyendo emisiones de gases de invernadero, la lluvia ácida y el agotamiento de los recursos.

El reconocimiento implícito de que importantes ahorros, pueden ser logrados a través de una mejor caracterización y gestión de las fugas, está subrayado por la aparición de

numerosos artículos, sobre la detección y control de fugas en los últimos años (Hunaidi *et al.*, 2000; Vítkovský *et al.*, 2000; Vairavamoorthy y Lumbers, 1998). Brothers (2001) recomienda que la gestión de las empresas de agua en las prácticas de la reducción de la presión, debe ser realizada fuera de las horas punta, para minimizar la pérdida de agua. El control en la medición de las fugas, así como la reducción de la presión excesiva, son de utilidad para reducir el desperdicio innecesario, y para abordar los síntomas del problema, es necesario comprender mejor las externalidades asociadas con las fugas,

#### 4.1.1 Pérdida de agua y las relaciones energéticas en una tubería con fuga

La consideración de cómo las fugas aumentan el gasto energético del suministro del agua, a través de un segmento de la tubería, ofrece un útil punto de partida para un análisis de las fugas en las redes de distribución. Cuando una única fuga se concentra en una distancia  $x$  a lo largo de una longitud uniforme  $L$  de la tubería, podemos derivar ecuaciones relativamente simples para relacionar la eficiencia energética, la localización y magnitud de la fugas. Aunque elementales, tales ecuaciones ofrecen una descripción concisa de cómo la localización y el tamaño de la fuga influyen en la tasa de fugas y los requerimientos energéticos.

Pueden ser considerados los siguientes supuestos: si el sistema fuga o no fuga, debiendo verificarse las demandas aguas abajo de la fuga y los requisitos de presión. Por lo tanto, la prioridad es evaluar las pérdidas en los sistemas de suministro de agua de un nivel equivalente en el servicio. Este enfoque puede no reflejar exactamente la práctica en determinadas comunidades, pero sus simplificaciones facilitan las comparaciones numéricas entre diferentes sistemas y escenarios, mediante la eliminación de una importante zona de variabilidad.

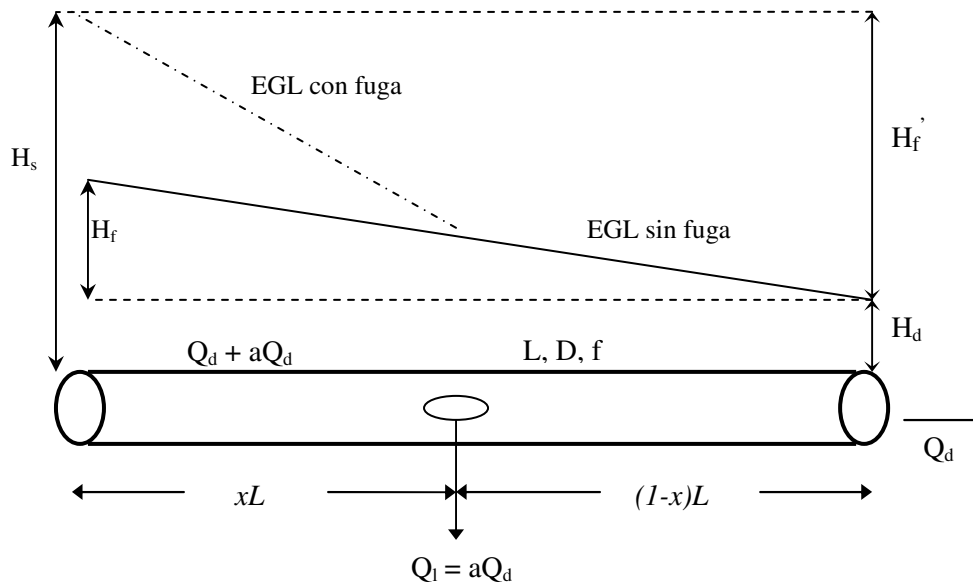


Figura 6. 5 Línea del grado de energía (EGL) del segmento de una tubería con una fuga.

El impacto de una fuga sobre el uso de la energía se puede determinar fácilmente a partir la observación en la línea del grado de energía (EGL) en la figura 6.5 (Colombo y

Karney, 2001). El segmento de la tubería tiene un diámetro  $D$ , el factor de fricción  $f$  para la ecuación de Darcy-Weisbach, y una fuga situada a una distancia  $xL$ . Se asume que las restricciones de suministro son satisfechas si el agua suministrada es suficiente para que el flujo por la fuga  $Q_l$  sea compensado, y el caudal requerido o demandado  $Q_d$ , es suministrado en la carga prescrita aguas abajo  $H_d$ . Así, el flujo de aguas arriba de la fuga excede  $Q_d$  por  $Q_l$ ; Además, la pendiente de la EGL tiene una discontinuidad en  $xL$ , con la porción aguas arriba siguiendo la línea de la rotura en la figura 6.5. La carga total suministrada aguas arriba  $H_s$  debe reflejar la modificación de la EGL, si la presión en la demanda final del tubo se mantiene. El flujo de la fuga  $Q_l$  puede ser expresado, como una proporción de la demanda  $aQ_d$  donde  $a$  es la fracción fugada, o esto puede ser modelado utilizando una función de orificio de la forma.

$$Q_l = C_d A [2g(H_l - H_{gw})]^a = C_E \Delta H^a \quad (6.6)$$

Donde:

$A$  = Área de la fuga

$\Delta H = H_l$  = diferencia de carga (m) a través de la fuga

$H_{gw}$  = Las cargas (m) en la tubería

$C_d$  = Cargas en el medio ambiente del nivel freático

$C_E$  = Coeficiente de descarga

$A$  = Coeficiente del emisor utilizado en EPANET el cual refleja el flujo a través de un orificio de tamaño fijo.

Claramente esta relación implica que la presión interna puede hacer variar el área de la fuga, y dependiendo del material de la tubería,  $Q_l$  puede aumentar y crear un bucle de realimentación que puede poner a prueba la capacidad del sistema. Una función de orificio es por lo general una representación más realista, que la aproximación tradicional de asignar fugas como demandas fijas.

De la expresión de la descarga a través de un orificio, es evidente que  $a$  y  $C_E$  están relacionados linealmente; sin embargo, la función que los relaciona no es lineal con  $x$  ni con las cargas del sistema.

$$a = \frac{C_E (H_l - H_{gw})^\alpha}{Q_d} \quad (6.7)$$

$H_l$  se determina desde  $H_l = H_d + (1-x)H_f$  en donde;  $H_f$  es la pérdida de carga en una tubería sin fugas (fig. 6.5). Si suponemos que  $H_{gw}$  es igual a cero (para condiciones de suelo no saturado), el resultado de la expresión para la tasa de fugas  $a/a_0$  puede ser escrita como.

$$\frac{a}{a_0} = [1 + (1-x)h_d]^\alpha \quad (6.8)$$

Donde:

$$a_0 = \frac{C_E H_d^\alpha}{Q_d} = \text{fracción de mínima fuga (la cual ocurre cuando } H_l = H_d \text{); y}$$

$$h_f = \frac{H_f}{H_d} hf = \text{perdida de carga relativa.}$$

La Fig. 6.6 muestra como el índice de fuga  $a/a_0$  varía con  $x$  y  $h_f$ , y claramente cuando la presión en la tubería decrece, el índice se aproxima a la unidad. Así, en lo que respecta a la pérdida de agua, si una fuga existe, el mejor lugar donde puede ocurrir es en el extremo aguas debajo de una tubería horizontal ( $x=1$ ) (o el punto de más baja presión). Para  $x < 1$ ,  $a/a_0$  decrece al disminuir  $h_f$ , porque la presión en la fuga es más pequeña.

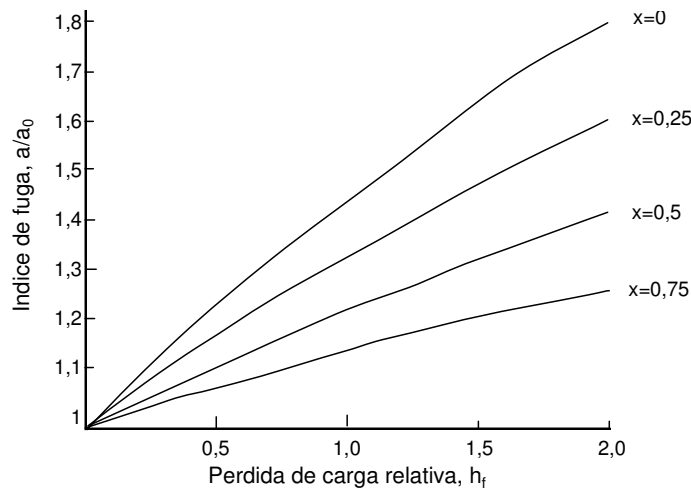


Figura 6. 6 Fugas relativas como una función de la pérdida de carga relativa y la localización de las fugas

La ecuación de Darcy- Weisbach  $H_f = \frac{f l Q_d^2}{2 g D A^2}$  relaciona la pérdida de carga en la tubería libre de fugas con el flujo que conduce, y para una tubería con una única fuga descargando  $a Q_d$  en un punto  $xL$ , resulta una expresión para la fracción del índice de carga  $h_F$ , que llega a ser una función lineal de  $x$  y una función cuadrática de  $a$ .

$$h_F = H'_f / H_f = x(1 + a)^2 + (1 - x) = 1 + ax(a + 2) \quad (6.9)$$

Por lo tanto, como  $x$  disminuye, la pérdida de carga adicional impuesta por la fuga también disminuye, debido a que una mayor porción del segmento del tubo que transporta sólo el caudal de diseño. Sin embargo, si la relación del orificio de la Eq.6.8 es sustituido en la Eq. (6.9), el índice de fricción de carga llega a ser una función más compleja en función de la distancia, de las propiedades del orificio y de la relativa pérdida de carga  $h_f$ .

La diferencia entre la energía mecánica entregada al final de la tubería aguas abajo ( $E_d$ ) y la que suministra la fuente ( $E_s$ ), indica la energía que se consume en la alimentación

de la fuga. Expresando estos términos de la energía como una cantidad adimensional, podemos obtener una rápida evaluación de la eficiencia energética de las fugas de tuberías. Debido a que la eficiencia energética global depende de la eficiencia del sistema, y de la eficiencia de la bomba, podemos incorporar el rendimiento de esta última,  $\eta$ , en la expresión final de energía.

$$\frac{E_d}{E_s} = \frac{\eta \mathcal{Q}_d H_d}{\mathcal{Q}_d (1+a)(H_d + H'_f)} = \frac{\eta}{(1+a)\{1 + [xa(a+2) + 1]h_f\}} \quad (6.10)$$

La extensión de las ecuaciones (6.9) y (6.10) en un caso multi-fuga se puede representar como fugas equivalentes. En la Fig. 6.7 se muestra la respuesta de  $E_d/E_s$  en función de los cambios en la fracción de fuga, para los tres diferentes valores de la distancia del fraccional  $x$ . Para fracciones de fuga muy pequeñas, el índice de energía cambia ligeramente con respecto a  $x$ ; sin embargo cuando  $a$  llega a ser grande, la dependencia de  $x$  es más notable, y el descenso de los índices resulta relativamente pronunciado, lo que refleja la importancia del tamaño de la fuga en la eficiencia energética.

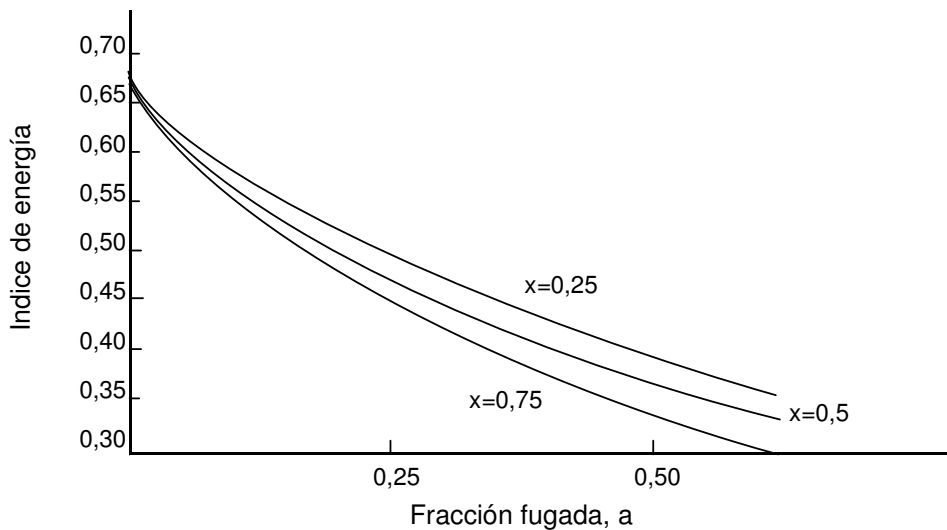


Figura 6. 7 Índice de energía como una función de la localización de la fuga y la magnitud ( $\eta = 1$ ,  $h_f = 0.5$ )

#### 4.1.2 Formulaciones para una tubería con múltiples fugas

Cuando se presentan  $N$  fugas, la EGL se resuelve en  $N+1$  segmentos distintos que reflejan el mismo número de diferentes caudales, que pasan a través de la tubería aguas abajo de cada fuga, disminuyendo el caudal hasta después de la última fuga, para llegar a ser igual al caudal de diseño  $Q_d$ . En paralelo con la disminución de flujo existe una reducción en la pendiente de la EGL (la pérdida de carga unitaria), después de cada fuga sucesiva, hasta que la pendiente para el segmento de la tubería, entre la última fuga y el final de aguas abajo, es igual que para el segmento global ( $H_f/L$ ) cuando no existen fugas. El índice de la carga de fricción  $h_F$  de un segmento de tubería con múltiples fugas, se obtiene mediante la ampliación de la relación de una sola fuga.

La pérdida de carga para una sola fuga está dada por Eq. (6.9); el primer término en la Eq. (6.9) puede ser expandido en una serie de N términos, para tener en consideración las N fugas, obteniendo la siguiente expresión.

$$h_F = \frac{H'_f}{H_f} = \sum_{m=1}^N (x_m - x_{m-1}) \left( 1 + \sum_{i=m}^N a_i \right)^2 + (1 - x_N) \quad (6.11)$$

Donde  $x_m$ =distancia fraccional desde el suministro final y la  $m$ -ésima fuga,  $a_i$ =fracción de fuga de la  $i$ ésima fuga; y  $x_0 = 0$ . El índice de energía  $E_d/E_s$  para una sola tubería con múltiples fugas es fácil de determinar, haciendo los ajustes apropiados para la correspondiente relación de una sola fuga.

$$\frac{E_d}{E_s} = \frac{\eta}{\left( 1 + \sum_{m=1}^N a_m \right) (H_d + H'_f)} \quad (6.12)$$

#### 4.1.2.1 Concepto de fuga equivalente

En la práctica, lo concerniente a la calidad de la información sobre el número y la gravedad de las fugas es difícil de adquirir. El hecho de que los sistemas de distribución de agua se encuentren enterrados es la razón más obvia. Además, existe la incertidumbre con respecto a la demanda real, a pesar de que han mejorado enormemente en las últimas décadas, los procedimientos y las tecnologías para la cuantificación y medición. Aunque resulta más fácil suponer un único concentrado de fugas para un segmento de tubería, puede haber más de una fuga, todas ellas con diferentes propiedades a lo largo del conducto.

Un segmento de tubería con dos fugas y su asociación a fuga equivalente se presenta en la Fig. 6.8. Las fugas 1 y 2 están localizadas en  $x_1L$  y  $x_2L$ , respectivamente, y son responsables de una pérdida total de  $(a_1+a_2) Q_d$ . La fuga equivalente que las representa debe cumplir dos criterios: (1) la equivalencia de pérdida de agua y (2) la equivalencia de pérdida de energía. El primer criterio exige que la fracción de fuga para la fuga equivalente  $a_e$ , es igual a la suma de las fracciones de fugas de ambas fugas:  $a_e=a_1+a_2$ . La energía equivalente requiere que la pérdida de carga total  $H_f'$  sea la misma, independientemente de cual ruta de la EGL es elegida.

La presencia de las dos fugas implica que la EGL sigue el camino definido por ABDE. La  $H_f'$  sufrida es la suma de los términos individuales de pérdidas:  $H_f'=H_{AB}+H_{BD}+H_{DE}$ . Esto también es igual a la suma de la pérdida de carga en términos de los dos segmentos ( $H_{AC}+H_{CE}$ ), que se asocia con la ruta de una sola fuga equivalente (ACE).  $H_{CE}$  se determina a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, utilizando el caudal de diseño  $Q_d$  aplicándose sobre el alcance  $(1-x_e)L$ , donde  $x_e$  es la localización fraccional de la de la fuga equivalente.  $H_{AC}$  se evalúa de manera similar, excepto con los caudales mayores  $(1+a_1+a_2)Q_d$  aplicada sobre el alcance  $x_eL$ . Si uno tiene el conocimiento de las fracciones de fuga y la proporción o relación de la carga de fricción.  $h_F$ ,  $x_e$  puede determinarse como.

$$x_e = \frac{h_f - 1}{(1 + a_e)^2 - 1} \quad (6.13)$$

De este modo, la fuga equivalente asociada con las fugas 1 y 2 tiene una magnitud de  $a_e$  y se encuentra a  $x_e$ . El mismo planteamiento puede ser utilizado para obtener una expresión para el coeficiente de emisor y  $x_e$  en una fuga equivalente, dado el conocimiento de los coeficientes de los emisores, para las fugas originales y la relación entre  $a$  y  $C_E$ . La expresión resultante es ligeramente más compleja, pero fundamentalmente es la misma.

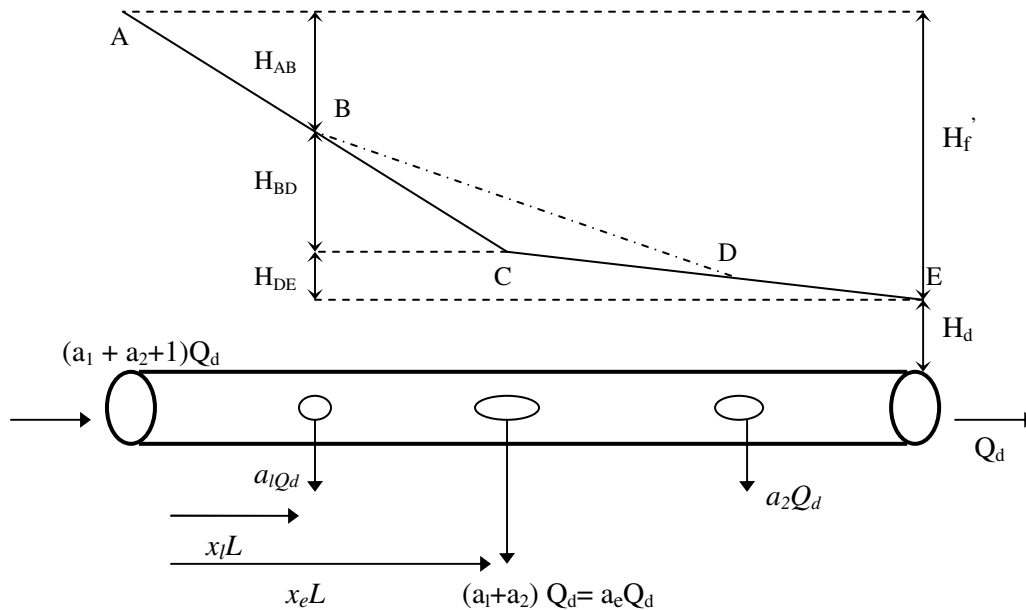


Figura 6. 8 EGL para una tubería con múltiples fugas y la correspondiente fuga equivalente

### 4.1.3 Coste de la energía de una red con fugas

Al igual que el análisis de sistemas con una sola tubería, es posible realizar el análisis de las redes completas de distribución de agua. Para evaluar el impacto de fugas sobre los sistemas de distribución, fueron realizadas una variedad de simulaciones de estados permanentes con EPANET, sobre cuatro redes malladas hipotéticas (Colombo y Karney, 2002). El objetivo es encontrar relaciones simples para poder caracterizar el comportamiento, al menos *grosso modo*, sobre la interdependencia del índice de fugas, gastos de energía y los sistemas complejos.

#### 4.1.3.1 Sistema de distribución hipotético de 10 mallas

La topología del sistema hipotético de 10 mallas es como se muestra en la Fig. 6.9. Algunos aspectos que distinguen este sistema de una red de distribución más realista, son la ausencia del almacenaje (estos no contienen tanques de almacenamiento u otros depósitos, excepto el depósito de la fuente), un patrón de demanda fijo y la existencia de

una sola estación de bombeo. Ignorar tanto el patrón de la demanda como el almacenaje, simplifica el análisis y más claramente, destaca el papel específico de las fugas; además, puesto que las condiciones medias dominan en la estimación del consumo de la energía a largo plazo, su omisión no es especialmente problemática. Naturalmente hay una variedad de consideraciones operacionales adicionales, y estas consideraciones también entrarán en el juego cuando se determine como se gestiona la fuga, y como esto influye en el funcionamiento económico total de un sistema real.

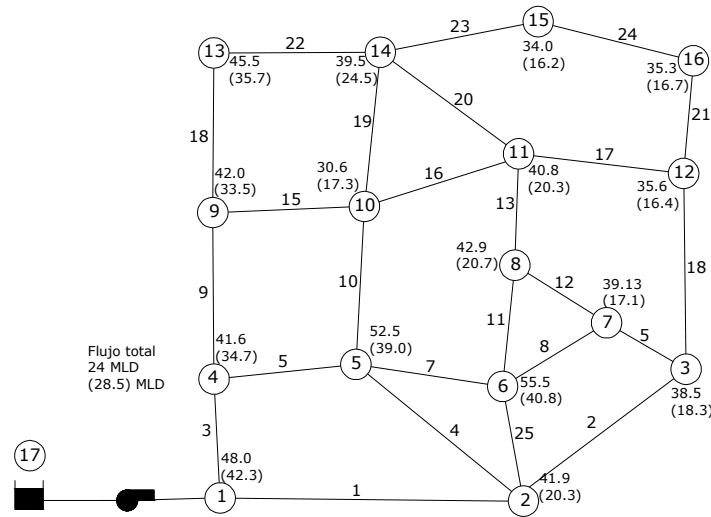


Figura 6. 9 Esquema del sistema de distribución con 10 mallas

Las fugas en los nodos específicos son representadas en EPANET usando los emisores, que son gobernados por la relación de orificio de la Ec. 6.6. Una fuga en un nodo particular, representa la existencia de fugas en unos o todos los tubos incidentes, extendiendo así el concepto de la fuga equivalente. Para este sistema, las fugas han sido definidas en los nodos N 5-8, 10, 11, y en cada fuga es asignado el mismo valor de  $C_E$ . La fuga es entonces determinada por la asignación de una nueva curva de la bomba, de manera que la distribución de la presión resultante, se asemeja a la distribución de la presión del escenario cuando no existe fuga.

Específicamente, la curva de la bomba se ve modificada hasta que la presión en la mayoría de los nodos aguas abajo del nodo N16, es casi igual a su valor original de “no-fuga”. (por ejemplo 35+/-0.1m). De esta manera, el sistema puede ser considerado como de “presión compensada”. El coste de energía diario es calculado por EPANET.

La figura 6.9 compara la presión nodal en ambos casos, sin fugas y con un 25% de fugas. Sin ninguna fuga, el caudal total a través de la red es igual a la demanda total de 24 MLD (millones de litros diarios) y todas las presiones nodales son por lo menos 35 m. Cuando las fugas en los nodos especificados tienen asociado un coeficiente de emisor con un escenario del 25% de fugas, y la curva original de las estaciones de bombeo todavía se aplica, el caudal total a través del sistema se incrementa a 28,5 MLD. Todos los requisitos de flujo se siguen cumpliendo, pero la presión cae significativamente. A pesar de la satisfacción de las demandas nodales es un requisito típico del modelado, Germanopoulos (1985) correctamente indica que esta hipótesis puede no ser realista cuando las presiones del sistema caen demasiado bajo.



El efecto de retroalimentación de la relación del orificio de la ecuación 6.6 es evidente cuando la curva de la bomba se ajusta para restaurar las presiones y por tanto, las condiciones de servicio. En compensación para las fugas, la magnitud de las pérdidas aumenta hasta que el flujo total del sistema se convierte en 30 MLD; el adicional 1,5 MLD está asociado a la presión que depende de la demanda ejercida por las fugas.

#### 4.1.3.2 El rol de la demanda en el sistema y orificios hidráulicos

La función orificio de la Ec. (6.6) se define por dos parámetros, el coeficiente del emisor  $C_E$  y el exponente del emisor  $\alpha$ .  $C_E$  generalmente refleja el tamaño y la forma de una fuga, y es frecuentemente ajustado en el modelado de fugas de diferentes magnitudes. Aunque el valor de  $\alpha$  normalmente se fija en 0,5, se han sugerido otros valores. Por ejemplo, Goodwin (1980) informa de un valor del exponente de 1,18, con el mayor valor que apunta a un factor de “elasticidad” que describe cómo una fuga del área efectiva responde a la presión interna de las tuberías.

El exponente del emisor también puede reflejar el régimen de caudales a través de la fuga. Clarke *et al.* (1997) examinó varios tipos de tuberías con diferentes tamaños de roturas, encontró que el régimen de flujo a través de la rotura era una función de la anchura del mismo. Para roturas de anchos comparable al tamaño del grano del material de la tubería, el caudal fugado a través de un sistema de pequeñas aberturas que comprende el conjunto de la fisura, y el régimen de caudales fue turbulento. Las grandes grietas, cuyo comportamiento se asemeja a un canal continuo, presentan un flujo similar al flujo laminar a través de placas paralelas. La implicación es que puede haber una relación entre  $C_E$  y  $\alpha$ .

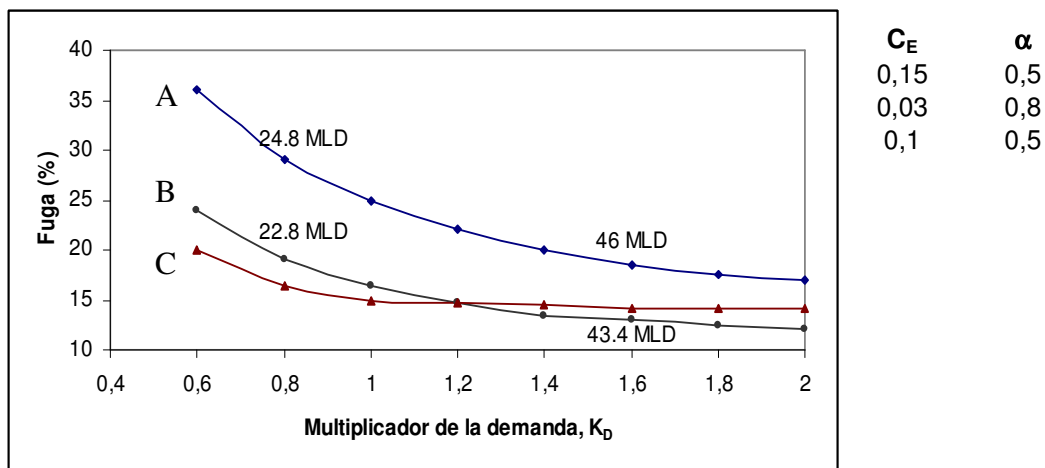


Figura 6. 10 Fugas como una función del multiplicador de la demanda  $K_D$  y las propiedades del orificio, caudales del sistema total con la presión compensada.

Para investigar la sensibilidad de la respuesta de las fugas a las diferentes configuraciones, se examinó de nuevo el hipotético sistema de 10 mallas. La Fig. 6.10 muestra la relación entre el multiplicador de la demanda  $K_D$  y las fugas  $L_k$ , para las fugas definido por las tres combinaciones de parámetros.  $K_D$  es el factor por el que cada demanda base nodal es multiplicada para reflejar los escenarios de los “no promedios” diarios, mientras que  $L_k$  es la fracción de la demanda total fugada ( $24K_D$  MLD). Las

curvas A y B representan las fugas definidas por  $\alpha=0.5$  y  $C_E$  y los valores de 0,15 y 0,1 MLd/m<sup>1/2</sup>, respectivamente. La curva C es definida con una relación diferente de fugas, es decir, por  $C_E=0.03$  MLd/m<sup>1/2</sup> y  $\alpha=0.8$ .

La intersección de las curvas B y C muestran la forma en que la función orificio con diferentes combinaciones de parámetros, puede dar las mismas fugas para un determinado  $K_D$ . A bajas  $K_D$ , la curva B da mayores fugas debido a que las presiones del sistema son pequeñas, y  $C_E$  es el parámetro dominante de la función orificio. Sin embargo, cuando la demanda total del sistema es mayor ( $K_D>1.2$ ), la importancia del factor  $h^\alpha$  en la Ec. (6.6) se hace evidente en los niveles más altos de fugas asociados con la curva C. Una característica evidente de la fig. 6.10 es que la curva C es más llana que B. Esto se explica teniendo en cuenta la derivada de Ec. (6.6).

$$\frac{dQ_l}{dh} = \alpha C_E h^{\alpha-1} \quad (6.14)$$

Para  $\alpha<1$ ,  $Q_l$  aumenta con la  $h$  en una disminución de la tasa o índice, sin embargo como  $\alpha$  se aproxima a la unidad, el índice de este decremento disminuye y un alto volumen de fugas está asociado con el mismo  $K_D$ . Cuando  $\alpha=1$ ,  $Q_l$  está relacionada linealmente con  $h$  y la curva asociada en la Fig. 6.10 será plana, es decir,  $L_k$  sería independiente de  $K_D$ . Las tres curvas descienden a una tasa decreciente para las grandes  $K_D$ . La relación inversa existe porque el aumento de la demanda total del sistema deja atrás el aumento de volumen fugado, conforme  $K_D$  crece. Las presiones más altas asociados con un mayor  $K_D$  en el sistema de presión compensada, conducen a un mayor volumen de fugas, y la tasa de descenso de cada una de las curva se reduce. Cabe señalar que el aumento del bombeo necesario para atender mayores flujos, causa presiones excesivamente altas en la parte de aguas arriba del sistema. Por lo general, la capacidad del sistema podría ser mejorada para evitar esto, y el actual análisis es poco realista en este sentido.

El papel de la  $C_E$  puede evaluarse mediante la comparación de las curvas A y B, las cuales representan las fugas con el mismo valor del exponente  $\alpha=0.5$  pero diferentes valores de los coeficientes de emisores. La posición relativa de estas curvas expone la esencial relación lineal entre  $L_k$  y  $C_E$  cuando  $\alpha$ ,  $K_D$  y las presiones se mantienen constantes. Por ejemplo a  $K_D=0.8$ , un avance desde A a B representa un aumento del 50% en  $C_E$  desde 0,1 a 0,15, lo que también corresponde a un incremento del 50% en  $L_k$  del 20% al 30%.

#### 4.1.3.3 Relevancia de la localización de la fugas

Los análisis de fugas en tuberías simples, indican que la localización de las fugas afecta el consumo de energía, de tal forma que cuando la fuga específica se mueve hacia aguas abajo su impacto resulta mayor. Aunque la extrapolación directa de este resultado analítico no es factible para las redes de distribución, es lógico esperar que las fugas situadas en las porciones aguas abajo de una red, a menudo implican un mayor coste de la energía, porque los grandes caudales deben ser transmitidos a través de una mayor porción del sistema. Se realizó un análisis elemental en una sola fuga con  $C_E=0.2$  MLD/m<sup>1/2</sup> colocado en cuatro diferentes nodos (N4, 5, 11 y 16) de la red hipotética, y la

consiguiente distribución de presiones fue comparada con el caso sin fugas para el régimen del día medio, obteniéndose diferentes porcentajes de la reducción de la presión en cada nodo en relación con el caso sin fugas, por una sola fuga en cada uno de los nodos de prueba.

Los resultados, aunque importantes, no son sorprendentes, pues una fuga presente en cualquier nodo provoca una respuesta para cada uno de los demás nodos. Sin embargo, los nodos más gravemente afectados son los adyacentes o en las cercanías del nodo con fuga. Por otra parte, las fugas en los nodos aguas abajo, como los nodos N11 y N16 también causa un mayor grado de reducción de la presión, tanto en términos de la magnitud de la reducción y el número de nodos, con reducciones de más de una cantidad determinada.

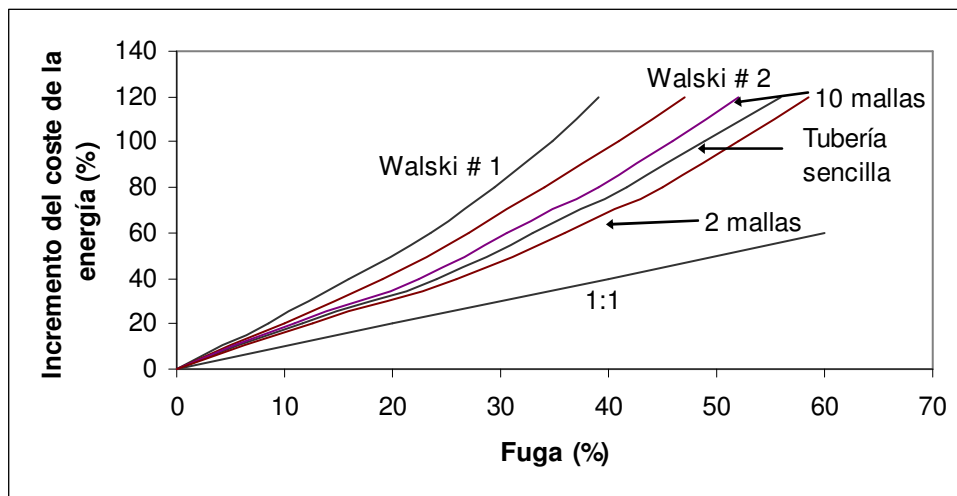


Figura 6. 11 Respuesta del coste de la energía debido a la complejidad del sistema.

#### 4.1.3.4 Complejidad del sistema y respuesta al coste de la energía

La complejidad de un sistema influye en la relación entre las fugas y el coste, y es una cuestión interesante para la que no existe una respuesta concreta. Sin embargo, las simulaciones de los sistemas con diferentes grados de complejidad, pueden dar una idea de la influencia de la estructura del sistema en los costes de la energía de los sistemas con fugas.

El número de mallas se utiliza aquí como un indicador de la complejidad del sistema. En la Fig. 6.11 se comparan cuatro sistemas diferentes. Estos incluyen el sistema de 10 mallas ya discutido, formas modificadas de la red de 20 mallas presentada en Walski *et al.* (1987) y del sistema de 2 mallas que aparece en el tutorial del manual del usuario de EPANET (Rossman, 2000), y finalmente, un solo tubo o tubería sencilla (ninguna malla en el sistema). La principal modificación a los sistemas de Walski y el tutorial de EPANET es la eliminación de los tanques y un enfoque exclusivamente centrado en las condiciones medias. Las simulaciones de la única tubería (L=4 km, D=300 mm, y coeficiente de Hazen-Williams C=100) se basan en una demanda aguas abajo de 30 l/s a 40 m de presión y una sola fuga en el nodo de la demanda. La red de Walski (Fig. 6.12) se simuló con dos diferentes distribuciones de fugas.

En el sistema denominado Walski # 1 fueron asignadas fugas a los nodos centrales N60, 80, 90, 100, 150 y 160. Para Walski # 2 varias de las fugas se trasladaron a la periferia de la red (N55, 90, 120, 140, 150 y 170). Todas las fugas tienen el mismo  $C_E$  y las simulaciones se realizaron de acuerdo a la metodología descrita anteriormente.

Una familia de polinomios de segundo orden de la forma  $ay^2+by$ , encajan las curvas en la Fig. 6.11 con excelente precisión. Por ejemplo, el coste de la energía de la curva del sistema de 10-mallas está bien descrita por la función  $z=0.012y^2+1.63$ , y donde “z” e “y” es el porcentaje de incremento en el coste de la energía y las fugas respectivamente. A pesar de que cada curva sigue la forma de una función cuadrática, no existe una “regla general” para relacionar el coste de energía, con las fugas para sistemas de distribución de agua. Lo que está claro, sin embargo, es que las fugas son definitivamente costosas, pues todas las curvas están muy por encima del valor 1:1, esto es, el aumento relativo en los costes de la energía excede significativamente al índice de fugas asociados. El efecto de distribución de las fugas en una red es evidente desde la disparidad entre las dos curvas de Walski.

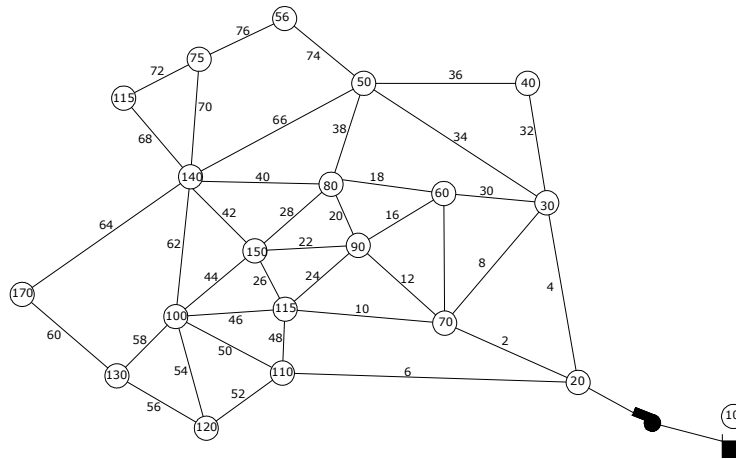


Figura 6. 12 Red de distribución para el sistema presentado por Walski et al (1987).

#### 4.1.3.5 Coste de las fugas en una perspectiva más amplia

La Fig. 6.13 describe conceptualmente tres curvas de coste de mantenimiento de una tubería (o parte de un sistema de distribución) adaptado de Kleiner *et al.* (1998a). Ellos suponen que la curva representa el incremento anual en el coste de mantenimiento de una tubería, debido a la degradación general de su capacidad con la edad. Debido a que esta curva no considera las fugas, la vida de servicio de una tubería puede ser erróneamente sobreestimada cuando está basada en este razonamiento. La presencia de fugas implica que los costes anuales de mantenimiento, son superiores a los previstos y se cruzan con el umbral del coste de reemplazo antes de lo previsto. El umbral del coste de reposición sirve como criterio para tomar la decisión de reemplazar una tubería.

La diferencia de tiempo entre la transgresión de este umbral y el diseño de la vida de servicio, constituye “el periodo de demora”, durante el cual los gastos van más allá del presupuesto disponible. Si se puede estimar el inicio de este período, la reparación de

las fugas u otras medidas de rehabilitación podrían ser aplicadas para reducir al mínimo los costes adicionales. Por el contrario, la tubería representada por la curva de “mejora” es inicialmente más cara debido a la selección de mejores materiales de fabricación, pero también más resistentes a las fugas.

Una tubería que se ajusta económicamente, puede ofrecer a los planificadores unos períodos de amortización buenos para recuperar los costes del capital adicionales, asociados con su fabricación y la aplicación. La oportunidad de ahorrar dinero durante la ampliación de la vida de servicio de las tuberías, implica que los recursos pueden ser asignados para reparar o sustituir tuberías y otras infraestructuras. La mejora de la caracterización de las fugas y la evaluación de los costes ayudará a determinar la naturaleza de la curva de mejora.

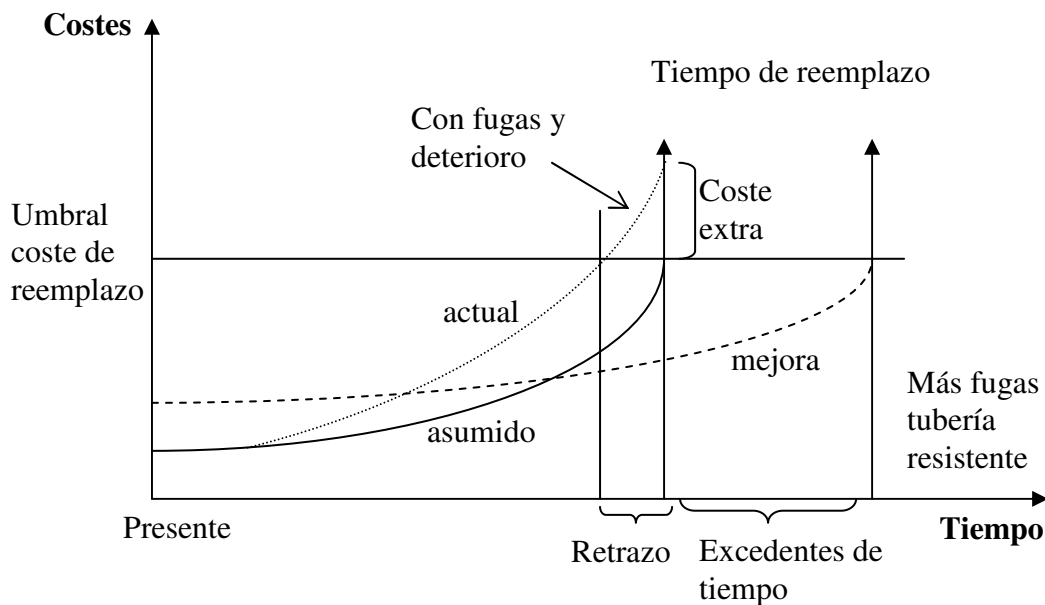


Figura 6. 13 Curvas de costes de mantenimiento conceptual para una tubería (o para una porción de una red de distribución)

La diferencia del coste entre las curvas “actual” y “asumida” de la Fig. 6.13 comprende tanto el agua pérdida, así como los costes de la energía. Aunque el coste del agua perdida ha dominado la atención a expensas de las fugas, el examen de la relación entre los costes del agua y la energía han tendido a ser ignoradas. El coste diario adicional del sistema de operación debido a la pérdida de agua a través de una tubería con fugas  $P_w$  puede ser calculado desde  $P_w=3600K_wQ_fT$  como.

$$P_w = k_w C_E [H_d + (1-x)H_f]^a 3600T \quad (6.15)$$

Donde:

$k_w$  = Precio unitario del agua en  $\$/m^3$

$T$  = Duración del análisis

El coste diario de la energía adicional  $P_E$ , es el producto del precio unitario de la electricidad ( $\$/kWh$ ), la diferencia en la energía suministrada  $\Delta E_s$  entre los casos de fuga y no-fuga, y la duración del análisis  $T$  es dado como  $P_E=k_E\Delta E_sT$  de la ecuación

(6.9) y (6.10). La expresión es resuelta en las cargas del sistema y los parámetros adimensionales  $a$  y  $x$ .

$$P_E = k_E \gamma Q_d [(1+a)(H_d + H_f) - (H_d + H_f)] T \quad (6.16)$$

$$P_E = k_E \gamma Q_d ((1+a)\{H_d + H_f [1 + ax(a+2)]\} - (H_d + H_f)) T \quad (6.17)$$

Donde  $a$  es calculado de acuerdo a la ec. 6.7. Estas ecuaciones fueron probadas para una red principal ( $L=2$  km,  $D=254$  mm) con una demanda constante  $Q_d=0.07$  m<sup>3</sup>/s y  $H_d=25$  m y los parámetros de fuga  $C_E=0.001$  m<sup>5/2</sup>/s y  $a=0.5$ .

La Fig. 6.14 muestra la grafica del caudal diario adicional y los costes de la energía, como una función de localización de fugas  $x$  cuando a la tubería es asignado un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams  $C=130$  (curvas de línea discontinua) y  $C=80$  (curvas de línea continua). Estos valores de  $C$  reflejan la tendencia de las fuga en las tuberías cuando son nuevas (debido a la fabricación de la tubería y/o defectos de instalación) y cuando envejecen, las cuales se han incluido para ilustrar cómo los costes de las fugas se distribuyen entre los costes del agua y la energía desperdiciada, de acuerdo con las características de la fricción de las tuberías.

Los precios unitarios para el agua y la electricidad en la ciudad de donde se aplico el análisis (Toronto) en el verano de 2001, son los siguientes: un precio de \$ 0.10/kWh para la electricidad; los clientes residenciales suelen pagar alrededor de \$ 0.50/m<sup>3</sup> de agua, y por tanto, la Ciudad paga una fracción de esta cantidad como su coste marginal de un metro cúbico de agua. Se escoge un valor de \$ 0.05/m<sup>3</sup> con el fin de que el coste diario adicional de la tubería, debido a la pérdida de agua y la energía sea proporcional. La Fig. 6.14 muestra que a estos precios, el coste adicional diario domina sobre los costes de la energía en todos los lugares posibles de fugas.

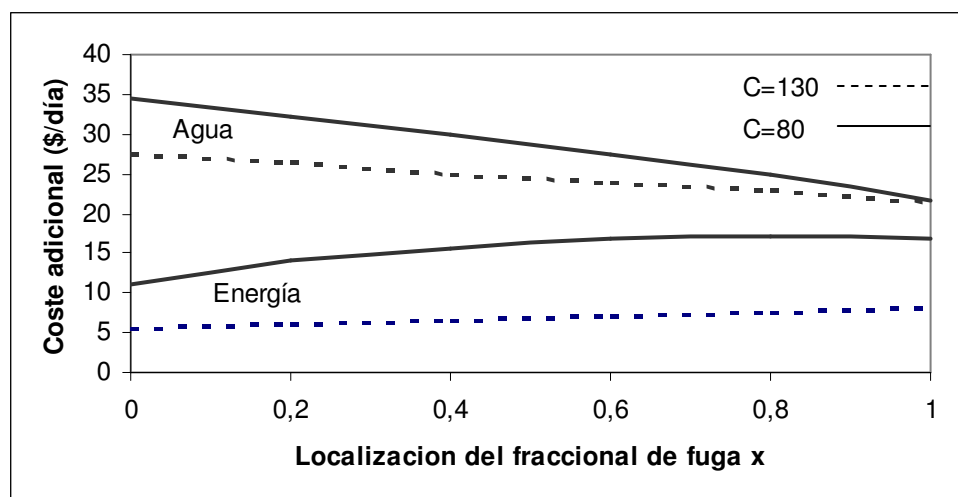


Figura 6. 14 Curvas del coste de la energía y del agua para una tubería fugando con demanda específica y características de fuga

El rol de la localización de las fugas es evidente en la Fig. 6.14 y exhibe las relaciones representadas en las figuras. 6.7 y 6.8. Como  $x$  aumenta, los costes de la energía siguen, mientras que el coste del agua disminuye. Cuando  $C$  se cambia de 130 a 80, ambos, el

---

coste del agua y de la energía se incrementan en todos los valores de  $x$ , (excepto en  $x=1$  donde los costes del agua son equivalentes, porque  $H_i=H_d$ ), sin embargo sus curvas correspondientes se aproximan entre sí más rápidamente. Estos cambios reflejan el hecho de que las tuberías rugosas disipan la energía, y por tanto la presión más eficazmente conforme el agua viaja aguas abajo. Como resultado las fugas decrecen con mayor rapidez con respecto a  $x$ , mientras que el suministro de la energía debe ser aumentado para superar el aumento de la fricción. La relativa forma llana del valor de  $C=130$  de la curva de costes de energía, refleja el carácter compensatorio de los costes de fuga cuando en un modelo de una fuga es usado un orificio. Cerca del final de la tubería aguas arriba las presiones son mayores o altas y por tanto, se pierde más agua. Y el consumo de la energía es menor aquí porque la mayor parte de la tubería lleva sólo el caudal de diseño.

Cerca del final de la red (aguas abajo), las presiones son más bajas y se pierde menos agua, sin embargo, la mayor parte de la tubería tiene un mayor flujo y por lo tanto, las pérdidas por fricción son mayores. En total la mayor parte del coste total de operación adicional, es debido a las fugas que se componen del “desperdicio” de energía. De hecho para este ejemplo básico, cuando la tubería se le asigna  $C=80$  y la fuga se localiza en medio de la tubería (es decir,  $x=0.5$ ), el coste anual de pérdida de agua es de aproximadamente \$ 10400, mientras que el coste del desperdicio de energía es de aproximadamente \$ 5.900. En consecuencia, aun cuando el coste marginal del agua es superior, la fuga sigue siendo costosa a partir de una perspectiva de la energía solo. Es evidente que desde una perspectiva financiera, la importancia relativa de agua o los costes de la energía **depende de sus precios relativos**.

Aunque los resultados obtenidos deben ser colocados en un contexto económico más amplio, antes de que los cambios en el procedimiento operativo puedan ser prescritos, la discusión anterior demuestra que la motivación para la reparación de fugas sin duda existe. La localización y la reparación de las fugas requieren la aplicación de recursos tanto económicos, humanos, tecnológicos, etcétera. En consecuencia los planificadores deben tomar las decisiones con respecto a la reparación de las fugas, sobre la base de una variedad de otras consideraciones. Walski (1993) indica que los sistemas de distribución de agua deberán cumplir muchos objetivos, algunos de los cuales compiten contra el objetivo de la minimización de la energía, aduce que existen varias formas distintas además de la reparación de fugas, en las cuales se ahorran los costes en la bomba.

A pesar de tácticas, como la mejora de la eficiencia de bombeo y considerar el horario de operación, en base a los precios horarios del coste de la energía, no se debe de eliminar por completo el aspecto del medio ambiente, o el coste de oportunidad de no corregirlos. Los enfoques operacionales, tales como el mantenimiento de los niveles más bajos de los tanques o la reducción de los excesos de presión (sobre todo fuera de las horas punta desde el punto de vista energético), también se puede reducir la cantidad de agua y el desperdicio de energía, aunque su aplicación algunas veces puede ser verdaderamente difícil de llevar a la práctica.

A pesar de las evidentes ventajas de la reparación de fugas, no es menos interesante examinar brevemente algunos de los costes ocultos en la reparación de fugas. Uno de posibles “beneficios” es la disminución del tiempo de residencia del agua, durante los períodos de reducción de los flujos. Otra es la posible atenuación de transitorios

---

---

hidráulicos, debido a las fugas pueden proporcionar un medio de disipación del exceso de presiones de la misma manera como las válvulas de alivio de presión. En consecuencia, los sistemas con fugas pueden experimentar el rompimiento de las tuberías, y otros daños de forma menos violenta cuando experimentan fenómenos transitorios. Aquí se da por tanto una relación entre las fugas y las roturas de tuberías.

## **4.2 Riesgo y sus consecuencias**

El concepto de probabilidad de fallo es fundamental y se especifica habitualmente, sólo en función de estudios comparativos y de la experiencia acumulada. Además, los métodos de cálculo probabilístico tienen varias deficiencias, como la ausencia de consideración de accidentes y otras situaciones de riesgo y las consecuencias que se derivarían de éstos. Estas condiciones extremas, están llegando a ser cada vez con más frecuencia causas de fallos graves y de otros sucesos adversos. La experiencia disponible indica claramente que los procedimientos de cálculo probabilístico, pueden ser complementados eficazmente mediante un análisis y una evaluación del riesgo, que tendrán en cuenta las diferentes consecuencias de los sucesos desfavorables. Por lo tanto se anticipa que los métodos de cálculo de ingeniería avanzados añadidos a conceptos probabilístico tradicionales, también incluirán habitualmente criterios para riesgos aceptables.

La fiabilidad de las estructuras y de otros sistemas de ingeniería, está asociada a una serie de incertidumbres difíciles de evaluar, pero que pueden describirse bien mediante métodos probabilístico.

El análisis del riesgo es una parte importante de la evaluación y la gestión íntegra del riesgo en un determinado sistema, tal como se muestra en la figura 6.15 (adaptada de CAN/CSA). El análisis del riesgo de un sistema consiste en la utilización de la información disponible, para estimar el riesgo de personas o poblaciones, de propiedades o de sus alrededores de peligros identificados. La evaluación del riesgo incluye además una decisión (el riesgo puede aceptarse o disminuirse) según se indica en la figura 6.15. El procedimiento completo de evaluación del riesgo es típicamente un proceso iterativo.



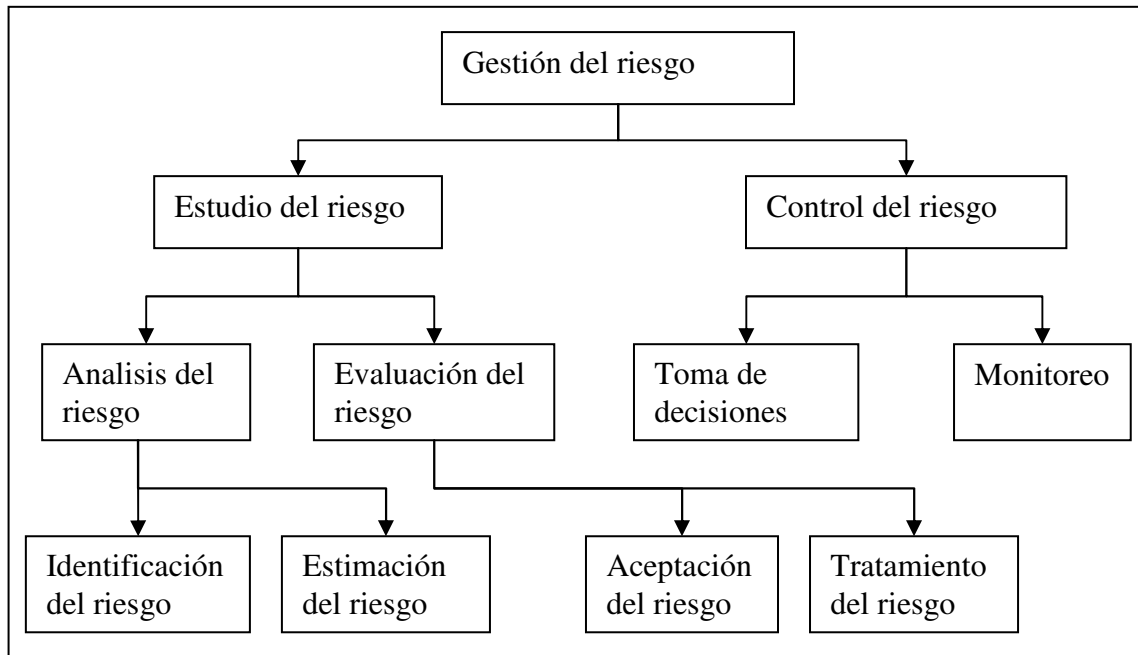


Figura 6. 15 Esquema para la gestión del riesgo (adaptada de Holicky, 2003)

#### 4.2.1 Identificación del riesgo

Un riesgo es un conjunto de circunstancias posiblemente ocurridas dentro de un sistema dado, con la potencialidad de causar sucesos con consecuencias indeseables. Por ejemplo el riesgo en un sistema de distribución, puede definirse como un conjunto de circunstancias con el potencial de originar una acción accidental

Por lo general, los riesgos  $H_i$  son situaciones mutuamente excluyentes (p. ej. situaciones de cálculo, en lo que respecta a un edificio, de tipo accidental y permanente). Entonces cada situación  $H_i$  acontece con una probabilidad  $P\{H_i\}$ , tal que  $\sum P\{H_i\}=1$ . Si las situaciones  $H_i$  no son mutuamente excluyentes, entonces el análisis se torna un poco más complicado.

Nótese que en algunos documentos (por ejemplo en el documento europeo EN *Risk analysis requirements and guidelines*, 2002), el riesgo se define como un suceso, mientras que en análisis del riesgo, habitualmente se considera como una condición que potencialmente puede originar un suceso, por lo tanto como sinónimo de peligro. Un escenario de riesgo es una secuencia de posibles sucesos, asociada a un riesgo determinado y que tiene consecuencias indeseables. Para identificar los posibles defectos de un sistema, o de uno de sus subsistemas, resulta fundamental proceder a un análisis de riesgo. Se requiere un examen minucioso y profundo del sistema (Schneiter *et al.* 1996).

El modelado de escenarios relevantes puede depender de las características específicas del sistema. Por esta razón se han desarrollado diferentes técnicas para la identificación de los riesgos (p. ej. PHA, HAZOP) y para el modelado de escenarios relevantes (árbol de fallos, árbol de sucesos/árboles de decisiones, redes de causas).

---

## 4.2.2 Estimación de probabilidades

La probabilidad es la verosimilitud o el grado de certeza con respecto a que ocurra un suceso particular durante un determinado periodo de tiempo.

Tomando la hipótesis de que un sistema puede encontrarse en una situación  $H_i$  tal que las demás situaciones posibles quedan entonces excluidas, y que el fallo  $F$  de un sistema, dada una situación particular  $H_i$ , ocurre con la probabilidad condicionada  $P\{F|H_i\}$ , entonces la probabilidad total de fallo  $p_F$  viene dada por la ley de la probabilidad total como:

$$p_F = \sum_i P\{H_i\}P\{F|H_i\} \quad (6.18)$$

La ecuación (6.18) puede utilizarse para la modificación de las probabilidades parciales  $P\{H_i\}$   $P\{F|H_i\}$  (apropiadas para las situaciones  $H_i$ ), con el objetivo de satisfacer la condición de cálculo  $p_F < p_t$ , donde  $p_t$  es una probabilidad de fallo específica que se desea conseguir. El valor deseable  $p_t$  puede determinarse utilizando la optimización probabilística de una función determinada, como por ejemplo el coste total.

Las probabilidades condicionadas  $P\{F|H_i\}$ , deben estar determinadas por un análisis probabilístico, detallado de las situaciones respectivas  $H_i$  bajo escenarios pertinentes. Los métodos tradicionales de fiabilidad, suponen que el fallo  $F$  del sistema puede estar bien definido en el dominio del vector de variables básicas  $X$ . Por ejemplo, se supone que un fallo en un sistema puede ser definido por la inecuación  $g(x) < 0$ , donde  $x$  es la comúnmente denominada función de estado límite, donde  $x$  es una realización de otro vector  $X$ . Obsérvese que  $g(x) = 0$  describe la acotación del estado límite y la inecuación  $g(x) > 0$  el estado de seguridad para la estructura.

Si la densidad de probabilidad conjunta  $f_X(x|H_i)$ , de las variables básicas  $X$  dada una situación  $H_i$  es desconocida, la probabilidad de fallo condicionada  $P\{F|H_i\}$  puede determinarse entonces mediante la integral

$$P\{F|H_i\} = \int_{g(x)<0} f_X(x|H_i)dx \quad (6.19)$$

Debe mencionarse que la probabilidad  $P\{F|H_i\}$ , calculada mediante la ecuación (6.19) presenta por lo general dos deficiencias importantes:

- Incertidumbre en la definición de la función de estado límite  $g(x)$ .
- Incertidumbre en el modelo teórico para la función de densidad  $f_X(x|H_i)$  de las variables básicas  $X$  (Steward *et al.* 1998).

Tales deficiencias constituyen las principales causas de las discrepancias observadas, entre una determinada probabilidad  $p_F$  y la frecuencia real de fallos; este problema resulta particularmente molesto para los casos de incendio. Todavía, el requisito de probabilidad  $p_F < p_t$  se acepta generalmente como uno de los criterios básicos para el cálculo de estructuras.

En un análisis de riesgo, necesitamos conocer no sólo la probabilidad del fallo estructural  $F$ , sino también las probabilidades de todos los sucesos con consecuencias

desfavorables. En general, las situaciones  $H_i$  pueden ocasionar un número de sucesos  $E_{ij}$  (p. ej. deformaciones excesivas, desarrollo total de un fuego). Las probabilidades condicionadas  $P\{E_{ij}|H_i\}$  que se requiera estudiar, deben fijarse mediante un análisis separado utilizando varios métodos, por ejemplo árboles de fallos o redes de causas.

### 4.2.3 Estimación de las consecuencias

Las consecuencias son posibles desenlaces de un suceso deseable o indeseable, que pueden ser expresados verbal o numéricamente para definir la magnitud de las fatalidades humanas, los perjuicios o daños ambientales y las pérdidas económicas. Un procedimiento sistemático para describir y/o calcular dichos desenlaces, es el denominado análisis de consecuencias. Obviamente, las consecuencias no son por lo general unidimensionales. Sin embargo unos casos concretos pueden ser simplificados y descritos sólo mediante varias componentes, por ejemplo fatalidades humanas, daños ambientales y costes. Actualmente sólo varios costes son usualmente incluidos. Se supone que las consecuencias adversas  $E_{ij}$  de los sucesos pueden expresarse normalmente mediante varias componentes  $C_{ij,k}$ , donde el subíndice  $k$  se refiere a los componentes individuales (por ejemplo el número de vidas perdidas, de perjuicios humanos, y de daños ocasionados expresados de una forma concreta).

### 4.2.4 Estimación del riesgo

El riesgo es una medida del peligro que los sucesos indeseables representan para los valores humanos, ambientales o económicos. El riesgo se expresa normalmente, mediante la probabilidad de que acontezcan sucesos indeseables, junto con las consecuencias que éstos implicarían. Se estima a menudo mediante la esperanza matemática de las consecuencias de un suceso indeseable. Entonces el riesgo es el producto "probabilidad x consecuencias". Sin embargo, una interpretación más general del riesgo, trabaja con la probabilidad y las consecuencias de una manera distinta. La presentación en forma de producto es útil a veces, particularmente cuando se considera un espectro de consecuencias, cada magnitud con su propia probabilidad de ocurrencia.

Se denomina estimación del riesgo, al proceso que se sigue para obtener una estimación de una medida de riesgo. Como ya se ha planteado anteriormente, la estimación del riesgo está basada en la identificación del peligro y generalmente consta de los siguientes pasos: definición del alcance, análisis de frecuencia, análisis de consecuencias e integración. Si se da correspondencia uno a uno entre las consecuencias  $C_{ij,k}$  y los sucesos  $E_{ij}$ , entonces la componente de riesgo  $R_k$  asociada a las situaciones consideradas  $H_i$  viene dada como la suma

$$R_k = \sum_{ij} C_{ij,k} P\{E_{ij} | H_i\} P\{H_i\} \quad (6.20)$$

Si la dependencia de las consecuencias, respecto a los sucesos es más complicada que una simple relación uno a uno, entonces la ecuación (6.20) deberá ser modificada.

---

En algunos casos es posible manejar únicamente una componente de riesgo  $R$ , de forma que el subíndice  $k$  en la ecuación (6.20) puede omitirse. Además, la probabilidad de sucesos indeseados puede depender del vector de variables básicas  $X$ . En estas circunstancias el riesgo total puede escribirse formalmente como.

$$R = \int C(\mathbf{x})f_X(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad (6.21)$$

Donde  $C(\mathbf{x})$  es el grado de riesgo según una función de variables básicas  $X$ , y  $f_X(\mathbf{x})$  es la función de densidad de probabilidad conjunta  $X$ .

#### 4.2.5 Análisis de riesgo de fallo en las redes de distribución de agua

Comúnmente "riesgo" se refiere al conjunto de probabilidades de una ocurrencia de un evento y sus consecuencias, "análisis de riesgos" se refiere a un proceso de una estimación de la frecuencia, y consecuencias físicas de eventos indeseables (Ricci *et al.* 1981). El análisis de riesgos puede incluir una variedad de técnicas, desde un simple análisis cualitativo (por ejemplo, análisis de riesgos preliminar), o muy complejas técnicas cuantitativas (por ejemplo, redes Bayesianas) para sistemas dinámicos. Una breve descripción sobre algunas de las técnicas de análisis de riesgos, se presenta en esta sección.

Análisis de riesgos preliminares (PHA) por sus siglas en inglés, es una técnica de indicadores cualitativos para la realización de evaluaciones del riesgo en industrias de proceso químico. El PHA puede identificar sistemas y procesos que requieren un examen más detallado, para controlar los riesgos de accidentes graves (Fullwood y Hall, 1988). El Estudio de riesgos de operatividad (HAZOP) es una técnica, también comúnmente empleada en las industrias de procesos químicos, para la estimación de riesgo, para la seguridad y operatividad de mejoras. El Modo del fallo y Análisis de los efectos (FMEA), son comúnmente usados en la fiabilidad de la ingeniería, para analizar los posibles modos de fallo en un sistema y clasificarlos en función de su gravedad. Cuando el FMEA amplía al análisis de criticidad, la técnica es llamada modo de fallo y el análisis de los efectos de criticidad (FMECA) (Chakib *et al.* 1992).

Las técnicas tree-based o basada en árboles (jerárquica), son también ampliamente utilizadas para realizar análisis de riesgos. Un fallo es un diagrama de árbol lógico que muestra la relación entre el sistema de fallo, es decir, un acontecimiento indeseable en el sistema, y los fracasos de los componentes del sistema (Vincoli, 1994). El Análisis del árbol de eventos (ETA), es una técnica para ilustrar la secuencia de resultados que pueden surgir después de la ocurrencia, de un evento inicial seleccionado (Suokas y Rouhiainen, 1993). El análisis causa-consecuencia (ECP), combina el análisis de la causa (descrita por los árboles de fallo) y el análisis de las consecuencias (descrita por los árboles de eventos).

Las técnicas para el análisis de sistemas dinámicos, puede implicar la aplicación de métodos tales como diagrama/grafos de fallos, dinámico ETA, redes bayesianas, lógica difusa, etcétera. La técnica diagrama /grafos de fallos, utiliza las técnicas matemáticas y el lenguaje de la teoría de grafos, que construye el modelo de riesgo mediante la sustitución de elementos del sistema de entradas de "Y" e "O". Redes Bayesianas (BN) son gráficos directamente acíclicos, en la cual los nodos representan las variables y los

---

arcos dirigidos, describen la dependencia condicional de relaciones incorporados en el modelo.

Mediante un mapa cognitivo difuso (FCM) se puede realizar una excelente revisión del complejo sistema que utiliza relaciones causa-efecto para llevar a cabo análisis de riesgos (Kosko, 1986). Recientemente MacGillivray *et al.* (2006) realizaron una revisión de algunos de estos análisis de riesgos, y de las estrategias de la toma de decisiones. Esta revisión analiza críticamente una amplia gama de informes y una de estudios de investigación que utilizan las técnicas de análisis de riesgos, principalmente aplicadas en los sistemas de suministro de agua potable.

La cuantificación del riesgo de contaminación en redes de distribución de agua es una tarea difícil. Las redes de distribución de agua comprenden muchos kilómetros de tuberías de diferentes edades y diversos materiales, sujetas a variaciones operacionales y condiciones ambientales. Además, está la limitación de datos del funcionamiento y deterioro de las tuberías, puesto que no se encuentran disponibles a simple vista, dado que son estructuras que se encuentran enterradas. Por último, algunos de los procesos de fallo no son bien comprendidos y el diagnóstico de la contaminación es muy difícil, porque generalmente hay un desfase entre la ocurrencia del fallo y el momento en que las consecuencias son observados.

Tanto la teoría de conjuntos como la teoría de la probabilidad, son el marco de las matemáticas clásicas para caracterizar las incertidumbres. Desde la década de 1960, una serie de generalizaciones de estas teorías han desarrollado para formalizar los diferentes tipos de incertidumbres. Según Klir (1999), la valoración adecuada de las incertidumbre se puede lograr no solamente mediante la teoría clásica de conjuntos y teoría de la probabilidad, sino también mediante la teoría de conjuntos difusos (Zadeh, 1965), las teoría de la posibilidad (Dubois y Parade, 1988), y la teoría de Dempster-Shafer (DS) teoría (Dempster y Shafer 1968; Klir 1995).

Sadiq *et al.* (2004) desarrollaron una estructura jerárquica (o tree-based), que transformo el riesgo global de fallos relacionados con la calidad del agua en una red de distribución, en puntos de riesgos básicos. El riesgo fue caracterizado cualitativamente (o lingüísticamente), a partir de técnicas difusas combinado con un proceso de jerarquización analítica (AHP).

#### **4.2.6 El marco propuesto**

En muchos problemas de ingeniería, la información acerca de las probabilidades de riesgo de diversos temas es conocida o evaluada de forma muy vaga. La lógica difusa proporciona un idioma con la sintaxis y la semántica adecuada para traducir los conocimientos cualitativos en razonamientos numéricos. Cuando se realiza un análisis de riesgos para un sistema complejo, tanto los gestores, ingenieros, administradores, reguladores y otros agentes interesados, frecuentemente, articulan el riesgo en términos de variables lingüísticas como “muy alta”, “alta”, “muy baja”, “baja”, etcétera. Las técnicas basadas en lógica difusa, son capaces de trabajar de forma eficaz con esas vagas e imprecisas variables de razonamiento aproximado, que posteriormente ayudarán al proceso de toma de decisiones. Los números difusos triangulares (TFNs) se utilizan a menudo para representar variables lingüísticas (Lee, 1996). Una descripción más

completa de las técnicas basada en lógica difusa se puede consultar en Klir Yuan (1995) y Ross (2004).

#### 4.2.6.1 Difuminación del riesgo

La probabilidad  $r$  de fallo, se define por el número difuso triangular  $TFN_r$  y la consecuencia (o riesgo)  $l$  de fallo es definida por  $TFN_l$ . La tabla 6.5 describe en una escala de 11-grados para ambos  $r$  y  $l$ . El riesgo de fallo definido por los 5-grados de  $TFN_L$ , que se describen en la tabla 6.5. Las definiciones de TFNs pueden cambiarse o modificarse basados en opinión de expertos o en encuestas basado en el método Delphi.

Grados	Escala cualitativa de la probabilidad de riesgo	Escala cualitativa del consecuencia de riesgo	Número difuso triangular ( TFNr )
1	absolutamente bajo	absolutamente sin importante	[0, 0, 0.1]
2	extremadamente bajo	extremadamente sin importante	[0, 0.1, 0.2]
3	totalmente bajo	totalmente sin importancia	[0.1, 0.2, 0.3]
4	bajo	sin importancia	[0.2, 0.3, 0.4]
5	medianamente bajo	medianamente sin importancia	[0.3, 0.4, 0.5]
6	medio	neutral	[0.4, 0.5, 0.6]
7	medianamente alto	medianamente importante	[0.5, 0.6, 0.7]
8	alto	importante	[0.6, 0.7, 0.8]
9	totalmente alto	completamente importante	[0.7, 0.8, 0.9]
10	extremadamente alto	extremadamente importante	[0.8, 0.9, 1]
11	absolutamente alto	absolutamente importante	[0.9, 1, 1]

Tabla 6. 5 Escalas cualitativas de la probabilidad y consecuencia de riesgo de fallo

El riesgo de fallo en el ámbito probabilístico, es el conjunto de probabilidad de ocurrencia y las consecuencias de fallo. Cuando las probabilidades de ocurrencia y fallo se asume que son independientes unos de otros, su probabilidad conjunta es igual al producto de la respectivas probabilidades. En relación con el mismo supuesto de independencia, el riesgo difuso de fallo se calculará como el producto de los dos números difusos denotados por  $r$  y  $l$ . Por definición, el producto de dos  $TFN_s$  es en sí mismo un TFN. Teniendo un  $TFN_r$  definido por los miembros  $(a_r, b_r, c_r)$ , y otro  $TFN_l$   $(a_l, b_l, c_l)$ . El riesgo para  $TFN_{rl}$  para estos  $r$  y  $l$  se calcula por.

$$x = TFN_{rl} = TFN_r \times TFN_l = (a_r * a_l, b_r * b_l, c_r * c_l) \quad (6.22)$$

Las definiciones lingüísticas quedan establecidas en la tabla 6.6

Grado	Escala cualitativa del nivel de riesgo ( L )	Número difuso triangular ( TFN <sub>L</sub> )	Centroide L <sub>p</sub>
1	muy bajo	0, 0, 0.25	0.08
2	Bajo	0, 0.25, 0.5	0.25
3	Medio	0.25, 0.5, 0.75	0.50
4	Alto	0.5, 0.75, 1	0.75
5	muy alto	0.75, 1, 1	0.92

Tabla 6. 6 Definiciones lingüísticas de los grados usando números difusos triangulares para riesgo

Por ejemplo, si en un evento tiene una probabilidad  $r$  como extremadamente alta [0.8, 0.9, 1.0] y la consecuencia de riesgo  $l$  extremadamente importante [ 0.8, 0.9, 1.0 ]. El correspondiente riesgo  $x$  será un TFN<sub>rl</sub> [0.64, 0.81, 1.0]. Como se señala en la figura 6.16.

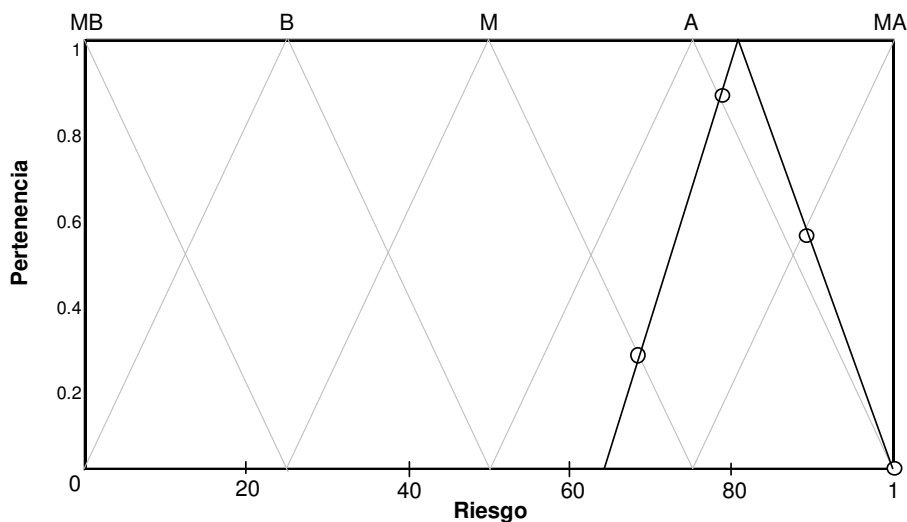


Figura 6. 16 Estimación del conjunto difuso de los 5 grados lingüísticos

Los conjuntos difusos no normalizados  $X_L$  [0,0,0.26,0.87,0.57] son los miembros de  $XL$ , para representar los grados de riesgo muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto respectivamente; la normalización de  $XL$  para obtener el conjunto difuso  $X$ , donde los miembros  $\mu_p$  de  $XL$  son transformados a  $\mu_p^N$  de  $X$  dividiendo cada  $\mu_p$  por la cardinalidad  $C$  (suma de todos los miembros en un conjunto difuso).

$$\mu_p^N = \frac{\mu_p}{\sum_{p=1}^n \mu_p} = \frac{\mu_p}{C} \quad (6.23)$$

En nuestro caso de la figura 6.16 el conjunto difuso  $X$  es [ 0.0, 0.0, 0.15, 0.51, 0.33 ] y puede ser expresado como  $X = \left[ \frac{0.0}{MB}, \frac{0.0}{B}, \frac{0.15}{M}, \frac{0.51}{A}, \frac{0.33}{MA} \right]$ . Ver tabla 6.7.

$x = \text{TFN}_{ri} = [0.64, 0.81, 1.00]$															
$p$	MB			B			M			A			MA		
$\text{TFN}_L$	0	0	0.25	0	0.25	0.5	0.25	0.5	0.75	0.5	0.75	1	0.75	1	1
Inferencia	0			0			0.26			0.87			0.57		
$X_L = [0, 0, 0.26, 0.87, 0.57]$	cardinalidad, $C = 1.70$														
$X = [0, 0, 0.15, 0.51, 0.33]$															

Tabla 6.7 Obtención de los valores del riesgo difuso

### 4.3 Desarrollo del cálculo de la priorización

Se pretende conformar una herramienta que nos permita decidir, en base a una restricción presupuestal, que cantidad de metros lineales de cada grupo de tuberías nos proporciona un mayor beneficio, en base a la valoración de los factores de influencia, el coste de rehabilitación y de los beneficios obtenidos con la rehabilitación. Para tal motivo utilizaremos la herramienta de algoritmos genéticos a través del método “recipe” del Evolver, del procedimiento señalado en el apartado 4.1 de este capítulo, en el cual va implícito la utilización de EPANET, para determinar el coste del “ahorro” de la energía eléctrica, y del caudal recuperado de las fugas. Para determinar el riesgo de la consecuencia de se aplicara el procedimiento señalado en el apartado 4.2.6., de este mismo capítulo.

En nuestro caso, se cuenta con una restricción presupuestal de 3.5 millones de pesos mexicanos, que es lo que se viene aplicando anualmente, en el programa de rehabilitación de tuberías por parte de JUMAPA. Para la aplicación se pretende priorizar de los ocho grupos de tuberías, la cantidad de longitud de tubería que maximice los beneficios, en la aplicación de los recursos para la rehabilitación de tuberías. Por lo tanto la función objetivo es:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n X_i (B_i - C_i) \quad (6.24)$$

s.a

$$\sum_{i=1}^n X_i (C_s) \leq 3.5 \text{ millones} \quad (6.25)$$

$$X_i \geq 500, X_i \geq 0 \quad (6.26)$$

Donde  $X_i$  es la cantidad de metros lineales de tubería,  $B_i$  se refiere a los beneficios totales,  $C_s$  los costes de sustitución y  $C_t$  a los costes totales. Para determinar los costes, se cuenta con los costes unitarios de rehabilitación por cada grupo de tubería, así como los valores de factores de influencia de cada uno de ellos.



### FACTORES DE INFLUENCIA

ID linea	Edad	Historial fugas	Capacidad transporte	IDN	IIQfuga	Tiempo renovación	Influencia rotura Q	Impacto medio amb	$\Sigma$ aritmetica
AC (A1)	10.0	10.00	3.98	4.1	0	7.19	3.26	6	44.53
AC (A2)	5.63	9.19	4.64	5.8	2.45	0	3.04	4.8	35.54
FoFo (C1)	6.94	8.36	5.02	5.2	0.55	6.33	4.46	4.8	41.67
Fo Ga (C1)	9.77	9.25	4.73	4.6	4.62	3.85	4.57	10	51.38
Fo Ga (C2)	9.38	9.92	4.1	5.5	3.72	10	4.1	4.2	50.92
PVC30	6.25	6.78	4.92	3.6	3.24	0	0.12	6	30.91
PVC20	4.17	7.26	4.27	5.5	10	0	1.76	0	32.95
Polietileno	5.21	9.10	2.86	10	2.23	0	1.12	0	30.52

*Tabla 6. 8 Concentrado de valores de los factores de influencia*

En la tabla 6.8 se muestra el resultado de los valores de los factores de influencia, que en conjunto con el coste de rehabilitación unitario se determinara el factor de coste, como se muestra en la tabla 6.9, donde se tiene en la segunda columna el factor antes señalado, que es el resultado del coste total dividido por la suma de los valores de los factores influencia. Así mismo en la columna cinco, se localizan los metros lineales de tubería que se modificaran, al determinar con los algoritmos genéticos la cantidad de longitud de tubería, que maximice los beneficios y cumpla las restricciones, en la columna de coste total, la sumatoria tendrá que ser igual al monto de la restricción presupuestaria de 3,5 millones de pesos mexicanos.

Coste \$/ML	Factor	m.l	C sustitución	m.l (a modificar)	Coste total
\$477	11.65	12605	\$6,012,585.00	12605	\$6,012,585.00
\$537	16.02	7243	\$3,889,491.00	7243	\$3,889,491.00
\$594	13.28	11613	\$6,898,122.00	11613	\$6,898,122.00
\$550	10.65	8600	\$4,730,000.00	8600	\$4,730,000.00
\$480	10.01	7540	\$3,619,200.00	7540	\$3,619,200.00
\$491	17.37	25201	\$12,373,691.00	25201	\$12,373,691.00
\$471	15.50	11548	\$5,439,108.00	11548	\$5,439,108.00
\$480	18.67	13865	\$6,655,200.00	13865	\$6,655,200.00
			\$49,617,397.00		\$49,617,397.00
			<b>\$3,500,000.00</b>		

*Tabla 6. 9 Factor de coste, longitudes totales y coste total*

Los beneficios logrados por el “ahorro” de energía al rehabilitar las tuberías, es decir, lo que se gasta de energía en “alimentar” las fugas, se determinan según el procedimiento detallado en el apartado 4.1 (determinación de la relación del coste de energía y las fugas en las tuberías) específicamente. A continuación se ilustra con un ejemplo de uno de los sectores el sector San Juanico, el procedimiento de cómo se determino el beneficio del ahorro de la energía y es de la siguiente manera:

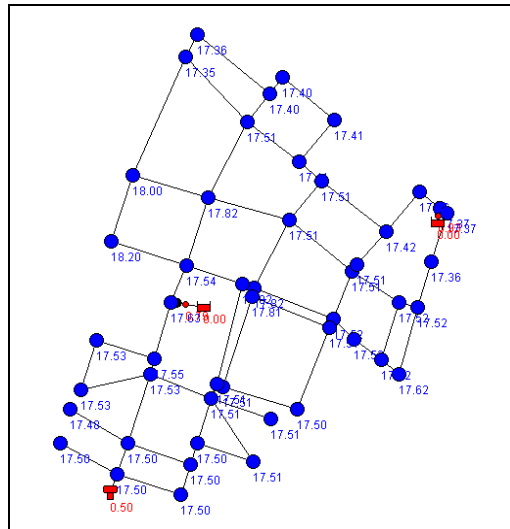


Figura 6. 17 Presión nodal con 85% de eficiencia en la red

En la figura 6.17 se muestra la presión nodal simulada con la red del 85% de eficiencia, que es el nivel deseado y con el cual se realiza el cálculo. En la figura 6.18 se muestra la presión nodal del estado actual de la red, que incluye las fugas, el caudal total a través de la red, es igual a la demanda total diaria de  $1381.61\text{m}^3$  y todas las presiones nodales tienen por lo menos 10 mca.

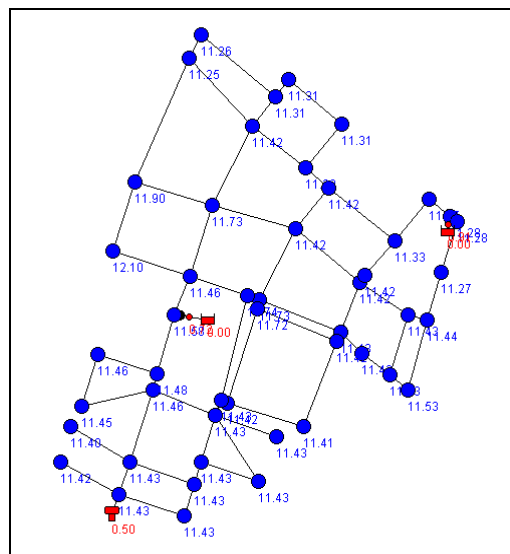


Figura 6. 18 Presión nodal, estado actual de la red

Cuando las fugas en los nodos tienen asociado un coeficiente de emisor, para representar el escenario actual, y la curva original de las estaciones de bombeo, se aplica el caudal total a través del sistema y dicho caudal se incrementa a  $1626.41\text{m}^3/\text{día}$ , mientras que todos los requisitos de la demanda se cumplen, pero la presión cae significativamente como se muestra en la figura 6.19. A pesar de que la satisfacción de las demandas nodales es un requisito típico del modelado, en compensación para las fugas, la magnitud de las pérdidas aumenta, hasta que el flujo total del sistema se convierte en  $1883.66\text{m}^3/\text{día}$ , y cumple con las presiones nodales mínimas; el adicional de  $257.25\text{m}^3/\text{día}$  está asociada a la presión, que depende de la demanda ejercida por las fugas y por consiguiente la energía aplicada para “alimentar las fugas”.

Sector	Q <sub>85%</sub> eficiencia coste día	Q sin cumplir presiones (a) coste día	Q cumpliendo presiones (b) coste día	Diferencia b-a
AC (A1)	\$621.31	\$875.00	\$1,231.00	\$356.00
AC (A2)	\$701.24	\$1,023.22	\$1,424.22	\$401.00
FoFo (C1)	\$567.30	\$831.31	\$1,214.31	\$383.00
Fo Ga (C1)	\$444.65	\$630.54	\$1,008.54	\$378.00
Fo Ga (C2)	\$678.95	\$944.22	\$1,345.22	\$401.00
PVC30	\$1,388.42	\$2,019.41	\$2,496.41	\$477.00
PVC20	\$538.26	\$787.19	\$1,191.19	\$404.00
Polietileno	\$174.84	\$259.51	\$504.51	\$245.00

Tabla 6. 10 Coste diario de la energía para los diferentes escenarios planteados

El coste de la energía para los diferentes escenarios es calculado por EPANET. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.10.

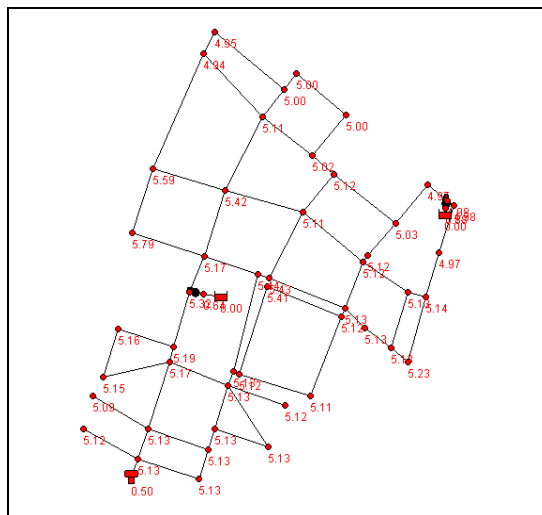


Figura 6. 19 Caída de presión en la red, aplicando curva de bombeo original

### 4.3.1 Cálculo del caudal fugado

El procedimiento para determinar el caudal fugado es similar al que se realizó para el cálculo del coste de la energía, con la diferencia de que ahora se realiza la comparación de los volúmenes demandados, en las condiciones actuales como se encuentra la red, versus los volúmenes demandados por la red con el 85% de eficiencia. El resultado de la comparación del balance de masa de cada uno de los escenarios (ver tabla 6.11), se multiplica por el precio promedio del coste del m<sup>3</sup> de agua.

Sector	Q <sub>85%</sub> eficiencia m <sup>3</sup> /día	Q sin cumplir presiones a	Q cumpliendo presiones b	Diferencia b-a
AC (A1)	1161.09	1559.18	1908.06	348.88
AC (A2)	1164.71	1379.95	1788.97	409.02
FoFo (C1)	848.99	1129.18	1506.05	376.87
Fo Ga (C1)	918.44	1138.71	1511.04	372.33
Fo Ga (C2)	4194.64	4538.44	4904.06	365.62
PVC30	4698.00	5473.63	5934.89	461.26
PVC20	3269.20	3975.66	4375.62	399.96
Polietileno	1381.61	1626.41	1883.66	257.25

*Tabla 6. 11 Caudales diarios para los tres escenarios planteados*

#### 4.3.2 Cálculo del riesgo de la consecuencia de fallo

Es necesario calcular el coste del riesgo de la consecuencia de fallo, al no rehabilitar la tubería a tiempo, de tal manera que se asume que al rehabilitar la tubería, evitaremos el fallo y su posible consecuencia en el entorno, lo cual esto se considerara como un beneficio, y se tomara en consideración dentro de los beneficios en la función objetivo.

Para nuestro caso de estudio, se consideraran solo los riesgos con un nivel de probabilidades alto y nivel de consecuencias importantes, las cuales arrojan una probabilidad de ocurrencia en el nivel del riesgo medio del 15%, y una probabilidad de ocurrencia en el nivel de consecuencia alto del 51%. La siguiente consideración, es de probabilidades totalmente altas y nivel de consecuencias importantes, las cuales arrojan una probabilidad de ocurrencia en el nivel del riesgo medio del 33%, y una probabilidad nivel del riesgo alto del 34%. Así se continúa sucesivamente hasta complementar nivel de probabilidades absolutamente altas, y nivel de consecuencias absolutamente importante.

Para considerar como un beneficio la inversión en la rehabilitación de las tuberías, **se consideran las tuberías con un nivel de riesgo alto y un nivel de consecuencia importante.**

La clasificación de la escala cualitativa de la probabilidad de riesgo, se realiza en base a la localización de puntos considerados como críticos, tales como centros de atención hospitalaria, centro educativos, parques públicos o centros de recreo, espacio de aglomeración gubernamental, localizados todos ellos en la proximidad de las tuberías de diámetros mayores, o iguales de 150 mm, a una distancia menor o igual a 2 m a las cuales les llamaremos puntos “neurálgicos”; edificaciones de dimensiones considerables tales como edificios mayores o iguales de 5 niveles, así como de monumentos históricos, de vialidades importantes debido al tipo de tráfico, donde las consecuencia por un fallo de una tubería puede ser considerable, en base a los antecedentes de los costes en los casos anteriores se considera un coste de 800.000 pesos mexicanos (53.000 €), por daños estructurales menores a edificios, por daños menores a autos, el coste será de 500.000 pesos mexicanos (33.000 €), por daños que se pudieran ocasionar en



En base a lo anteriormente descrito, se aplica a nuestro caso y se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6.13.

	Puntos neurálgicos \$500,000.00	Edificios \$800,000.00	Vialidades importantes \$420,000.00	Escala cualitativa
AC (A1)	0	0	0	abs sin importancia
AC (A2)	0	1	0	importante
FoFo (C1)	0	0	0	abs sin importancia
Fo Ga (C1)	0	0	0	abs sin importancia
Fo Ga (C2)	1	1	0	ext importante
PVC30	1	0	1	completamente importante
PVC20	0	0	0	abs sin importancia
Polietileno	0	0	1	importante

*Tabla 6. 13 Resultados de la clasificación de las consecuencias de riesgo*

La probabilidad de fallo se calcula a través de la ecuación 6.27, donde se asigna un valor de probabilidad correspondiente a  $K_1=1$ ,  $K_2=0.8$ ,  $K_3=0.6$ ,  $K_4=0.4$ ,  $K_5=0.2$ . A cada grupo de tuberías, se le asigna un valor en base al criterio del evaluador y a las características de cada grupo de tuberías, para determinar la probabilidad de fallo, se multiplica la probabilidad determinada por el valor del peso asignado, el resultado es la probabilidad de fallo como se muestra en la siguiente expresión.

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i * w_i) \quad (6.27)$$

Los factores considerados en la influencia de fallos son:

- ⇒ Tipo de material
- ⇒ Presión hidrostática
- ⇒ Edad de la tubería
- ⇒ Historial de fugas
- ⇒ Medio ambiente
- ⇒ Tipo de unión
- ⇒ Continuidad en la operación

Los resultados de la probabilidad de fallo, para el grupo de tuberías del caso de estudio se muestran en la tabla 6.14.

ID	tipo del material			presión hidrostática			edad de la tubería			historial de fugas			medio ambiente			tipo de unión			continuidad en la operación			Σ
	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	
AC (A1)	0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.01	0.2	0.2	0.03	0.2	0.4	0.06	0.1	0.6	0.06	0.1	0.4	0.02	0.1	0.2	0.02	0.22
AC (A2)	0.1	0.4	0.04	0.1	0.4	0.04	0.2	0.4	0.06	0.2	0.4	0.08	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.02	0.30
FoFo (C1)	0.2	0.2	0.03	0.1	0.2	0.02	0.2	0.6	0.12	0.1	0.2	0.02	0.2	0.2	0.03	0.2	0.2	0.03	0.1	0.4	0.02	0.27
Fo Ga (C1)	0.3	0.6	0.15	0.1	0.2	0.02	0.2	0.4	0.06	0.1	0.4	0.04	0.2	0.2	0.03	0.2	0.2	0.03	0.1	0.6	0.02	0.35
Fo Ga (C2)	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.06	0.2	0.2	0.04	0.2	0.2	0.04	0.2	0.4	0.06	0.2	0.2	0.03	0.1	0.6	0.02	0.35
PVC30	0.1	0.2	0.01	0.2	0.6	0.12	0.1	0.2	0.01	0.1	0.2	0.02	0.1	0.6	0.03	0.1	0.4	0.04	0.2	0.4	0.06	0.29
PVC20	0.1	0.2	0.01	0.2	0.4	0.08	0.1	0.2	0.01	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.02	0.1	0.2	0.01	0.2	0.2	0.04	0.21
Polietileno	0.1	0.4	0.02	0.1	0.4	0.04	0.1	0.2	0.01	0.1	0.2	0.01	0.2	0.4	0.08	0.3	0.6	0.15	0.1	0.6	0.06	0.37
	1		0.38	1		0.39	1		0.34	1		0.31	1		0.35	1		0.33	1		0.26	

Tabla 6. 14 Concentrado del cálculo de la probabilidad de fallo

De los resultados obtenidos en la tabla 6.13, se obtiene la probabilidad de fallo para cada uno de los grupos de tuberías, una vez que se determina la probabilidad, se realiza la siguiente clasificación, para determinar la escala cualitativa de la probabilidad de riesgo, la clasificación es la siguiente:

Grado	Rango de probabilidad	Clasificación de la escala cualitativa
1	20-25	Alto
2	25-30	Completamente alto
3	30-35	Extremadamente alto
4	35-40	Absolutamente alto

Tabla 6. 15 Escala cualitativa de la probabilidad de riesgo

El rango de los cuartiles se determina en base al rango de probabilidad total (Tuhovcak *et al.* 2007), siendo este para nuestro caso el rango de 20 a 40, de tal manera que la clasificación se realiza como se muestra en la tabla 6.15. Donde el rango de menor importancia en la clasificación es de 20-25, lo que se clasifica como alto y así sucesivamente, hasta llegar a la clasificación de absolutamente alto.

Una vez que se tiene la clasificación de la escala cualitativa de la probabilidad de riesgo, se determina para cada grupo de tuberías, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.16.

ID	Probabilidad de fallo	Escala cualitativa
AC (A1)	0.22	alto
AC (A2)	0.30	completamente alto
FoFo (C1)	0.27	completamente alto
Fo Ga (C1)	0.35	extremadamente alto
Fo Ga (C2)	0.35	extremadamente alto
PVC30	0.29	completamente alto
PVC20	0.21	alto
Polietileno	0.37	absolutamente alto

Tabla 6. 16 Clasificación de la probabilidad de fallo

Una vez que se tiene la clasificación y la valoración de las escalas cualitativas, de la probabilidad de riesgo y la consecuencia de riesgo, se procede a la determinación del conjunto de números difusos, donde se obtiene el riesgo de los números difusos triangulares ( $TFN_{ri}$ ), para cada grupo de tuberías mostrado en la tabla 6.17.

ID	Escala cualitativa de riesgo	Escala cualitativa de la consecuencia de riesgo	Numeros difusos triangulares			$TFN_r \times TFN_i$		
AC (A1)	alto	abs sin importancia						
AC (A2)	comp alto	importante	0.7	0.8	0.9	0.6	0.7	0.8
FoFo (C1)	comp alto	abs sin importancia						
Fo Ga (C1)	ext alto	abs sin importancia						
Fo Ga (C2)	ext alto	ext importante	0.8	0.9	1	0.8	0.9	1
PVC30	comp alto	completamente importante	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9
PVC20	alto	abs sin importancia						
Polietileno	abs alto	importante	0.9	1	1	0.6	0.7	0.8

Tabla 6. 17 Resultados de los números difusos triangulares.

En la figura 6.21 tenemos el ejemplo de la estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso, en este caso para el grupo de tuberías de PVC 30 (ver tabla 6.17), donde el número difuso triangular de la probabilidad de fallo ( $TFN_r$ ) es [0.7, 0.8, 0.9], dado que la probabilidad de riesgo, es completamente alto y el número difuso triangular de la consecuencia de fallo ( $TFN_i$ ) [0.7, 0.8, 0.9], con la consecuencia de riesgo completamente importante. Esto se obtiene de la tabla 6.17 donde se definen los números difusos triangulares, para una probabilidad de riesgo completamente alto, y una consecuencia de riesgo completamente importante. Al realizar la operación ( $TFN_r * TFN_i$ ), se obtiene el correspondiente riesgo x  $TFN_{ri}$  [0.49, 0.64, 0.81].

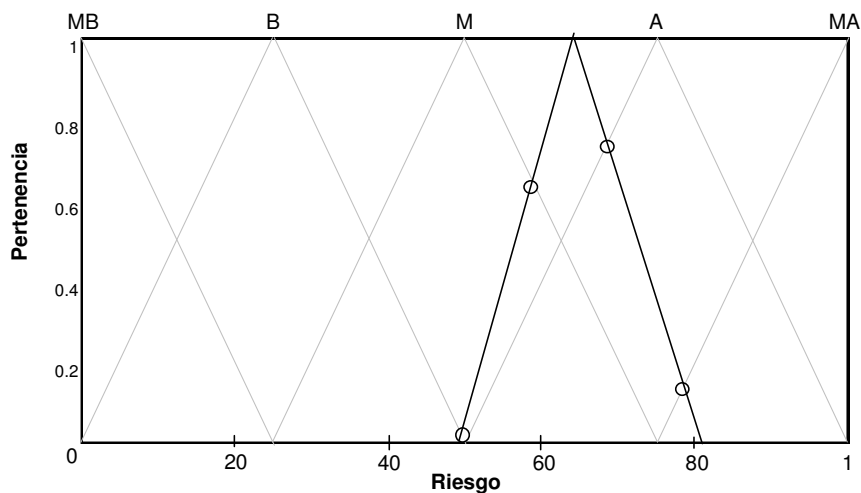


Figura 6. 21 Estimación de cinco-tuplas de riesgo del conjunto difuso

Una vez que se determina el  $TFN_{ri}$ , se realiza la conversión al riesgo difuso X normalizado de las cinco-tuplas del conjunto difuso. Siguiendo el procedimiento como se describió en el apartado de difuminación del riesgo, obteniendo el resultado del riesgo difuso X [0, 0, 0.42, 0.48, 0.10], donde tomamos la probabilidad más alta (muy



alta en la escala del nivel de riesgo), que en este caso es del 0.16 (ver tabla 6.17), dicho valor se aplica para determinar el coste de la consecuencia de fallo.

$x = TFN_{ii} = [ 0.49, 0.64, 0.81 ]$															
$p$	MB			B			M			A			MA		
$TFN_L$	0	0	0.25	0	0.25	0.5	0.25	0.5	0.75	0.5	0.75	1	0.75	1	1
Inferencia	0			0			0.65			0.75			0.16		
$X_L = [ 0, 0, 0.65, 0.75, 0.16 ]$	cardinalidad, $C = 1.56$														
$X = [ 0, 0, 0.42, 0.48, 0.10 ]$															

Tabla 6. 18 Estructura de la obtención del riesgo difuso

Para la determinación del coste de la consecuencia de fallo, para cada una de las tuberías, se concentra en la tabla 6.18, el grupo de tuberías con cada uno de los costes de las consecuencias de fallos definidos previamente, en donde se asigna el porcentaje de la probabilidad de la consecuencia de fallo, obtenida en el riesgo difuso X, en la escala cualitativa mas alta; por ejemplo, ya se menciona en la tabla 6.18, donde se selecciona la probabilidad de 0.16, que es el valor de dicha probabilidad. Lo mismo sucede con el resto de los demás grupos de tuberías, donde se consideran solo los valores de las probabilidades de la escala cualitativa, del nivel de riesgo muy alto, que son las que se muestran en la tabla 6.19.

ID	Agencia de autos \$500,000.00	Edificios proximidad \$800,000.00	Vialidades importantes \$420,000.00	Coste consecuencia de fallo
AC (A1)	0	0	0	\$0.00
AC (A2)	0	0.27	0	\$216,000.00
FoFo (C1)	0	0	0	\$0.00
Fo Ga (C1)	0	0	0	\$0.00
Fo Ga (C2)	0.33	0.33	0	\$429,000.00
PVC30	0.1	0	0.1	\$92,000.00
PVC20	0	0	0	\$0.00
Polietileno	0	0	0.1	\$42,000.00

Tabla 6. 19 Resultados del cálculo del coste de la consecuencia de fallo

De los resultados obtenidos, podemos resaltar que el grupo de tuberías con un mayor coste de la consecuencia de fallo, son las tuberías de acero galvanizado FoGa C2, donde se localiza una agencia de autos y existen edificios muy próximos a las tuberías de diámetros considerables, aunado a la probabilidad alta, en relación con los demás valores del resto del grupo de tuberías: Otro dato importante: en cuatro grupos no existen ninguno de los factores considerados como un gran riesgo en las tuberías según el criterio establecido.

---

Es necesario señalar que la determinación del coste asociado a las consecuencias de los fallos se complica, debido a la consideración subjetiva, como ocurre en la mayoría de los trabajos que se han encontrado en la literatura, en los que es por demás complicado, determinar el coste del fallo con exactitud o de una manera analítica. Considero que se requerirá a lo largo del tiempo, poder contar con una base de datos adecuada, en cuanto a calidad y cantidad de datos, que cuente con los respectivos análisis de los costes de las consecuencias de fallo.

A este respecto podemos citar el trabajo realizado por Ladislav Tuhovcak *et al.* (2007), que utiliza una escala de frecuencias de categorías, pero también al momento de determinar el coste de fallo se realiza de manera subjetiva. Respecto al caso de la ciudad de Celaya el coste de fallo se realizó en base a antecedentes, pero debemos recalcar que son mínimamente escasos, y en ningún momento llegan a ser representativos, pero es el único indicador disponible. Por tal motivo, realizamos el siguiente comentario de los trabajos analizados más relevantes, como es el programa europeo CARE-W.

### 4.3.3 Comentario

Dentro del módulo del programa europeo CARE-W descrito en capítulos anteriores, se cuenta con un módulo para el cálculo del riesgo, en el que se realiza una aproximación, basada en el cálculo del riesgo para diferentes acciones y escenarios. Riesgo, en este caso, se refiere a la incertidumbre del evento, con consecuencias no deseadas; los acontecimientos considerados son los fallos en las tuberías; específicamente fallos de tuberías en el rango de baja a mediana consecuencia de fallo. El riesgo se utiliza para analizar los diversos escenarios identificados, y sus correspondientes acciones.

La medida adecuada del riesgo, se calcula como la expectativa estadística de los futuros costes, causados por el fallo de la siguiente manera:

$$R = E(C) \tag{6.28}$$

Donde R es el riesgo, C es una variable estocástica, que se refiere a la incertidumbre del coste futuro de fallo, E se refiere al valor de la expectativa estadística de esta variable estocástica. Cuando esto es solo un posible fallo y el coste de fallo, C es conocido el riesgo y R es calculado por:

$$R = p_f * C \tag{6.29}$$

Donde  $p_f$  es la probabilidad de fallo y C es el coste de fallo.

### 4.3.4 Función Objetivo

Nuestra función objetivo, como ya se mencionó, busca maximizar los beneficios que se obtienen al rehabilitar las tuberías respecto a los costes; es decir, en base a los costes y los beneficios de cada sector, se va a determinar la cantidad de metros lineales a rehabilitar que maximicen los beneficios, con las restricciones de la disponibilidad del presupuesto de 3,5 millones de pesos. Otra restricción es que la cantidad de metros lineales, debe ser mayor que 500 m. y menor que 5000 m., esto debido a que en la práctica, los precios en la instalación pueden variar en base al monto de la obra. Por tal

motivo, el precio unitario de instalación es diferente en rehabilitar 20 metros que 500 metros, en lo que se refiere en México y considero que debe ser similar el comportamiento en el resto de los países.

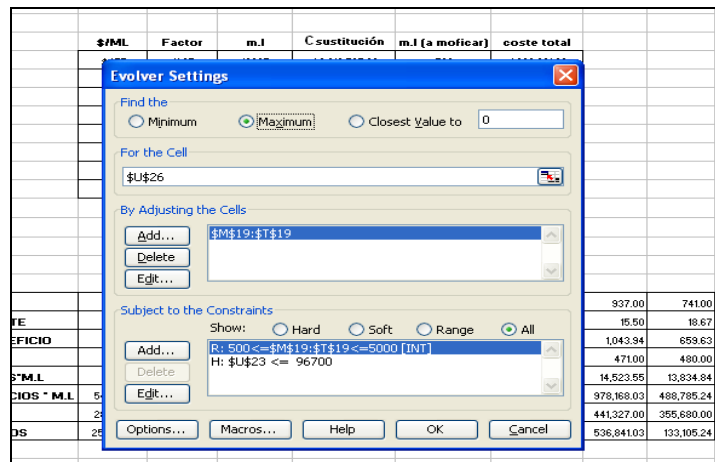


Figura 6. 22 Planteamiento de la función objetivo y las restricciones

Dentro de Evolver, se plantea el problema tal y como se muestra en la figura 6.22. La función objetivo y las restricciones, donde la función objetivo se localiza en la celda U25 de la figura 6.23, las restricciones se localizan en la celda U22, las cuales se plantean en Evolver como una restricción dura, en la tabla del concentrado, es el producto de la longitud de tubería por el factor de coste, de esta manera planteamos la restricción del monto presupuestal. Otra restricción que se introduce a Evolver, es el rango de la longitud de tubería a determinar. Como se detallo en párrafos anteriores, debe ser mayor o igual a 500 m. y menor o igual a 5000 m. Por los motivos ya comentados.

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											

		\$/ML	Factor	M.L	C sustitución	M.L (a mofica)	Coste total
		\$477	11.65	12605	\$6,012,585.00	593	\$282,861.00
		\$537	16.02	7243	\$3,889,491.00	1250	\$671,250.00
		\$594	13.28	11613	\$6,898,122.00	723	\$429,462.00
		\$550	10.65	8600	\$4,730,000.00	1198	\$658,900.00
		\$480	10.01	7540	\$3,619,200.00	599	\$287,520.00
		\$491	17.37	25201	\$12,373,691.00	750	\$368,250.00
		\$471	15.50	11548	\$5,438,108.00	937	\$441,327.00
		\$480	18.67	13865	\$6,655,200.00	741	\$355,680.00
					\$49,617,397.00		\$3,495,250.00
					3,500,000.00		

	M.I x SECTOR	593.00	1,250.00	723.00	1,198.00	599.00	750.00	937.00	741.00
	FACTOR DE COSTE	11.65	16.02	13.28	10.65	10.01	17.37	15.50	18.67
	FACTOS DE BENEFICIO	990.96	1,175.24	1,068.91	1,055.64	1,123.32	1,283.24	1,059.93	669.92
	COSTE/M.L	477.00	537.00	594.00	550.00	480.00	491.00	471.00	480.00
	FACTOR COSTES*M.L	6,910.85	20,027.15	9,602.71	12,764.68	5,997.37	13,031.25	14,523.55	13,834.84
	FACTOR BENEFICIOS * M.L	587,640.23	1,469,047.87	772,819.79	1,264,657.44	672,871.65	962,430.98	993,158.53	496,410.13
	TOTAL COSTES	282,861.00	671,250.00	429,462.00	658,900.00	287,520.00	368,250.00	441,327.00	355,680.00
	TOTAL BENEFICIOS	304,779.23	797,797.87	343,357.79	605,757.44	385,351.65	594,180.98	551,831.53	140,730.13

Figura 6. 23 Modelo de optimización

Los costes son determinados a partir del coste de rehabilitación unitario de cada grupo de tubería, por el factor de coste obtenido de la longitud total entre la valoración global obtenida, en la suma de los factores de influencia. De tal manera que el resultado del coste total, para rehabilitar la longitud total de los ocho grupos de tuberías, es de aproximadamente 50 millones de pesos mexicanos (3,3 millones de euros). Como ya se menciono, el objetivo es obtener la longitud óptima de cada sector, para maximizar los beneficios. Respetando la restricción presupuestal de los 3,5 millones de pesos mexicanos, como se muestra en la figura 6.23.

Respecto a los beneficios, como se ya se había detallado en párrafos anteriores, los procedimientos para la obtención de los mismos, son tres los beneficios que se obtienen al rehabilitar las tuberías, a saber, el beneficio del ahorro de energía cuyo monto es determinado por EPANET, como se detalla en el apartado 4.3 de este mismo capítulo. El siguiente beneficio es el ahorro o recuperación del caudal fugado, que nuevamente es determinado por EPANET, y del cual también se detallo el procedimiento para su obtención (ver apartado 4.3.1), multiplicando por el precio de producción del metro cúbico de agua. Por ultimo, el riesgo de la consecuencia de fallo, el cual es calculado en el apartado 4.3.2 y los resultados se presentan en la tabla 6.20.

### BENEFICIOS

ID Línea	AHORRO energía \$/día	AHORRO $Q_{fuga}$ m3/día	coste \$/m3	total	Riesgo	riesgo/m.l	
AC (A1)	356	349	1.96	683.80	\$0.00	0.00	1,039.80
AC (A2)	401	409	1.96	801.67	\$216,000	29.82	1,232.50
FoFo (C1)	383	377	1.96	738.67	\$0.00	0.00	1,121.67
Fo Ga (C1)	378	372	1.96	729.76	\$0.00	0.00	1,107.77
Fo Ga (C2)	401	366	1.96	716.61	\$429,000	56.90	1,174.51
PVC30	477	461	1.75	807.20	\$92,000	3.65	1,287.85
PVC20	404	400	1.63	651.93	\$0.00	0.00	1,055.93
Polietileno	245	257	1.63	419.31	\$42,000	3.03	667.35

Tabla 6. 20 Resultado y calculo de los beneficio al rehabilitar las tuberías

#### 4.3.5 Método “recipe” (receta) y obtención de resultados

El método de solución del Evolver es el método de solución “recipe” (receta), el método “recipe” funciona, cuando las variables a ajustar son independientes unas de otras, el procedimiento es similar a pensar que cada variable es la cantidad de ingrediente de una tarta, Evolver genera números para estas variables, con el objetivo de encontrar la mejor mezcla.

En nuestro caso, el planteamiento consiste en indicar a Evolver que modifique las celdas que contienen la longitud total de cada sector, para encontrar la longitud que optimice la función objetivo, en base a los costes de cada sector y a los beneficios descritos anteriormente, lo que se muestra esquemáticamente en la figura 6.23.

M.I x SECTOR	593.00	1,250.00	723.00	1,198.00	599.00	750.00	937.00	741.00	
FACTOR DE COSTE	11.65	16.02	13.28	10.65	10.01	17.37	15.50	18.67	
FACTOS DE BENEFICIO	990.96	1,175.24	1,068.91	1,055.64	1,123.32	1,283.24	1,059.93	669.92	
COSTE/M.L	477.00	537.00	594.00	550.00	480.00	491.00	471.00	480.00	
FACTOR COSTES*M.L	6,910.85	20,027.15	9,602.71	12,764.68	5,997.37	13,031.25	14,523.55	13,834.84	<b>96,692.40</b>
FACTOR BENEFICIOS * M.L	587,640.23	1,469,047.87	772,819.79	1,264,657.44	672,871.65	962,430.98	993,158.53	496,410.13	7,219,036.62
TOTAL COSTES	282,861.00	671,250.00	429,462.00	658,900.00	287,520.00	368,250.00	441,327.00	355,680.00	3,495,250.00
TOTAL BENEFICIOS	304,779.23	797,797.87	343,357.79	605,757.44	385,351.65	594,180.98	551,831.53	140,730.13	<b>3,723,786.62</b>

*Tabla 6. 21 Concentrado de los factores, costes y beneficios totales para la optimización.*

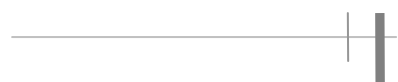
En la tabla 6.21, se muestra el planteamiento de los elementos del problema, en donde la celda con el borde de color rojo, es la celda con la cual se controlan las restricciones, y con la cual se ajustara la cantidad de metros lineales y a su vez, el monto presupuestal. La celda con bordes de color azul, es la suma de los beneficios, de tal forma que al momento que Evolver esta realizando los cálculos de la longitud de metros lineales. En la figura 6.23, vamos observando como se aproxima al momento de la restricción, que como ya mencionamos es de 3,5 millones de pesos mexicanos, por lo tanto es conveniente observar los valores, para asignar un valor inicial razonable a la restricción dentro de Evolver.

Una vez que se ejecuta el modelo, se obtienen los resultados de la longitud óptima, para cada grupo de tubería con la que se maximizan los beneficios, los resultados se presentan en la tabla 6.22.

ID Línea	m.l	Coste total
AC (A1)	593.00	\$282,861.00
AC (A2)	1,250.00	\$671,250.00
FoFo (C1)	723.00	\$429,462.00
Fo Ga (C1)	1,198.00	\$658,900.00
Fo Ga (C2)	599.00	\$287,520.00
PVC30	750.00	\$368,250.00
PVC20	937.00	\$441,327.00
Polietileno	741.00	\$355,680.00

**\$3,495,250.00**

*Tabla 6. 22 Resultados de la longitud óptima para cada grupo de tubería*

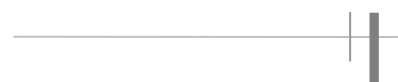


# Capítulo 7

---

## **Modelo de Evaluación de las condiciones físicas de las tuberías**







---

---

## 1 Análisis de supervivencia

El análisis de supervivencia es apropiado para ciertas categorías de datos, donde interviene el fallo o un acontecimiento específico dependiente del tiempo. El análisis de supervivencia ha sido usado en diversas áreas como en el campo de la medicina, donde se ha utilizado para el estudio de la supervivencia de las personas, en la industria, para el estudio de la fiabilidad de los componentes, así como en otras áreas entre ellas, las ciencias sociales, economía, etcétera.

En el campo de la planeación de la rehabilitación en los sistemas de distribución, los análisis de supervivencia fueron introducidos por Andreou (1987b), y seguidamente comenzó el interés por varios centros de investigación Europeos, que participaron en el proyecto CARE\_W (Eisenbeis, 1994; Malandain, 1999; Rostum, 2000). Actualmente el proyecto está en el proceso de prueba, pero definitivamente los avances realizados son una contribución muy importante en este tema.

Con los análisis de supervivencia es posible realizar:

- ⇒ Identificación de los factores de riesgo significativos, su importancia relativa de una manera sistemática y matemática, donde se capturan todas las variables a la vez, incluso cuando el número de variables es muy grande.
- ⇒ Calcular la probabilidad de fallo en un tiempo específico. Esta información puede ser usada en la valoración del coste del ciclo de vida.
- ⇒ Capturar e incorporar la información contenida en los datos censurados. Este es particularmente crítico para el tipo de población estadística que es tratada en el campo de los sistemas de distribución, en el caso de que varias tuberías no llegan a sufrir una rotura.

### 1.1 Conceptos básicos del análisis de supervivencia

#### 1.1.1 Tiempo de fallos y de interfallos

Una descripción gráfica de la historia de fallos de un sistema de reparación, iniciando en el tiempo  $t = 0$ , es mostrado en la figura 7.1. Las marcas señaladas con un círculo corresponden al tiempo de fallos ( $T_i$ ) para el sistema.  $T_i$  es el tiempo desde 0 hasta el tiempo del  $i$ -ésimo fallo. El tiempo de interfallo es el tiempo entre cada fallo. Los tiempos de interfallos son denotados por  $X_1, X_2, \dots$ , y dado por  $X_i = T_i - T_{i-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots$

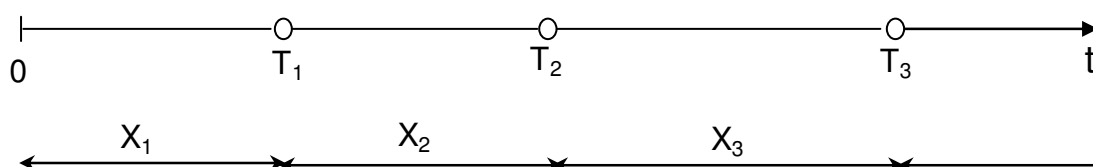


Figura 7. 1 Tiempo de fallo  $T_i$  y tiempo de interfallo  $X_i$  de un sistema reparable

Los diferentes enfoques utilizan diferentes notaciones y terminología. Los tiempos de fallos ( $T_i$ ) se utilizan como entrada para los procesos de Poisson no homogéneo (NHPP) por sus siglas en inglés, y los tiempos de interfallos ( $X_i$ ) se utilizan con los modelos de riesgo proporcional (PHM). Independientemente de la notación que se utiliza, la secuencia de los tiempos de fallo y la secuencia de los tiempos de interfallos, contienen la misma información sobre el historial de fallos.

Para el análisis estadístico, asumimos que la red de distribución de agua es reparada inmediatamente después de experimentar un fallo. Esto implica que el tiempo de reparación a veces es insignificante, en comparación con el fallo y con el tiempo de interfallo, una suposición razonable para las redes de abastecimiento de agua.

### 1.1.2 Disponibilidad de datos incompletos de fallos

Un problema frecuente, cuando se está analizando los datos del tiempo de fallos en las redes de abastecimiento de agua, es que no conocemos el historial de fallos completo. Los modelos estadísticos que elijamos, debe ser capaz de manejar datos incompletos de los datos de fallo.

La figura 7.2 muestra un ejemplo típico de los datos de fallo, disponible para las redes de distribución de agua. Los eventos de fallos se señalan en el eje del tiempo. Así como el período donde los datos de los fallos se encuentran disponibles.

Los datos de los fallos sobre el lado izquierdo del período de tiempo no se conocen. Los fallos tal vez se hayan producido en este período, pero no se tienen registrados, llamamos a esto censura-izquierda de los datos de fallo. La parte derecha de la ventana de tiempo corresponde a un límite superior de tiempo, para el cual los datos de fallo se encuentran disponibles. Los datos de fallo serán registrados en el futuro, pero estos datos no se incluyen en el análisis. Esto significa que los datos también son censura-derecha.

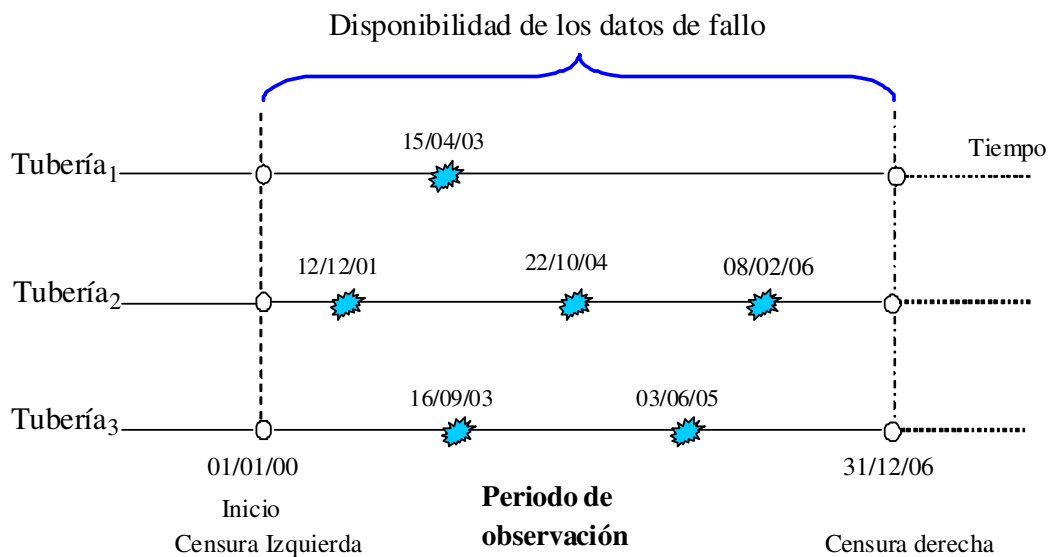


Figura 7. 2 Datos de fallos disponibles típicos de un sistema de distribución.

---

---

Un conjunto de datos también podrá contener algunos datos erróneos, los cuales pueden ser debido a dificultades al ser tomados en campo, errores de mecanografía, etcétera. Antes que los datos puedan ser analizados, los datos erróneos deben ser detectados y luego descartados o corregidos, de lo contrario los resultados pueden ser distorsionados con la presencia de datos erróneos.

La falta de datos de fallos en el tiempo para algunos días no causará grandes problemas, como sucedería por ejemplo, la falta de datos de la precipitación y la escorrentía en la elaboración de modelos urbanos de drenaje. Si se cree que los datos que faltan son un problema y la extensión de los datos que faltan se conoce, esto puede ser manejado mediante la introducción del intervalo de censura (SYSTAT, 1997).

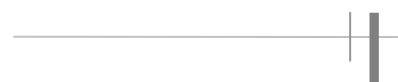
## 1.2 Métodos de análisis de supervivencia

El análisis de los datos de supervivencia es un tema de estadística tradicional. Sin embargo, en 1972, el Dr Cox presentó el modelo de riesgo proporcional (PHM), con el fin de estimar los efectos de las diferentes covariables en el tiempo para el fallo de un sistema. El modelo ha sido utilizado ampliamente en las estadísticas médicas, donde se ha aplicado con éxito en los análisis de los datos sobre factores como: la esperanza de vida y la duración de los períodos de la libertad de historiales individuales, desde los síntomas de una enfermedad en relación al tratamiento aplicado. Kaara (1984) y Andreou (1986) introdujeron el uso del modelo de riesgos proporcionales, para el análisis de fallos en redes de distribución de agua.

En el análisis de supervivencia, el interés se centra en un grupo o grupos de individuos para cada uno de los cuales, es definido un punto de evento (por ejemplo, fallo o muerte), que ocurre después de un periodo de tiempo. En el análisis de supervivencia, los fallos pueden ocurrir más de una vez para cualquier individuo. El tiempo de supervivencia de una tubería, es el tiempo desde el año de instalación hasta el tiempo del fallo. Las tuberías en la red tienen diferentes años de instalación, en términos estadísticos esto se llama escalonamiento de entrada.

El tiempo de vida denotado por  $X$ , denota el tiempo transcurrido entre la instalación y el momento en que una tubería no funciona correctamente, o sucede un evento, en este caso el fallo. El concepto de tiempo de vida, sólo se aplica para los componentes que se descartan después del primer fallo (Cox, 1972; Kalbfleisch y Prentice, 1980). Sin embargo en orden de los sistemas de reparación con los modelos de supervivencia, el tiempo entre fallos es también denominado como una vida (tiempo de vida), a continuación se describen con más detalle, el concepto de análisis de supervivencia y las diferentes medidas.

El análisis de supervivencia es un método estadístico para la selección en los procesos de renovación, la variable de interés es el tiempo de fallo  $X$ .  $T$  es el tiempo entre la instalación y el fallo del evento que esta siendo considerado, y  $t$  expresa el tiempo.



---

---

### 1.2.1 Función de supervivencia

La función de supervivencia, se define como la probabilidad de que una persona sobreviva (no le ocurra el evento de interés) al menos hasta el tiempo  $x$ . Una definición más formal puede darse de la siguiente manera: sea  $T$  una variable aleatoria positiva (o no negativa), con función de distribución  $F(x)$  y función de densidad de probabilidad  $f(t)$ . La función de supervivencia  $S(x)$  es: La cantidad básica empleada para describir el fenómeno tiempo-evento es la función de supervivencia (es decir, componente de fiabilidad).

$$S(x) = \Pr(X > x) \quad (7.1)$$

La función de supervivencia es una función no-decreciente, con un valor de uno en el origen y cero en el infinito.

### 1.2.2 La función de distribución acumulativa

Cuando  $X$  es una variable aleatoria continua, la función de supervivencia es el complemento de la función de distribución acumulativa, es decir.

$$S(x) = 1 - F(x), \quad (7.2)$$

$$\text{Donde } F(x) = \Pr(X \leq x) \quad (7.3)$$

$F(x)$  expresa la probabilidad que un individuo falle en el tiempo  $x$

La función de la densidad de probabilidad  $f(x)$  es definida por.

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dt} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x \leq X < x + \Delta x]}{\Delta x} \quad (7.4)$$

$f(x)$  no es una probabilidad pero es un índice.

$$f(x) = \int_0^x f(u) du \quad (7.5)$$

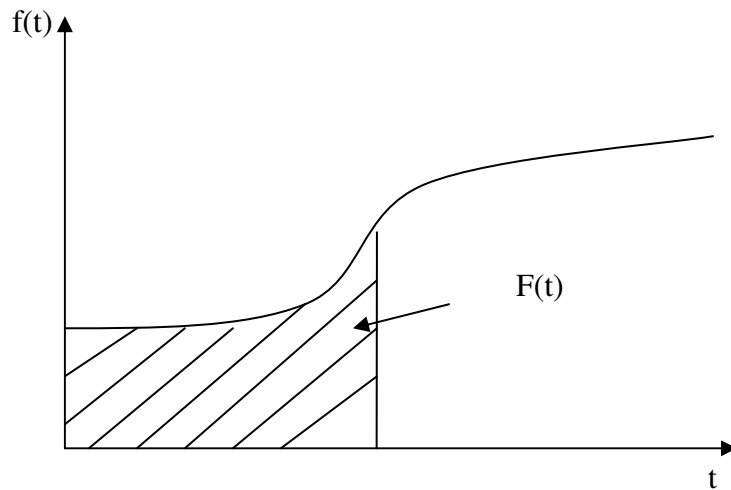


Figura 7. 3 Grafica de la función de la densidad de probabilidad

### 1.2.3 Función de riesgo (hazard function)

Otro elemento fundamental en el análisis de supervivencia es la función de riesgo. Esta función se conoce como la tasa de fallo condicional en la teoría de la fiabilidad, la fuerza de la mortalidad (FOM) en demografía, o simplemente la tasa de riesgo. La función de riesgo se define por la siguiente expresión:

$$h(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x \leq X < x + \Delta x | X \geq x]}{\Delta x} \quad (7.6)$$

El termino  $h(x)\Delta x$  puede ser el mejor interprete como la probabilidad que el primer fallo ocurre en  $(x, x+\Delta x)$ .

Si  $X$  es una variable aleatoria continua, la función de razón de riesgos o tasa instantánea de fallos  $h(x)$ , se define como el cociente entre la función de densidad y la función de supervivencia:

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = -\delta \ln[S(x)] \quad (7.7)$$

Se interpreta como la probabilidad de que a un individuo le ocurra el evento de interés, en la siguiente unidad de tiempo  $\Delta x$  dado que ha sobrevivido hasta el tiempo  $x$ .

Donde  $f(x)$  es la función de densidad. En relación con la cantidad, es la función de riesgo acumulativa  $H(x)$ , definida por.

$$H(x) = H(x) = \int_0^x h(u) du = -\ln[S(x)] \quad (7.8)$$

Así, para tiempos de vida continua.

$$S(x) = \exp[-H(x)] = \exp\left[-\int_0^x h(u)du\right] \quad (7.9)$$

La distribución de los fallos en el tiempo de las tuberías de una red de distribución de agua, podrá ser calculada a través de la función de supervivencia  $S(x)$ , o la función de riesgo  $h(x)$ .

La función de riesgo puede ser constante, creciente, decreciente o en forma de bañera. Cuando la función de riesgo es constante,  $S(x)$  reduce a la función de supervivencia a una distribución exponencial. Para muchos tipos de componentes, la función de riesgo aumenta con el tiempo, como resultado de un componente de envejecimiento. La figura 7.4 ilustra una curva de forma de bañera de la función de riesgo. Cabe notar que existen dos diferentes curvas de bañera.

Uno de los sistemas de reparación (es decir, ROCOF) y uno para los sistemas no reparables (es decir, FOM). Los sistemas no reparables incluyen aquellos en los que los objetos sólo tienen una vida, o para los sistemas que después de la reparación es devuelto a un nuevo estado "bueno". Para la FOM la curva del tiempo es considerado desde la última reparación. Estas dos curvas no se deben mezclar juntas (Rostum, 2000).

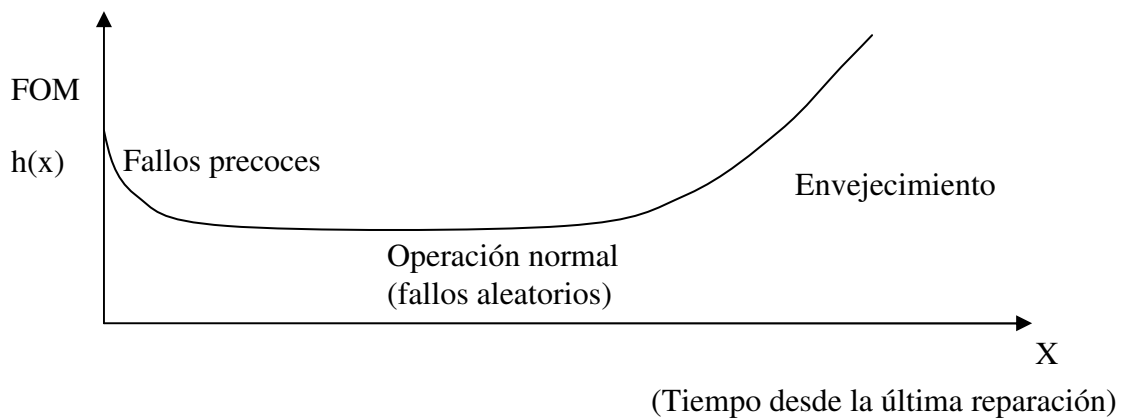


Figura 7. 4 Forma de bañera de la función de riesgo o FOM.

En el análisis tradicional de tiempo de vida, sólo es considerado el primer fallo. Esencialmente los datos se dicen "censurados", cuando hay individuos en la muestra, donde se encuentra disponible en el tiempo de vida sólo un límite superior o inferior (Cox, 1972; Kalbfleisch y Prentice, 1980). Asumimos que  $n$  tuberías idénticas son instaladas en diferentes puntos dados en el tiempo (es decir, escalonamiento de la entrada), y seguido hasta el primer fallo o hasta el momento en que el período de estudio termina (figura 7.5). Los tiempos de vida  $X_1$  y  $X_4$  son tiempo de vidas censurados hacia la derecha.

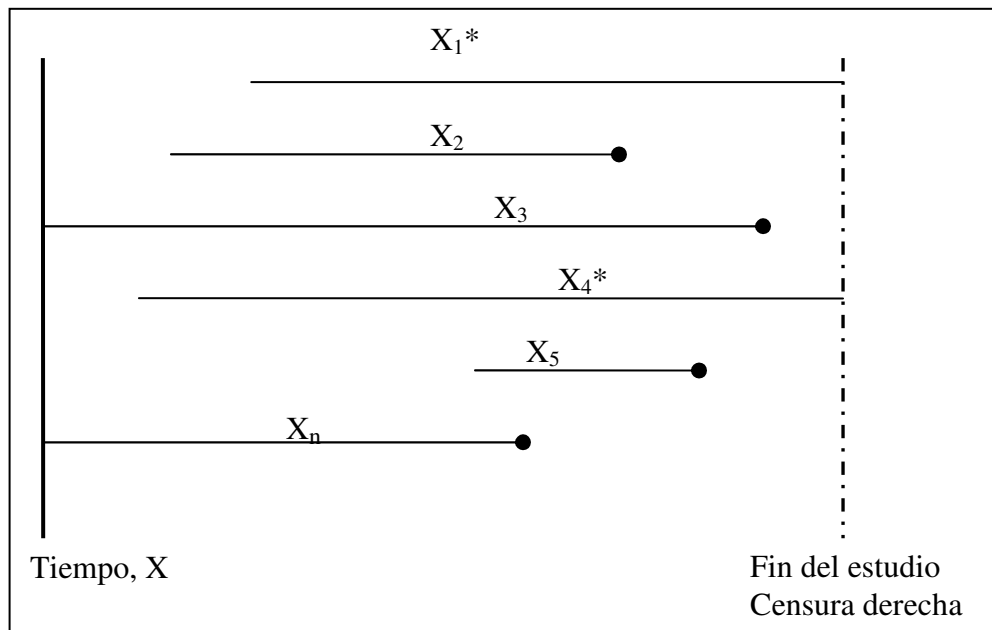


Figura 7. 5 Datos censurados (derecha) con entradas escalonadas

Para redes de distribución de agua, los siguientes tipos de censura son relevantes:

- Censura Izquierda
- Censura Derecha

Para la censura de la izquierda, nos referimos a la censura que hay en un período de tiempo cuando no hay datos registrados después de la fecha de instalación. Cuando un caso es censurado a la derecha, la variable dependiente es conocida por ser superior a un valor específico, pero su verdadero valor no es conocido (es decir, la tubería no tiene fallos para el tiempo de registro de mantenimiento terminados). Se logra una mayor precisión, mediante la inclusión de los casos en que el evento no ha ocurrido todavía (datos censurados a la derecha). Si el evento se ha producido el valor de censura  $C$  es igual a 1, sino  $C = 0$  (censura a la derecha).

### 1.3 Modelos de riesgos proporcionales de Cox

El modelo más utilizado para el análisis de supervivencia es el modelo de Cox. Este modelo es semi-paramétrico, ya que su función de riesgo es el producto de una línea base sin especificar la función de riesgo, relacionando una función paramétrica, la función de riesgo y las covariables. Permitiendo a  $h(x | z)$  ser la función de riesgo en el tiempo  $x$ , para una tubería con vector de covarianza  $z$ . Su amplia utilidad, es debida también porque utiliza la edad y los factores de riesgo, como suele suceder en muchos casos. El modelo básico de acuerdo con (Cox, 1972) es el siguiente:

$$h(x | z) = h_0(x)c(z' \beta) \quad (7.10)$$

Donde  $h_0(x)$  es la función de riesgo base.  $\beta = (\beta_1, \beta_2 \dots \beta_p)$  es un parámetro del vector,  $z'$  es un vector columna de covariables o variables independientes ( $z = [Z_1, Z_2,$

$Z_3, Z_p \dots]$  y  $c(z'\beta)$  es una función conocida. La función de riesgo base representa la función de riesgo que un sistema podrá experimentar, si los efectos de todas las covariables en el modelo son iguales a cero. Dependiendo de cómo una covariable se define en el modelo, esto puede corresponder o bien a un cero natural o un valor de cero asignado arbitrariamente. Esto se denomina modelo semi-paramétrico, porque es asumida una forma paramétrica solo para los efectos de las covariables.

Un modelo común para  $c(z'\beta)$  es:

$$c(z'\beta) = \exp(z'\beta) = \exp\left(\sum_{i=1}^p \beta_i z_i\right) \quad (7.11)$$

Resultando

$$h(x|z) = h_0(x) \exp(z'\beta) = h_0(x) \exp\left(\sum_{i=1}^p \beta_i z_i\right) \quad (7.12)$$

Los modelos de Cox son frecuentemente llamados modelos de riesgos proporcionales (PHM), porque si observamos dos tuberías con covariables de valores  $z$  y  $z^*$  la tasa de la función de riesgo es:

$$\frac{h(x|z)}{h(x|z^*)} = \frac{h_0(x) \exp(\beta_i z_i)}{h_0(x) \exp(\beta_i z_i^*)} = \frac{h_0(x) \exp\left(\sum_{i=1}^p \beta_i z_i\right)}{h_0(x) \exp\left(\sum_{i=1}^p \beta_i z_i^*\right)} = \exp\left(\sum_{i=1}^p \beta_i (z_i - z_i^*)\right) \quad (7.13)$$

La cual es una constante y las funciones de riesgo son proporcionales.

Los coeficientes de regresión se estiman para maximizar la probabilidad parcial que no incluye la función de riesgo base  $h_0(x)$ . La función de probabilidad es maximizada usando el método de Newton-Raphson para el cálculo numérico (SAS, 1994; SYSTAT, 1997).

El efecto del tiempo sobre el proceso de supervivencia, es capturado por la función de riesgo base  $h_0(x)$ . Esta función ha de ser estimada en orden de utilizar los PHM de Cox, para predecir los fallos y para evaluar el efecto del envejecimiento de la tubería. Dada la función de riesgo base, pueden ser estimados la función de supervivencia y la función de riesgo, para los componentes con cierto conjunto de condiciones (covariables).

Una de las principales ventajas de los modelos de Cox (PHM), es que uno no tiene por qué asumir una forma específica de la función de riesgo de base  $h_0(x)$ , con el fin de evaluar los efectos de las covariables.

Cuando el objetivo es evaluar el efecto de las covariables sobre la función de riesgo, se debe de utilizar el modelo de riesgo proporcional de Cox. Cuando el objetivo es predecir las fallas futuras dentro de un determinado horizonte de tiempo, una hipótesis paramétrica sobre la forma de la base de referencia de la función de riesgo, es más



conveniente (Kumar y Klefsjö, 1994). Un ejemplo de este tipo de PHM es el modelo de riesgo proporcional Weibull, donde la función base es una función de riesgo Weibull.

### 1.4 Modelos de distribución de Weibull

La distribución de Weibull es un modelo flexible para describir la falta de datos. Tiene una función de riesgo que o bien es monótona creciente, decreciente, o constante. Es el único modelo paramétrico de regresión, que tiene una representación proporcional de riesgos y una representación de los fallos acelerados del tiempo. La función de riesgo Weibull se expresa como.

$$h_0(x) = \lambda p (\lambda x)^{p-1} \tag{7.14}$$

Donde  $\lambda$  es la intercepción y  $p$  es el parámetro de escala (Kalbfleisch y Prentice, 1980).

En la figura 7.6, se muestra la función de riesgo para la distribución Weibull, para los casos donde  $\lambda=1$  y para valores diferentes de  $p$ . donde  $p=1$ , la distribución Weibull se reduce a una distribución exponencial, donde la función de riesgo es constante con el tiempo.

Función del índice de riesgo Weibull

$$h(t) = 0.1 * p(0.1t)^{(p-1)}$$

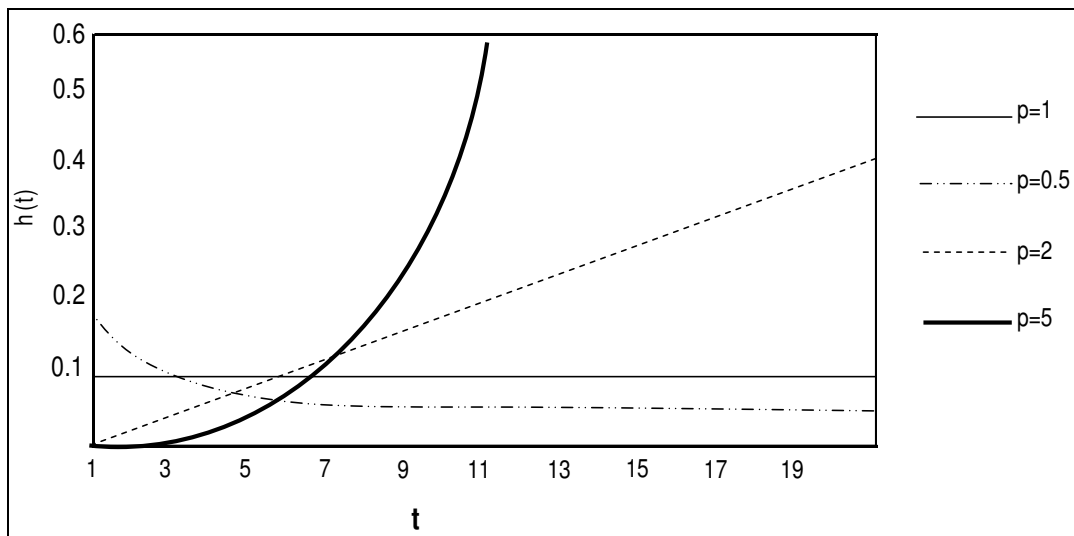


Figura 7. 6 Función de riesgo de la distribución Weibull  $\lambda=0.1$  y  $p$  variable

La clásica y bien conocida curva de “bañera” (figura 7.4), es utilizada para representar varios patrones de fallo en sistemas industriales y es modelada de una manera adecuada, siguiendo una función de riesgo Weibull del índice de fallos. Las tres regiones son:

- ⇒ La región I, toma en consideración cualquier tipo de defectos de instalación ó construcción (el índice de mortalidad infantil en la estadística de vida): el índice

de fallo decrece con el tiempo mientras estos defectos son corregidos. Una función Weibull con un  $p < 1$  modela esta región.

⇒ La región II, es caracterizada por el cambio de fallos en el sistema: aparece un estado permanente de fallos. Una función Weibull con un  $p$  valor de 1 (la distribución exponencial) modela esta región.

⇒ La región III, región representa el desgaste del sistema. El envejecimiento en el sistema produce un incremento en el número de fallos.

Como puede verse en la formula de la función de riesgo. El modelo Weibull es apropiado para el fenómeno, para el cual los factores de riesgo son irrelevantes (o han sido estadísticamente neutralizados, através de la segmentación apropiada), y el riesgo depende solo del tiempo  $t$ .

Donde  $p=0.10$  y la distribución Weibull llega a ser una distribución exponencial. Las expresiones de las funciones básicas son:

$$h(x) = \lambda \tag{7.15}$$

$$H(x) = \lambda x \tag{7.16}$$

$$S(x) = e^{-\lambda x} \tag{7.17}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{7.18}$$

Los modelos Weibull con una representación de riesgo proporcional, tienen la siguiente función de riesgo.

$$h_0(x, \beta, z) = \lambda p (\lambda x)^{p-1} \exp(z' \beta) \tag{7.19}$$

Donde  $z'$  es un vector columna de covariables o variables independientes ( $z=[z_1, z_2, z_3, \dots, z_p]$ , y  $\beta$  es un vector de parámetros de regresión desconocidos ( $\beta=[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p]$ ).

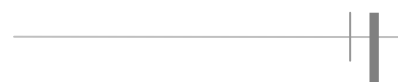
Los modelos de vida acelerados asumen que  $\ln X$  (logaritmo natural), esta relacionado con las covariables  $z'$  através de un modelo lineal.

$$\ln X = \alpha + z' \beta^* + \sigma W \tag{7.20}$$

Donde  $\alpha = -\ln \lambda$  (parámetro de intercepción),  $\sigma = 1/p$  (parámetro de escala),  $\beta^* = -\sigma \beta$  y  $W$  tiene la distribución del valor extremo (Kalbfleisch y Prentice, 1980).

Escribiendo.

$$w(x) = (\ln x - \alpha - z' \beta^*) / \sigma \tag{7.21}$$



Usando la distribución del valor extremo con la función de supervivencia (Klein y Moeschberger, 1997).

$$S(w) = \exp[-\exp(w)] \quad (7.22)$$

Insertando para  $w(x)$ , dada la función de supervivencia para el modelo acelerado Weibull, para cada tubería individual como una función del tiempo.

$$S(x, \beta^*, z) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\ln x - \alpha - z' \beta^*}{\sigma}\right)\right] = \exp\left[-x^{1/\sigma} \exp\left(\frac{-\alpha - z' \beta^*}{\sigma}\right)\right] \quad (7.23)$$

Los modelos de vida acelerado son modelos log-lineales, es decir, las variables explicativas actúan aditivamente en  $\ln X$  (o multiplicativamente en  $X$ ). Se asume que las covariables aceleran el tiempo de fallos.

El método para calcular el vector  $\beta^*$  y los parámetros  $\alpha$  y  $\sigma$ , utiliza la función de maximización log-probabilística, la cual es la transformación-log del conjunto de densidad de la probabilidad de las observaciones. Los datos de censura derecha contribuyen a esta función, por el valor de su función de supervivencia en el tiempo censurado. El análisis se realizara con la ayuda del lenguaje R y del software estadístico Splus.

### 1.5 Modelo de riesgo proporcional estratificado

Los valores discretos de una covariable, pueden ser utilizados para agrupar un conjunto de datos. El número de grupos que pueden formarse, se define como el número de estratos de un conjunto de datos. Si un estrato específico del PHM es asumido, el modelo correspondiente es llamado PHM estratificado. En este modelo, se asume que las funciones de riesgos son proporcionales dentro del mismo estrato, pero no necesariamente a través de los estratos. La función de riesgo de un sistema en el estrato  $j$ ésimo puede expresarse como:

$$h_j(x | z) = h_{0j}(x) \exp(z' \beta) \quad (7.24)$$

El concepto de estratificación, es muy útil para la modelización de un sistema reparable con un PHM.

Podemos mencionar dentro de este grupo una extensión del modelo de Cox, el cual permite obtener la estimación del modelo, en presencia de una variable de estratificación, sobre la cual se desean obtener funciones de supervivencia por cada uno de los distintos grupos, y probablemente poder estudiar la existencia o no de las funciones de sobrevivencia entre los grupos.

El modelo de Cox estratificado, también constituye una de las maneras de corregir el modelo de Cox, cuando no se cumple el supuesto de riesgo proporcional para alguna de las covariables.

---

---

## 1.6 Proceso de Poisson no Homogéneo (NHPP)

Según Rostum (2000), el proceso de Poisson no homogéneo (NHPP), ha sido usado en orden de poner una mayor atención en el patrón de fallos sucesivos, un objetivo que no se cumple adecuadamente con los modelos anteriores, para los cuales se asume que la tubería ha sido reparada, en una condición nueva después de cada rotura. Con un modelo de riesgo proporcional cada individuo puede fallar una vez, un nuevo individuo estadístico es creado después de cada rotura, y ajustado por la introducción de una nueva variable, que toma en consideración el historial de los fallos anteriores.

Muchos autores (Walski, 1993), (May, 2000), (Andreou, 1986) y (Eisenbeis, 1994) han notado que los fallos siguen tendencias, y que estas tendencias varían dependiendo de la etapa en la cual la tubería se encuentre. En este método se considera que el NHPP, podrá explotar mejor la información contenida en esta tendencia. Los parámetros básicos de un modelo NHPP, es el índice de ocurrencia de fallos (ROCOF) también llamada función intensidad  $\lambda(t)$ .

Un proceso no homogéneo es opuesto a un proceso homogéneo, y en él, la intensidad varía con el tiempo (en un proceso homogéneo sería constante). Similarmente a  $h(x)dx$ , el termino  $\lambda(t)dt$  puede ser considerada como la probabilidad que ocurra un fallo entre el tiempo  $t$  y  $t + dt$ . La predicción de fallos, es alcanzada por la integración de la función intensidad con respecto al tiempo, es mucho más sencillo el entendimiento que con la múltiple integración, visto con el modelo de Weibull (WPHM).

Desde un punto de vista practico, un modelo de riesgo proporcional que se ajusta al ciclo del sistema de mantenimiento, sigue una de las dos estrategias después del fallo; un individuo es reparado a una condición “bueno como nuevo” o “peor que el viejo”(el individuo es removido). Lo cual no es siempre realista, como se observa en la práctica diaria en las empresas de agua. En un modelo NHPP después del fallo, un elemento es asumido a ser “malo como el antiguo”, lo cual significa que la reparación ha sido realizada, para restaurar el elemento a la condición previa al fallo, no mejor (como “bueno como nuevo”), no peor (“peor que el anterior”).

Sin embargo, cabe mencionar que cuando se aplico este método, los resultados obtenidos por la empresa de agua de Trondheim (Noruega), no se mejoraron cuando se usó la comparación de un modelo NHPP versus WPHM.

## 2 Conceptos generales de estadística

### 2.1 Índice de riesgo (HR)

Dos modelos de alternativas A y B, cada uno de ellos con una serie de resultados previstos  $E_A$  y  $E_B$  (con los que se calcula cada modelo). Los resultados observados  $O_A$  y  $O_B$  son comparados respectivamente y el índice de riesgo es como sigue:

$$\frac{O_A / E_A}{O_B / E_B} \tag{7.25}$$

---

Si en las dos alternativas no hay diferencia de rendimiento, el índice de riesgo es uno. En caso del modelo de riesgo proporcional de Cox, el índice de riesgo obtenido en la salida del software, da la proporción entre la función del índice de riesgo, calculado con una variable, tomando un valor específico y la misma función con la misma variable, tomando este tiempo el valor de referencia (todas las otras cosas son similares). Como podríamos esperar en un modelo de riesgo proporcional, la relación entre los riesgos se mantiene constante

El resultado de significancia estadística se obtiene utilizando varios test de significancia, que valoran y comparan diferentes modelos.  $H_0$ , frecuentemente llamada hipótesis nula, es la hipótesis para la cual no hay diferencia entre los dos grupos o modelos de prueba. Rechazar la hipótesis nula es equivalente a mostrar que los dos grupos (o modelos) dan una diferencia en sus respectivos resultados.

El p-valor nos da la probabilidad de la diferencia que puede ser observada entre los resultados de los dos grupos, incluso si la hipótesis nula es verdadera (si no hubiera en realidad ninguna diferencia, entre los dos grupos o modelos observados). Si  $H_0$  es verdadero, ello no significa que ambos grupos son equivalentes, pero la diferencia algunas veces no se puede ver, debido a la simplicidad del estudio. Hay una relación cercana entre un p-valor y un CI si el CI excluye el cero: por ejemplo, si el CI es 95 % entonces el p-valor correspondiente  $<0,05$  (1-0,95).

## 2.2 Contrastes de hipótesis para el modelo de Cox

Una vez que se ha ajustado un modelo de Cox, existen tres contrastes de hipótesis para verificar la significación del modelo, estos tests son asintóticamente equivalentes, pero no siempre sucede lo mismo en la práctica.

### 2.2.1 Test de razón de verosimilitud

El primero de los contrastes es el denominado test de razón de verosimilitud, y es el que presenta una mayor confiabilidad. Este test se define como:

$$2\left\{\log(L(\beta_0)) - \log(L(\hat{\beta}))\right\} \quad (7.26)$$

Donde  $\beta_0$  son los valores iniciales de los coeficientes y  $\hat{\beta}$  es la solución después de ajustar el modelo.

### 2.2.2 Test de Wald

Si un parámetro de regresión  $\beta$  toma el valor  $b$  con un error estándar  $SE(b)$ , la relevancia del resultado  $\beta=b$  puede ser comprobado con un test de Wald. Ello implica calcular el valor de:



$$W = \left[ \frac{b}{SE(b)} \right]^2 \quad (7.27)$$

El test de Wald es de hecho equivalente al cálculo de la z-estadística, con la z definida como:

$$Z = \frac{b}{SE(b)} \quad (7.28)$$

Donde z se refiere a la tabla de la distribución de la desviación estándar normal, para obtener un p-valor.

La mayoría de los paquetes de software se obtienen los coeficientes de regresión, su desviación estándar, el intervalo de confianza y el correspondiente p-valor del test de significancia.

### 2.2.3 Test de puntajes (score test)

Otro contraste es el conocido como test de los puntajes, definido como  $U'IU$ , donde U es el vector de derivadas del log (L(b)) dado por:

$$U(\beta) = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \left[ Z_i(t) - \bar{Z}(\beta, t) \right] dN_i(t) \quad (7.29)$$

I es la matriz de información dada por:

$$I(\beta) = \sum_{i=0}^n \int_0^{\infty} \frac{\sum_j Y_j(t) r_j(t) \left[ Z_i(t) - \bar{Z}(\beta, t) \right] \left[ Z_i(t) - \bar{Z}(\beta, t) \right]}{\sum_j Y_j(t) r_j(t)} dN_i(t) \quad (7.30)$$

$\bar{Z}(\beta, t)$  es la media de las covariables, para aquellos todavía en riesgo en el tiempo t, dada por:

$$\bar{Z}(\beta, t) = \frac{\sum_j Y_j(t) r_j(t) Z_i(t)}{\sum_j Y_i(t) r_i(t)} \quad (7.31)$$

## 3 La aplicación de los análisis de supervivencia en los sistemas de distribución y valoración de los resultados obtenidos

Los estudios que se han realizado a la fecha, con la aplicación del análisis de supervivencia (modelo de riesgo proporcional de Cox o Weibull), dichos estudios se han planteado con los siguientes objetivos:

- 
- Identificar la significancia de los factores de riesgo y su importancia relativa. Esta información puede ser usada para propósitos de prevención, lo cual puede ser obtenido con ambos métodos, como son el modelo de riesgo proporcional de Cox o de Weibull.
  - Calcular una probabilidad de fallo para un tiempo específico. Esta información puede ser usada en la valoración del coste del ciclo de vida. Esto solo puede ser obtenido con un modelo de riesgo proporcional de Weibull.
  - La priorización de las tareas de rehabilitación, donde se podrá priorizar el orden de las tuberías para la renovación, para dicho propósito se utiliza un modelo de riesgo proporcional de Weibull, para calcular el número de fallos esperados.

Los trabajos desarrollados hasta la actualidad son los siguientes:

### **3.1 Andreou (1986,1986<sup>a</sup>), Marks (1998).**

Stefanos A. Andreou fue parte del equipo del MIT conjuntamente con Kaara, Marks y Clark, fue el primero en introducir fuera del campo de la medicina el concepto de riesgo proporcional, utilizando un modelo de riesgo proporcional de Cox, con el objetivo de analizar los patrones de las roturas de las tuberías, en los sistemas de distribución de agua, y mas específicamente al modelo la función de riesgo  $h(t)$ , y la identificación de la importancia de los factores de riesgo en las roturas. Los modelos fueron probados en dos empresas de agua al noreste de estados unidos, llegaron hacer el tópicico de estudio por parte de la EPA (Marks *et al*, 1988).

Los estudios han sido llevados a cabo utilizando la información referente a las tuberías y las variables más relevantes, como son la presión interna, el historial de roturas, la edad de la tubería, el periodo de instalación, el uso de la tierra y la longitud de la tubería. Los datos son estratificados basados en el número de fallos previos, antes (etapa lenta de roturas, el índice de roturas se incrementa después de cada rotura) o después de tres roturas (etapa rápida de roturas, el índice de roturas alcanza el estado permanente). El estudio ya se plantea la cuestión de la longitud de la tubería, pero no contempla el cálculo del número de fallos futuros.

### **3.2 Eisenbeis(1994, 1999), Le Gatt (2000)**

Las investigaciones que se han realizado por parte de Eisenbeis para el Cemagref de Bordeaux (Francia) forman parte del proyecto Europeo Care\_W. El Cemagref en conjunto con la Universidad de Trondheim en Noruega, desarrolla la investigación de los modelos estadísticos de la degradación de redes de agua. En un principio las publicaciones de Eisenbeis (1994), exploró ambos modelos el modelo de riesgo proporcional de Cox (CPHM) y el modelo de riesgo proporcional de Weibull (WPHM), en tres empresas de agua de Francia. Los datos son estratificados en varios grupos, basados en su número de fallos previos.

Los estudios se basan en una base de datos de periodos largos (17, 40 y 54 años de observación de las roturas). Solo las tuberías con la información “perfecta” (no

censurada por la izquierda, todas las tuberías introducidas en el estudio tienen un registro de fallos y el año de instalación) son conservadas.

Parámetros de regresión						
Factores de riesgo	LED-Bordeaux		CEB		Bas-Rhin	
	Cox	Weibull	Cox	Weibull	Cox	Weibull
Longitud	0.52(0.06)	0.57 (0.05)	0.37 (0.05)	0.37 (0.05)	0.48 (0.10)	0.49 (0.09)
Diámetro	-0.80 (0.14)	-0.85(0.11)	-0.34 (0.10)	-0.34 (0.10)	-0.37 (0.30)	-0.39 (0.26)
Suelo	0.32(0.09)	0.34 (0.07)	0.29 (0.09)	0.29 (0.09)	NA	NA
Tráfico	0.23(0.12)	0.47 (0.09)	0.58 (0.18)	0.57 (0.17)	-0.45 (0.22)	-0.45 (0.20)

Parámetros de la función de Weibull									
	LED-Bordeaux			CEB			Bas-Rhin		
	1er rotura	2da rotura	3er rotura	1er rotura	2da rotura	3er rotura	1er rotura	2da rotura	3er rotura
$\lambda$	0.03	0.15	0.15	0.02	0.10	0.20	0.03	0.07	NA
$p$	1.67	1.06	1.00	1.21	0.99	1.00	1.27	1.08	NA

Tabla 7. 1 Parámetros de regresión de los factores de riesgo significantes, para los modelos estratificados de CPHM y WPHM en LED-Bordeaux, CEB y Bas-Rhin

Los factores de riesgo pertenecientes a las tuberías (longitud y diámetro), y los factores de riesgo correspondientes al entorno (suelo y tráfico) se mostraron significantes. En las tres empresas de agua, el orden de la magnitud de los parámetros de regresión cuando es utilizado un modelo (CPHM) o un modelo (WPHM) permanecen igual. Iniciando la segunda rotura, el modelo WPHM empieza a comportarse como un modelo exponencial (el valor de  $p$  es cercano a uno). La validación del modelo y la priorización, se realizan calculando el número de fallos esperados por múltiples integraciones.

Las dos empresas de agua Lausanne y Charente-Maritime respectivamente, representan el primer intento para Eisenbeis y Le Gatt, de probar el modelo en base de datos para periodos cortos (nueve y cinco años respectivamente), con un modelo WPHM que cuenta con truncamiento izquierdo significativo, la edad de la izquierda; es la edad de la tubería al principio de la observación, si esta no se rompe durante la ventana de observación (contemplada desde el principio y final de la observación), o la edad del fallo previo si la rotura llega a ocurrir.

En estos estudios, los estratos son creados a partir del material y el número de fallos previos (ninguna rotura, una o más roturas), y cada estrato se presenta entonces con sus propios parámetros de regresión. Se utiliza un modelo WPHM en su base estándar, con un fondo completamente analítico, que permite predicciones para largo plazo.



Factores de riesgo	Parámetros de regresión para Lausanne				
	Hierro ductil		Hierro gris		Acero
	NFPO=0	NFPO>0	NFPO=0	NFPO>0	NFPO $\geq$ 0
NFPO		-2.03			
Edad-izquierda				-0.35	-0.6
Longitud	-0.27		-0.37	-0.43	-0.57
Diámetro	0.55		0.29		0.91
Presión	-0.03		-0.051	-0.102	
Intercepción, $\alpha$	8.82	10.83	11.54	13.8	8.95
Escala, $\sigma$	0.36	1	0.63	1.15	0.99

Tabla 7. 2 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Lausanne

Factores de riesgo	Parámetros de regresión para Charente-Maritime					
	Asbesto Cemento		Hierro gris		PVC	
	NFPO=0	NFPO>0	NFPO=0	NFPO>0	NFPO=0	NFPO>0
Presión						0.85
Edad-izquierda			-1.81		-1.65	1.99
Trafico			0.47		-1.65	
Humedad	-1.66	-1.45		-2.25		
Acides	2.35		-0.75	-1.87		
Rocas				-2.93		
Diámetro			0.52	1.38		
NFPO						-1.59
Conexión					1.74	-1.60
Longitud				-0.53		-0.29
Intercepción, $\alpha$	14.32	8.84	4.92	7.59	12.89	5.79
Escala, $\sigma$	1.26	1.90	0.71	1.74	1.15	1.37

Tabla 7. 3 Parámetros de regresión para un modelo WPHM en Charente-Maritime

Los dos estudios anteriores indican que los resultados significativos pueden ser obtenidos sobre una base de datos de periodos cortos e importantes, censura a la izquierda. Las tareas de priorización en la rehabilitación, se llevan a cabo en base al cálculo del número teórico de fallos dentro de un cierto horizonte de planeación. El número teórico de fallos, es también usado para probar la validación del modelo para la comparación del pronóstico de los resultados observados.

Los últimos métodos del pronóstico del número de fallos, utilizan una simulación Monte Carlo en la curva de sobrevivencia, expresada con un modelo WPHM, que representa una mejora comparado con el método original, que requiere la introducción de la múltiple integración del número de fallos esperados y de la longitud (Le Gatt, 2000).

---

Los modelos presentados mezclan los resultados cuando comparan los fallos observados y esperados, y los resultados esperados tienden a ser sobreestimados. Un estudio realizado por Achard *et al* (1994), que compara la proyección de las roturas obtenidas con un modelo WPHM por Eisenbeis en Bordeaux, con las roturas reales desde el mismo sistema, enfatiza el hecho de que la precisión en el nivel de las tuberías en términos del pronóstico del número de fallos fue mas bien limitado. Sin embargo, en general, el modelo es capaz de identificar las tuberías con mayor probabilidad de fallo, con un índice de éxito que varía entre el 30% y 75% de las roturas evitadas sobre un término de periodo de tiempo corto, si el 10% de las tuberías de mayor riesgo se reemplazan.

Los estudios de Eisenbeis y Le Gatt, indican que los parámetros significativos varían de una empresa a otra. Cada red de distribución cuenta con características específicas que afectan los fallos en las tuberías, esto de acuerdo con el equipo de Cemagref, de tal manera que establecer un modelo universal resulta complicado, por otro lado, la longitud y el diámetro presentan alguna consistencia en sus resultados.

### **3.3 Malandain (1998, 1999)**

Malandain propone una alternativa al método planteado por Eisenbeis para la red de Lyon, y para ello utiliza un modelo de regresión de Poisson, para cuantificar la influencia de los diversos factores de riesgo en el índice de roturas. Posteriormente se reagrupan las tuberías en función de estos factores (inherentes a las tuberías y al entorno). Eisenbeis, en su trabajo original, asume tres etapas de degradación (equivalentes a los estratos basados en el número de fallos previos), utilizando para la primera etapa el modelo WPHM y en las etapas posteriores, un modelo exponencial. Eisenbeis encontró que después de la última etapa, el valor del parámetro de forma es cercano a uno. Los cálculos con el método de Malandain resultan simplificados, pero los resultados están limitados a un grupo de tuberías.

### **3.4 Rostum (2000)**

Rostum compara los resultados obtenidos con un modelo WPHM y un modelo proporcional de Poisson no homogéneo NHPP, para el sistema de distribución de agua de la ciudad de Trondheim (Noruega). Las tuberías son reagrupadas sobre la base de evidencias estadísticas y conocimientos prácticos. El modelo de calibración se obtiene utilizando una base de datos de nueve años de registro de fallos, y la verificación se realiza con la base de datos de los dos próximos años. Al nivel de la red (número total de fallos para un grupo completo) el modelo WPHM tiende a sobreestimar los resultados, mientras el modelo NHPP se ajusta mejor a los datos observados. Se obtienen buenos resultados al contar con una muestra suficientemente grande.

### **3.5 Resumen de todos los estudios relacionados**

En la siguiente tabla se concentran todos los estudios relacionados con la optimización en la priorización de la renovación de tuberías.

<b>Autor(fecha)</b>	<b>Problema</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Herramienta Matemática</b>
Woodburn (1986) Lansay(1992) Kim(1994)	Deficiencia hidráulica	Minimizar costes debido al incremento de bombeo	Mezcla de integración no lineal
Li(1992)	Deficiencia estructural	Minimizar costes para c/tubería basado en la	Modelo Semi-Markoviano prob. Calculadas con función riesgo y superv. Optimización a través de prog. Lineal
Halhat(1997)	Deficiencia estructural (roturas) y deficiencia hidráulica	Optimización con restricción presupuestaria	Algoritmos genéticos
Deb(1998)	Deficiencia estructural	Determinación de la long. A rehabilitar cada año	Función de supervivencia con datos limitados
Kleiner(1998)	Deficiencia hidráulica	Minimizar costes	Programación dinámica
Utilnets(1999)	Corrosión mas carga externa	Calculo del tiempo de vida restante	Modelo determinista
Loganathan(2002)	Degradación estructural	Predicción del índice de roturas	NHPP
Shamir and H. (1979)	Deficiencia estructural (roturas)	Modelación del número de roturas con el tiempo	Regresión
Clark(1982)	Deficiencia estructural (roturas)	Modelación del número de roturas basada en los factores de riesgo	Regresión
O'Day(1989)	Deficiencia estructural (roturas)	Modelación de la edad de la 1er rotura basada en los factores de riesgo	Regresión
Andreou(1986)	Deficiencia estructural (roturas)	Identificar factores de riesgo relev.	Análisis de supervivencia
Eisenbeis(1994,99)	Deficiencia estructural (roturas)	Identificar riesgos en la tubería obteniendo probabilidades de fallo	Análisis de supervivencia Simulación Monte Carlo
Elbanousy(1997)	Deficiencia estructural (roturas)	Optimización, minimizando costes	WPHM Valoración ciclo de vida
Rostum(2000)	Deficiencia estructural (roturas)	Priorización tub. En base al riesgo	Análisis de supervivencia
Malandain(2000)	Deficiencia estructural (roturas)	Priorización tub. En base al riesgo	WPHM, modelo exponencial

*Tabla 7. 4 Resumen de los estudios de investigación (Adaptado de Vanrenterghem – Raven, 2003).*

Se ha adoptado el análisis de supervivencia para el siguiente caso de estudio por varias razones y consideraciones:

- Un análisis estadístico permite la utilización de los datos existentes. Incluso si la evaluación física directa o la colección de los datos se realiza posteriormente, se puede aplicar la utilización de datos censurados, ya sea censura a la derecha, a la izquierda o ambas.
- Los análisis de supervivencia son apropiados cuando se consideran varios factores de riesgo, como es nuestro caso.
- Los análisis de supervivencia cuentan con aplicaciones recientes en proyectos importantes, como el proyecto CARE\_W, en el que todavía restan bastantes cosas por hacer y verificar, motivo que lo hace más viable (por flexible) e interesante su aplicación.
- En el presente trabajo se observa un gran reto, en relación a la etapa actual del conocimiento del análisis de supervivencia, en los sistemas de las redes de distribución de agua. Por tal motivo trataremos de dar el enfoque de

---

---

planificación en la rehabilitación de las redes de agua, y ofrecer contribuir en esa línea.

#### **4 Objetivo del Modelo**

Como se ha venido comentando, el deterioro físico en las redes de distribución de agua se manifiesta a través de tres diferentes problemas: la pérdida de la integridad estructural (roturas/fugas), deterioro en la calidad del agua transportada y la pérdida de la capacidad hidráulica. A partir de lo desarrollado anteriormente y de los datos disponibles, ahora abordaremos el tema de la deficiencia estructural.

Para este estudio utilizaremos métodos estadísticos para el análisis de la historia de fallos. Este tipo de métodos, ampliamente usado en el campo de la investigación medica, fue pionero para la industria del agua en los inicios de los años 80, cuando la disponibilidad de los datos eran escasa, motivo que dificultaba las posibilidades de éxito de tal metodología.

El reciente resurgimiento del interés hacia los métodos estadísticos, ha hecho que las empresas de agua estén adquiriendo actualmente sistemas de información (entre ellos, los sistemas de información geográfica), donde los datos originalmente generados para propósitos de operación, se utilizan para otros objetivos.

Además del contexto favorable en el incremento de la popularidad, disponemos de herramientas de alta tecnología que permiten el continuo monitoreo de los indicadores relevantes (por ejemplo detección de fugas), o para la simulación hidráulica del sistema. Gracias a esto, contamos con una amplia y rica base de datos, que puede ser utilizada para proponer planes de rehabilitación.

##### **4.1 Modelación de la degradación de las redes de abastecimiento a través del análisis de supervivencia/fallo en un entorno complejo.**

La necesidad de contar con un método sistematizado, ha conducido a diversas iniciativas emprendidas por algunos países europeos, que han auspiciado a través de la fundación europea el programa CARE\_W, en el que están trabajando activamente y desarrollando metodologías para los procesos en los planes de rehabilitación, implementando modelos de riesgos proporcionales (y también modelos de Poisson no homogéneo, en el caso de una única empresa de agua). Hasta el momento se han probado en un escaso número de empresas de agua y con algunas particularidades que describimos a continuación:

- Redes de distribución en áreas rurales o suburbanas (con pocas conexiones, segmentos largos, actividad y tráfico bajo, baja densidad de la población).
- Factores de riesgo de relevancia regular asociados a las tuberías (edad, diámetro, material);
- en algunos casos, el único factor relevante que no pertenece a las tuberías mismas fue el tráfico,
- los modelos no han sido probados en localidades, donde los factores medioambientales o del entorno son mas importantes.



- 
- La disponibilidad de la base de datos de roturas es corta, o con pocos datos con truncamiento izquierdo (los datos disponibles de roturas se inician en una fecha antes de la fecha de instalación para más del 80% del sistema).

Un estudio reciente (Le Gatt, 2000) mostró resultados favorables para dos empresas de agua con datos de periodos cortos, e importantes datos de truncamiento-izquierdo. Sin embargo, los factores de riesgo mas importantes considerados para estas empresas de agua, han sido aquellos asociados con las tuberías, que no cambian con el tiempo, al contrario de lo que sucede con los factores del entorno.

El objetivo de este trabajo, es evaluar, si es posible y bajo qué condiciones, los modelos pueden ser aplicados a un sistema más complejo, como el caso del sistema de la red de abastecimiento de la ciudad de Celaya, Gto. México.

De este modo se plantea una modificación al índice de condición física de Cox, que consistiría en lo siguiente: si el objetivo es priorizar una población de tuberías por orden del nivel de riesgo, se podrá utilizar dicho índice en base al valor total de la función de riesgo base de cada tubería comparada una a una. De esta manera, se determina un orden de prioridad para la rehabilitación. Los datos que se han preparado y las características con las que se cuentan son los siguientes:

La red de distribución, se localiza en una zona completamente urbanizada con multiconexiones, donde cuenta con zonas de tráfico intenso, alta densidad de la población, una proximidad densa en otros servicios subterráneos, frecuente apertura de las calles donde se localizan las tuberías. Como comprobamos, hay una fuerte intervención de los factores de riesgo relacionados con el entorno, que juegan un papel importante.

Consideramos que con la presentación de este objetivo y el método, se cierra el ciclo del análisis de los factores, que contribuyen al índice de roturas y su comportamiento en la red. Por tal motivo, el análisis estadístico resulta necesario en este estudio, y seguramente aportara valiosa información y resultados para el entendimiento del estado actual de la red y ofrecerá alternativas para la programación en la priorización de la renovación de tuberías.

## **5 La toma de decisiones para la planeación en la rehabilitación**

En este caso, los datos pueden ser modelados mediante un modelo de riesgo proporcional, y como su nombre lo indica, todas las tuberías que pertenecen a un mismo estrato no experimentan ningún cambio en sus factores de riesgo durante el horizonte de planeación (el número de fallos previos, que puede cambiar durante el horizonte de planeación, se opone a este supuesto) y aunque tienen la función de índice de riesgo distintiva, pero los factores permanecen proporcionales con el tiempo. Esto significa que si no hay ningún cambio de los factores de riesgo durante el horizonte de planificación y dentro de un mismo estrato, la tubería que tuvo el índice de roturas alto al principio del horizonte de planeación (al momento cuando la decisión es tomada), continuara manteniendo el índice alto y también experimentara un número alto de roturas.

---

---

Se creará un Índice de Evaluación de las condiciones físicas (IECF), que nos ayudará en la planeación de renovación para la priorización del orden de tuberías, en base a su nivel de riesgo.

Un índice para la evaluación de las condiciones físicas podrá ser una herramienta muy útil y complementaria, para la toma de decisiones en la planeación de la renovación de tuberías. Este índice se podrá emplear por parte de los gestores de los sistemas de redes en situaciones reales, por ejemplo, si se contempla abrir zanjas en una calle para realizar trabajos en estructuras subterráneas, canalizaciones urbanas o trabajos de reasfaltado.

El gestor de la red de abastecimiento podrá contactar con los diferentes departamentos del ayuntamiento, o empresas que pretendan llevar a cabo los trabajos, con el objetivo de valorar el reemplazo de las tuberías, al mismo tiempo que se realizan los trabajos de las demás empresas implicadas. Un cómputo rápido del índice de las condiciones físicas podrá auxiliar en conjunto con los otros factores valorados, para determinar cuales tuberías de la zona de influencia son más factibles de fallo, y en consecuencia son candidatas para su rehabilitación, con la ventaja de que el cómputo de los resultados se puede realizar de manera rápida, una vez que se tiene implementado el modelo.

### **5.1 Análisis de la información para los modelos de riesgos proporcionales**

El análisis estadístico se realizará para el sector Centro y sector San Juanico Poniente, pues dicho sector cuenta con tuberías de diferentes características, como son: el material, edad, diámetro y longitudes, así como de diversas características del entorno que lo rodea. El sector San Juanico Poniente cuenta con material de la tubería de Polietileno con 20 años de edad, y a pesar de contar con una edad relativamente corta, ha presentado varias fugas, al igual que el sector de San Juanico (Oriente). Por tal motivo es interesante determinar, cuales son los factores de riesgo que influye en el índice de roturas.

Los sectores seleccionados se han considerado en base a los siguientes criterios:

- Disponibilidad y conocimiento de los factores de riesgo
- Los factores de riesgo cubren un amplio rango de valores potenciales
- Muestras suficientemente grandes, las cuales pueden ser divididas en sub-grupos con significancia estadística
- Historia de roturas considerable
- Dimensión del área suficientemente grande con un adecuado número de roturas

La información se obtiene del sistema de información geográfica de la JUMAPA, donde se derivan los reportes diarios de roturas, que han sido analizadas y procesadas para el presente trabajo. En base a la dimensión de la base de datos, se opta por seleccionar el grupo de tuberías de los sectores señalados, donde se cuenta con tuberías de diferentes diámetros, edades, materiales, longitudes y diversas características en cuanto al entorno que las rodea.

Se construyo una base de datos codificada para el análisis estadístico, un extracto de la misma se muestra en la tabla 7.5, la tabla donde se muestran 59 tuberías del total de 1685, incluyendo las variables de sobrevivencia (time) y censura (censor), la información de las roturas y todos los individuos estadísticos introducidos después de cada rotura.

ID	nfp0	nfp1	nfp2	nfp3	nfp4	traf	canprox	tiposuelo	nfpocuat	relleno	profund.	diam	edad	mat	materi	matecomb	mat1	mat2
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
3	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
6	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
7	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
9	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
10	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
12	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
13	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
14	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
15	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
16	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
17	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
18	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	150	30	AC30	AC	AC30150	0	1
19	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
20	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
21	0	0	1	0	0	0	0	1	2	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
22	0	0	0	1	0	0	0	1	3	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
23	0	0	0	0	1	0	0	1	4	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
24	0	0	0	0	1	0	0	1	4	1	0	300	30	AC30	AC	AC30300	0	1
25	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
26	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
27	0	0	1	0	0	0	0	1	2	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
28	0	0	0	1	0	0	0	1	3	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
29	0	0	0	0	1	0	0	1	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
31	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
32	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
33	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
34	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
36	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
37	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
38	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
39	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
40	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
41	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	300	30	AC30	AC	AC30200	0	1
42	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
43	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
44	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
45	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
46	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
47	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	1	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
49	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
51	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
52	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
53	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
54	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
55	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
56	0	0	0	0	1	0	0	0	4	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
57	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
58	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1
59	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	75	30	AC30	AC	AC3075	0	1

mat3	mat4	long	llong	longitud2	longestrat	long1	long2	Indiam	diametro	diametro2	diamstr	diam1	diam2	diam3	edadstrat	matstrat	servcont.	time	ensor
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	45	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	84	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	117	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	592	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	343	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	791	1
0	0	164	5.100	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	583	0
0	0	110	4.700	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	1684	1
0	0	110	4.700	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	266	1
0	0	110	4.700	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	605	0
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	23	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	410	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	153	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	218	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	812	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	641	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	222	1
0	0	185	5.220	0	2	0	1	5.011	2	1	2	0	1	0	1	2	0	76	0
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	145	1
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	157	1
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	1569	1
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	110	1
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	133	1
0	0	80	4.382	1	1	1	0	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	441	0
0	0	142	4.956	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	798	1
0	0	142	4.956	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	464	1
0	0	142	4.956	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	277	1
0	0	142	4.956	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	146	1
0	0	143	4.963	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	870	0
0	0	105	4.654	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	901	1
0	0	105	4.654	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	130	1
0	0	105	4.654	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	517	1
0	0	105	4.654	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	487	1
0	0	106	4.663	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	520	0
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	154	1
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	641	1
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	484	1
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	502	1
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	211	1
0	0	130	4.868	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	135	1
0	0	131	4.875	0	2	0	1	5.704	3	0	3	0	0	1	1	2	0	428	0
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	477	1
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	507	1
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	204	1
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	782	1
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	189	1
0	0	135	4.905	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	396	0
0	0	170	5.136	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	156	1
0	0	171	5.142	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	2399	0
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	399	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	385	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	468	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	631	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	84	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	344	1
0	0	140	4.942	0	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	244	0
0	0	120	4.787	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	42	1
0	0	120	4.787	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	1805	1
0	0	120	4.787	1	2	0	1	4.317	1	1	1	1	0	0	1	2	0	708	0

Tabla 7. 5 Base de datos de 59 tuberías estadísticas del total de 1685, incluye roturas, variables de sobrevivencia y de censura (time; censor) entre otras, respectivamente.

La tabla 7.5 muestra un extracto de la base de datos, construida para todos los individuos, con la información de fallos en un periodo de siete años (2000-2006). Será necesario crear tablas adicionales, para el desarrollo de los diversos objetivos de este trabajo, incluyendo los datos de fallos para el periodo 2000-2006 en los siguientes estratos: Acero Galvanizado, Asbesto-cemento y Polietileno y el estrato de igual o mas de un fallo.

La siguiente figura muestra la distribución de los materiales del sector centro



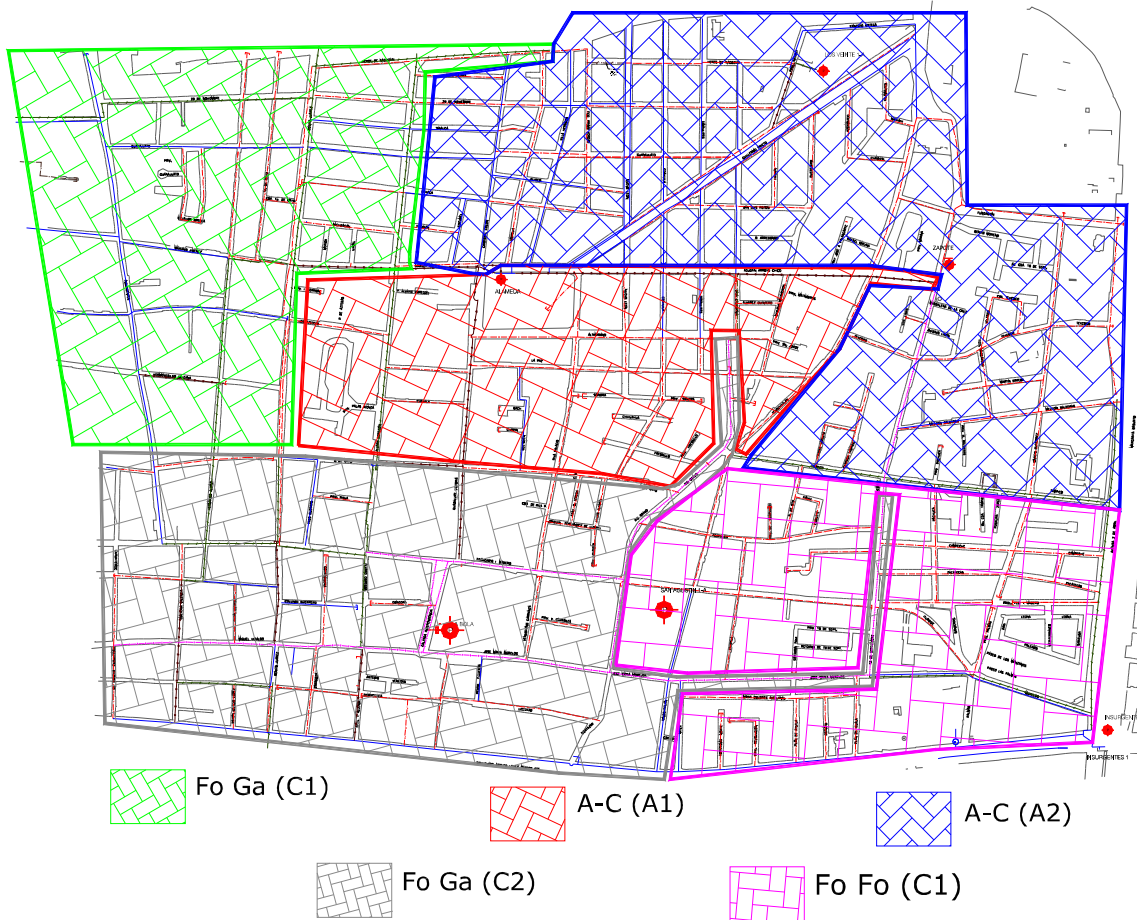


Figura 7. 7 Sectores del centro con el tipo de material homogéneo

## 5.2 Preparación del análisis estadístico

### 5.2.1 Selección de las herramientas informáticas

En los diversos trabajos previos que se han realizado en diversos lugares ya sea en Europa o Estados Unidos, se ha utilizado una variedad de software estadístico. En nuestro caso, vamos a seleccionar el lenguaje R. Se trata de un proyecto de software libre, resultado de la implementación GNU desarrollado por R Foundation, que lo hace muy atractivo, incluyendo su gran potencial para abordar los diversos y complejos temas estadísticos. Además, R puede integrarse con distintas bases de datos, agregando que existen librerías que facilitan su utilización, desde lenguajes de programación interpretados como Perl y Python o en lenguajes de código compilado, por ejemplo, C o Fortran. Así mismo se utiliza el software estadístico S-Plus, con el cual se puede emplear el lenguaje R en su editor, para realizar y personalizar los análisis estadísticos.

Una base de datos puede ser importada al visor del lenguaje R o al software S-Plus, en un formato adecuado para base de datos, deben ser introducidos las variables de censura (llamada “censor” en nuestro caso) y la variable de supervivencia/fallo (“time”), así como los diversos factores de riesgo que se deseen analizar. Una vez realizado lo

---

anterior, se pueden “correr” los modelos de riesgo proporcional de Cox o de Weibull. También se puede calcular el estimador Kaplan-Meier, que nos permitirá la verificación de la hipótesis de proporcionalidad de las variables que se desee analizar. Las variables que se pueden tomar más de dos posibles valores pueden ser tratadas como categóricas. Es posible también la estratificación (en todos los posibles valores de una variable).

Para determinar la significancia de los factores de riesgo, se empleo el lenguaje R, pero cabe mencionar que se puede emplear el software S-Plus. La ventaja de utilizar el lenguaje R, es que uno puede ampliar y adecuar las salidas de los resultados tanto como sea posible, y con S-Plus se esta sujeto a la disponibilidad de las opciones con que cuenta el software. Lo mismo sucede con el calculo de los parámetros de regresión, la forma paramétrica y las funciones estadísticas. Para el cálculo del Índice de Evaluación de las Condiciones Físicas, se desarrolla una macro en Visual Basic, que se detalla en párrafos posteriores.

Para estimar los coeficientes de regresión  $b$ , los datos primero son condicionados sobre el tiempo de fallo y el índice de riesgo de la línea base, para obtener una probabilidad condicional de fallo en cada único tiempo de fallo. También se utiliza el software SPSS para generar la graficas Probabilidad-Probabilidad ó (P- P), que consideramos que es software mas completo y adecuado, para este tema en particular.

## **5.2.2 Desarrollo de la base de datos**

### **5.2.2.1 Los factores de riesgo y los individuos estadísticos**

La entidad básica de un análisis estadístico es su población (estadística) comprendida de individuos (estadísticos). Cada tubería física básica que constituye la red física posee un diámetro, material y longitud dados; sin embargo, para este estudio se decide que se introducirá un nuevo individuo estadístico siempre que aparezca un cambio del valor de la variable. Como consecuencia, los individuos estadísticos no necesariamente corresponden con los segmentos físicos, si varios segmentos de tuberías tienen el mismo diámetro, edad, material y otras variables también se mantienen igual, ello se transformara en un solo individuo estadístico y viceversa. Si un elemento de la tubería experimenta un cambio en su factor de riesgo, por ejemplo en el número de fallos previos, se tendrá que crear dos individuos estadísticos con las mismas características físicas, pero con una modificación en el segundo individuo estadístico en el factor de riesgo del número de fallos previos.

En base a la experiencia y en común acuerdo con el departamento técnico de JUMAPA, se plantean los siguientes factores de riesgo:

*npfo*. Este factor se refiere al número de fallos previos, el cual ha sido explicado, pues la historia de fallos es un factor muy importante en el comportamiento para fallos futuros, y para determinar el índice de fallos, esta variable puede ser sensible a la definición de los segmentos.

*traf (tráfico)*.- El riesgo de fallo debido a la carga adicional por el trafico, se considera que se incrementa en las avenidas donde existe un trafico intenso.

---

El tráfico pesado del sector centro se produce en las principales avenidas, como se muestra en la figura 7.8.

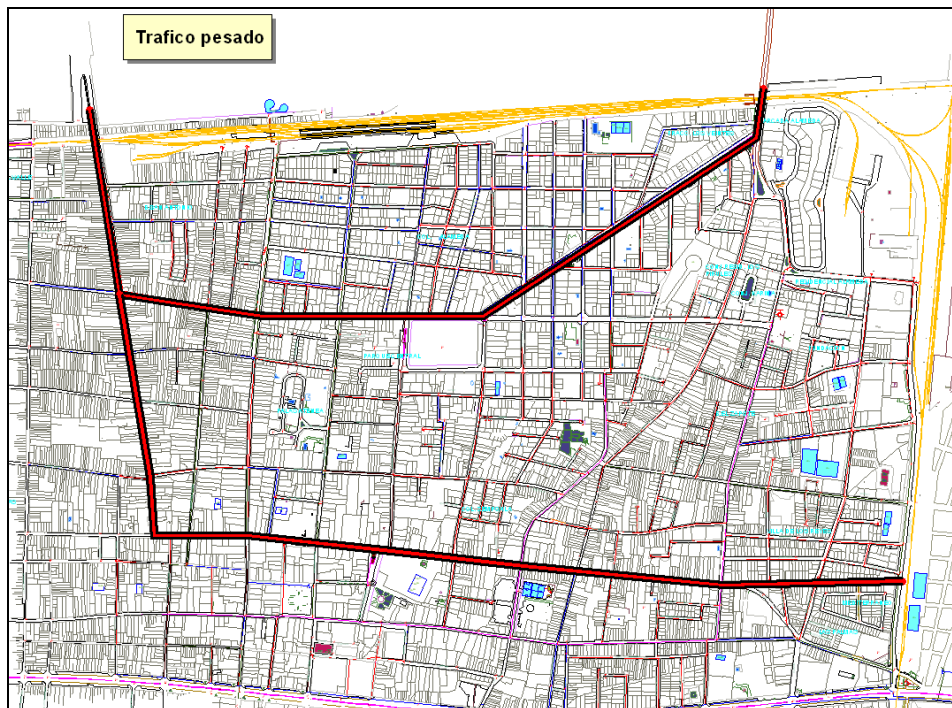


Figura 7. 8 Esquema del tráfico pesado del sector centro

*Canprox (Canalizaciones próximas).*- Actualmente con el incremento de los servicios urbanos subterráneos, tales como el servicio de gas, telefonía, tv, electricidad y el servicio de agua, han hecho que las canalizaciones subterráneas se saturen, lo que incrementa el riesgo de las tuberías de sufrir una rotura, al momento de realizar las excavaciones para la instalación o reparación de dichos servicios.

*tiposuelo (Tipo de suelo).*- Un gran porcentaje de las tuberías son de material ferreo, ya sea fundición o acero galvanizado, y por consiguiente el tipo de suelo es importante desde el punto de vista de su agresividad. Se tiene identificado por parte de Jumapa las áreas donde las excavaciones que se realizaron para colocar la tubería son producto de material externo, es decir que no es nativo de la zona y esto se ha considerado que juega un papel importante en el riesgo de fallo, desde el punto de vista de estabilidad de la excavación.

*servconti (Servicio continuo).*- El servicio intermitente en el suministro puede ocasionar fallos en las tuberías, debido a los efectos transitorios, la intrusión y expulsión de aire, etcétera. Por tal motivo se considera necesario considerar este factor para su valoración.

*relleno* .- Es indudable que el relleno en el cual se instala y se protege la tubería, es importante y es un factor de riesgo en el fallo de las mismas. Dicho relleno debe de cumplir con ciertas especificaciones en cuanto: a su granulometría, plasticidad, porcentaje de humedad, etcétera. Se considera muy importante para un buen comportamiento de las tuberías, independientemente del material, pero parece ser más sensible la influencia en las tuberías plastificadas.

---

*profundidad.*- Un porcentaje elevado de las tuberías se encuentra sobre las avenidas, y por tal motivo es importante la profundidad a la que se instala las tuberías, debido a la proximidad con otras instalaciones subterráneas, y la repercusión de las cargas vivas que se pudieran presentar en algunas tuberías.

*diam (diámetro).*- En los reportes generales de las roturas y en estudios previos se ha encontrado que las tuberías de diámetro pequeño, tienen mas probabilidad de romperse que las tuberías de diámetro grande, aunque la diferencia que se presenta entre diámetros grandes es menos sensible, y por tal motivo, el logaritmo del diámetro podrá ayudarnos a mostrarlo.

*Edad.*- Lo mismo que sucede con el diámetro, la edad es, sin lugar, a dudas un factor de riesgo que se debe de analizar para el fallo en las tuberías. No es necesariamente una variable de influencia en el número de roturas, pero es por demás indispensable analizarlo.

*mat (material).*-Se considera que las tuberías de hierro, son mas resistentes que las tuberías de asbesto-cemento y polietileno, y además, la variación en la calidad puede variar dependiendo de la fecha de fabricación, como lo han demostrado algunos estudios al respecto.

En la figura 7.9 se muestra las áreas donde se localizan las canalizaciones de otras obras urbanas, con las cuales existe una proximidad con las tuberías del sector centro.

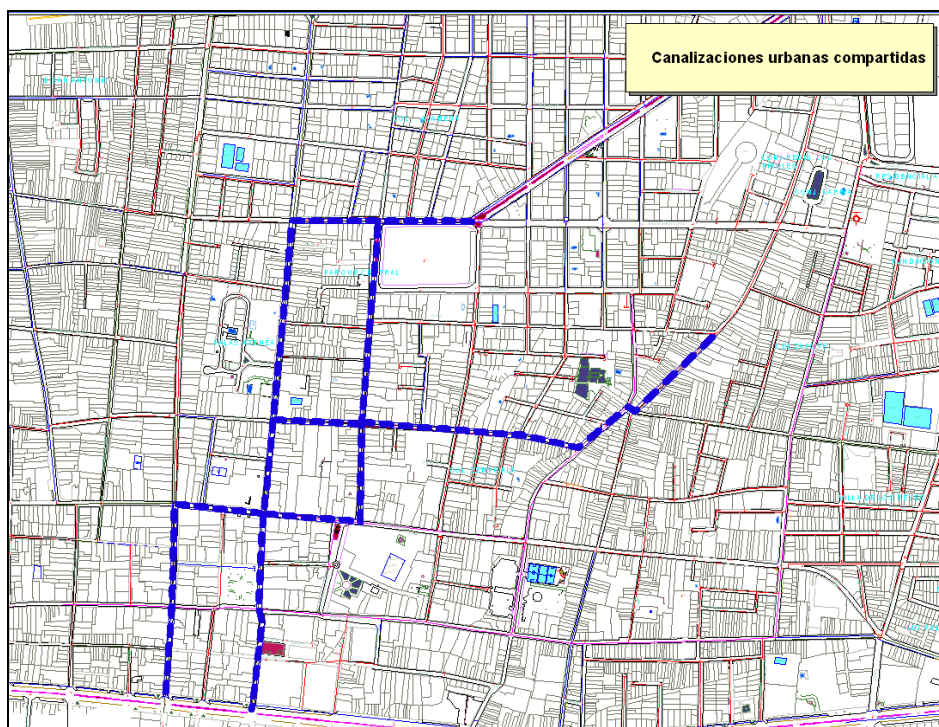


Figura 7. 9 Esquema de las canalizaciones próximas compartidas

Definitivamente, existen otras variables que pueden influir en el índice de roturas. Estas variables, retrospectivamente, pueden explicar incidencias más altas, algunas veces pero sin tener ningún mérito predictivo (Temperatura) o permanecer inalterados sobre la

---

zona de estudio, y por lo tanto no se consideran en este trabajo. Por ejemplo, la presión, en algunos estudios se considera como variable de riesgo, pero en nuestro caso, como se ha comentado anteriormente, la presión de operación en la red de la ciudad de Celaya, es relativamente baja al permitirse una presión mínima de 15 mca.

Varios factores de riesgo pueden ser considerados para ser analizados, aunque la disponibilidad de los datos es determinante para incluir en el análisis dichos factores y viceversa, una vez que se asume los factores de riesgo seleccionados, cuando siguiendo una tubería a lo largo de una calle, cada vez que un factor de riesgo cambia, incluyendo el número de fallos previos (nfpo), se introduce un nuevo individuo estadístico, como se detalla en párrafos anteriores, es muy importante resaltar que la selección de asumir los factores de riesgo, podrá tener un gran impacto en la base de datos. En otras palabras, se asume que son probadas más variables, puede ser probablemente contar con individuos estadísticos más cortos.

### **5.2.2.2 Análisis de supervivencia/fallo: introducción de nuevas variables estadísticas e individuos estadísticos**

#### **5.2.2.2.1 Nuevas variables estadísticas**

Los modelos de riesgo proporcional requieren que sean introducidas dos variables estadísticas:

- Variable de censura (censor): si el segmento no tiene ninguna rotura hacia el final de la observación (2006), el segmento es llamado censura-derecha; si una rotura se presenta, el segmento no es censurado. Es introducido un nuevo individuo estadístico (ver la siguiente sección).
- Variable de supervivencia (time): el tiempo de fallo/supervivencia es la variable de interés en un modelo de riesgo proporcional. El tiempo de fallo se encuentra relacionado con el tiempo de instalación del segmento, estado de censura (censura =1, no censura =0)

#### **5.2.2.2.2 Nuevos individuos estadísticos**

Los modelos de riesgo proporcional permiten no más de una rotura por individuo estadístico, lo cual es una seria limitante de los modelos de riesgo proporcional. El hecho de que algunos segmentos tengan más de una rotura, esto requiere la introducción de un nuevo individuo estadístico después de cada rotura. Este nuevo segmento tendrá los mismos factores de riesgo, excepto que el tiempo de supervivencia/fallo (time), ahora será calculado basado en la fecha del último fallo. Además, es introducida la variable del número de fallos previos, para marcar la diferencia entre dos segmentos con todas las mismas características, incluyendo el mismo tiempo de supervivencia/fallo, pero con dos diferentes historias de fallo.

---

---

Después de introducir los nuevos individuos estadísticos, el número de fallos previos se incrementa por una unidad. El último individuo estadístico, generado a través del mismo segmento de la tubería, naturalmente tendrá un número de fallos previos más alto y es censura-derecha (censor = 0).

Por tal motivo contamos con un total de 294 tuberías o segmentos físicos, de los cuales se derivan 1685 segmentos estadísticos.

### 5.2.2.3 Codificación de las variables basadas en varios escenarios de análisis

Las variables pueden aparecer en un formato binario (“sí”/“no”), continuo, o categórico (“0”, “1”, “2”, “3”, etcétera, categorías pero el resultado “2” no son dos veces el “1”). Cuando leemos los resultados, ello es importante tener en mente para las variables categóricas, los resultados son dados en una manera binaria, con respecto al valor de referencia. Los resultados son fáciles de leer si “0” es atribuido al valor de referencia, el cual es frecuentemente la variable con el “mejor” (o “peor”) resultado.

Reagrupando los valores de una variable continua, son tratados como categóricos. El conjunto de datos debe ser entendido claramente, antes de tomar la decisión de introducir una determinada variable, en una o de otra forma. Por ejemplo, una variable continua que no presenta una relación monótona con la variable de fallo, necesita ser reagrupada de una manera analítica, el reagrupamiento refleja las observaciones.

### 5.2.2.4 Descripción de la base de datos

En la tabla 7.5 se presentó un extracto de la base de datos, incluyendo todos los intervalos estadísticos, y toda la información de las roturas del periodo 2000-2006. La base de datos es presentada en el **anexo 3**.

La descripción de las variables son las siguientes.

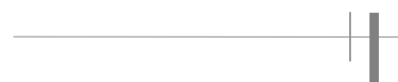
ID	Número de identificación consecutivo
nfp0	Número de fallos previos, que ocurren en las misma tubería
nfp0	Ninguna rotura
nfp1	“0”= diferente de un fallo “1”= tiene un fallo
nfp2	“0”= diferente de dos fallos “1”= tiene dos fallos
nfp3	“0”= diferente de tres fallos “1”= tiene tres fallos
nfp4	“0”= diferente de cuatro fallos “1”= tiene cuatro fallos

---



---

Traf	“0”= trafico moderado “1”= trafico alto
Canprox	“0”= no existen canalizaciones próximas “1”= existen canalizaciones próximas
Tiposuelo	“0”= suelo adecuado “1”= suelo inapropiado
Relleno	“0”= material nativo “1”= material no nativo
Profund	“0”= profundidad dentro de norma “1”= profundidad fuera de norma
Diam	Diámetro en mm
Edad	Edad de la tubería
Material	Material de cada tubería
Mat1	“0”= material distinto de asbesto cemento “1”= material asbesto cemento
Mat2	“0”= material distinto de acero galvanizado “1”= material acero galvanizado
Mat3	“0”= material distinto de fundición “1”= material fundición
Mat4	“0”= material distinto de polietileno “1”= material polietileno
Long	Longitud en metros
Lnlong	Logaritmo de la longitud
Longestrat	“0”= long. <100m “1”= long. 100 a 200 m “2”= long. >200m
Ln diam	Logaritmo del diámetro
Diamstrt	“0”= diam. <100mm “1”= long 100 a 200 mm “2”= long >200mm
Edadstrat	“0”= 30 años “1”= 40 años “2”= 50 años



---

	“3”= 20 años
Servcont	“0”= el servicio es continuo “1”= el servicio es discontinuo
Tiem	Número de días hasta que se presenta un fallo, o número de días sin presentarse ningún fallo, según corresponda.
Censor	“0”= no se ha presentado el suceso de interés “1”= ocurre el evento de interés

### 5.2.3 Análisis Preliminar

#### 5.2.3.1 Análisis bivariante de los datos

La verificación de la hipótesis de normalidad, resulta esencial para poder aplicar varios de los procedimientos estadísticos, que habitualmente se manejan. La simple exploración visual de los datos observados, mediante por ejemplo: un histograma o un diagrama de cajas. Podrá ayudarnos a decidir si es razonable o no, el considerar si proceden de una distribución normal característica.

Resulta obvio que este tipo de estudio, no puede llevarnos sino a obtener una opinión meramente subjetiva, acerca de la posible distribución de nuestros datos, y que es necesario disponer de otros métodos más rigurosos, para contrastar este tipo de hipótesis. En primer lugar, debemos plantearnos el saber si los datos se distribuyen de una forma simétrica, con respecto a su media o presentan algún grado de asimetría. Aunque la simetría de la distribución pueda valorarse, de modo simple, atendiendo a algunas medidas descriptivas de la variable en cuestión (comparando por ejemplo, los valores de media, mediana y moda), resultará útil disponer de algún índice, que nos permita cuantificar cualquier desviación.

En los gráficos P-P se confrontan las proporciones acumuladas de una variable, con las de una distribución normal. Los gráficos Q-Q se obtienen de modo análogo, esta vez representando los cuantiles, respecto a los cuantiles de la distribución normal. Además de permitir valorar la desviación de la normalidad, los gráficos de probabilidad permiten conocer la causa de esa desviación. Una curva en forma de "U" o con alguna curvatura, como en el caso de la edad en la figura 7.12, significa que la distribución es asimétrica con respecto a la gaussiana, mientras que un gráfico en forma de "S" significará que la distribución tiene colas mayores o menores que la normal, esto es, que existen pocas o demasiadas observaciones en las colas de la distribución

En un análisis de datos, es conveniente realizar un análisis bivariante antes de proceder a estructurar cualesquier modelo. Un análisis bivariante nos auxilia a explorar cada una de las variables en los fallos del conjunto de datos, separadamente. La inspección de la distribución de las variables es sumamente importante, cuando se utiliza la generalización del modelo de regresión lineal, de tal forma que la variable dependiente, cuya distribución puede seguir varios grupos de la familia de la distribución



---

exponencial. Por ejemplo; nosotros consideramos el número de fallos en las tuberías de distribución de agua, que ocurren en un cierto intervalo de tiempo.

Los resultados del test de normalidad para todas las variables, que dieron evidencias que algunos de los indicadores no tienen distribución normal, con la mayoría de una asimetría positiva. Ligera desviación de la normalidad típica, no suele tener un efecto significativo sobre el análisis estadístico. Como primera mejora, se han realizado la transformación de los datos usando  $\log(10)$  de los valores indicadores, en orden de reducir al mínimo la asimetría y producir una distribución normalizada de los datos.

Para determinar así una distribución teórica, se ajusta a los datos observados, utilizamos la gráfica Probabilidad-Probabilidad ó ( P - P ). En esta gráfica, se observa la función de distribución acumulada, contra una función de distribución acumulada teórica, con el fin de evaluar el ajuste de la distribución teórica a los datos observados, debe ser aproximadamente lineal la distribución específica si el modelo es correcto.

Por ejemplo, los logaritmos de la longitud de las tuberías de distribución, cae cercanamente a lo largo de casi una línea en esta gráfica, y nosotros inferimos que ellas son bien modeladas como una distribución normal, pero la longitud no se aproxima a una línea recta en esta gráfica, en los extremos de los datos hay alguna desviación de la línea de ajuste, como una forma de S a lo largo de la línea diagonal (fig 7.11).

Así nosotros inferimos, que ellos son pobremente modelados como una distribución normal. Otra variable, como la edad sigue la distribución normal, de esta manera se muestra en la figura 7.12, todos los puntos caen en una línea diagonal (con intercepción 0 y pendiente 1), entonces nosotros no necesitamos transformar los datos y llevarlos a un patrón de distribución normal. La edad de las tuberías de distribución de agua es también la variable, la cual sigue una distribución normal moderada.

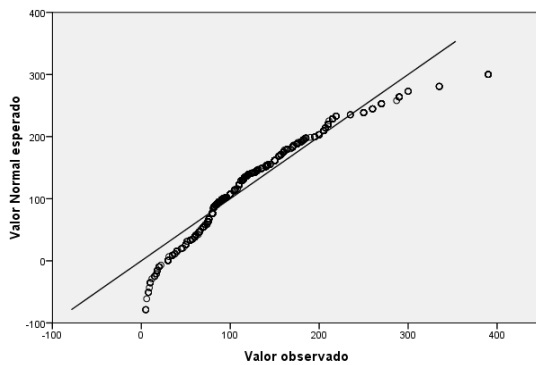


Figura 7. 10 Grafico de probabilidad normal de la longitud

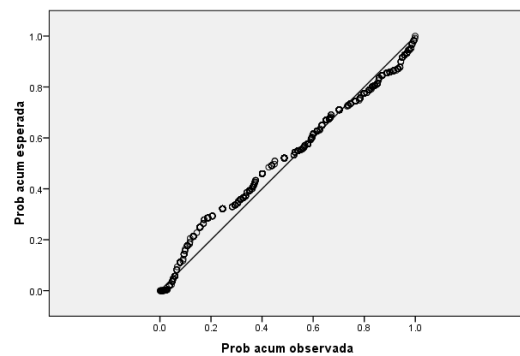


Figura 7. 11 Grafico P-P del lnlong

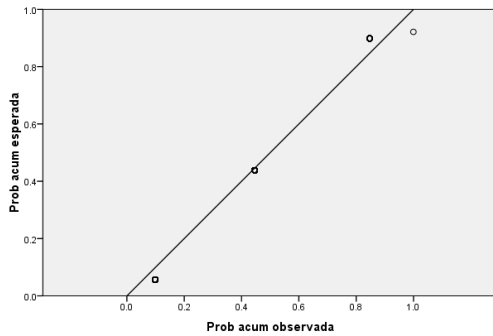


Figura 7. 12 Grafico P-P de la edad

### 5.2.3.2 Verificación de la hipótesis de proporcionalidad y estratificación resultante

Se puede realizar un trazado grafico, para verificar que se cumple la condición de proporcionalidad, de un modelo de riesgo proporcional, usando la función de riesgo acumulado  $H(t)$ .

$$H(t, x_i) = \int_0^t h(u) du = \int_0^t h_0(u) \exp\left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right) du = \exp\left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right) \int_0^t h_0(u) du \quad (7.32)$$

Como se realizo anteriormente, se asume que las tuberías están sujetas a un factor de riesgo  $x_i$ , el valor de  $x_i$  para la tubería A es  $x_{i0}$  y  $x_{i1}$  para la tubería B, el índice de riesgo acumulado de la tubería B versus la tubería A es.

$$\frac{H(t, x_{i1})}{H(t, x_{i0})} = \frac{\exp(\beta_1 x_{i1})}{\exp(\beta_1 x_{i0})} = \exp \beta_1 (x_{i1} - x_{i0}), \text{ La cual es una constante que será llamada } K. \quad (7.33)$$

$$\ln \frac{H(t, x_{i1})}{H(t, x_{i0})} = \beta_1 (x_{i1} - x_{i0}) = \ln K \quad \text{ó} \quad (7.34)$$

$$\ln H(t, x_{i1}) - \ln H(t, x_{i0}) = \ln K = K' \text{ otra constante.} \quad (7.35)$$

Si la diferencia entre dos funciones es constante, independientemente de la variable  $t$ , las dos curvas que representan estas funciones siguen siendo paralelas.

Fue previamente mostrado que  $H(t) = -\ln S(t)$  o  $\ln H(t) = \ln[-\ln(S(t))]$ . Esto indica que la curva  $H(t)$ , puede ser trazada si la curva  $S(t)$  es conocida. Cada factor de riesgo puede tomar varios valores; es generada una curva de supervivencia para cada valor. Si todos los valores de un factor de riesgo  $\ln[-\ln(S(t))]$ , genera curvas que son paralelas, por lo tanto es posible concluir, que el conjunto de datos puede ser modelado con un modelo de riesgo proporcional, para este factor de riesgo, si no es el caso, el conjunto de datos tiene que ser dividido para cada uno de los valores, de los factores de riesgo; es decir estratificar los valores.

Estas son aproximaciones aceptables de  $S(t)$ , que pueden ser derivados de los datos observados. El método Kaplan-Meier es uno de los encontrados frecuentemente. Parmar y Machain en “Survival analysis: A practical approach” (Parmar, 1995), uno de los textos mas consultados en el tema, sugieren que ello puede ser calculado como sigue:

$$S(t) = \Pr(T > t) \tag{7.36}$$

Donde  $S(t)$ , es la probabilidad que un individuo sobreviva (no le ocurra el evento de interés) mas que el tiempo  $t$ .

Si  $t$  es una variable discreta (por ejemplo días), la probabilidad de que un individuo este aun vivo después de  $t$  días, es la probabilidad que ello sobreviva mas que  $t-1$  días, multiplicado por la probabilidad que ello sobreviva el  $t$ ésimo día, Esto también puede ser considerado, como el producto de las  $n$  probabilidades de sobrevivir cada día entre 1 y  $n$ .

$$S(t) = S(t-1)p(t) = \prod_{i=1}^n p(t) \quad \text{con } t = 1, \dots, n \tag{7.37}$$

O escrito de la siguiente manera.

$$S(t) = \prod_{t_i \leq t} \frac{r(t_i) - d(t_i)}{r(t_i)} \tag{7.38}$$

Donde  $p(t)$  es la probabilidad de sobrevivencia para cada periodo de tiempo,  $r(t_i)$ ,  $d(t_i)$  son el número de individuos en riesgo y el número de muertes respectivamente (o de ocurrencia del evento de interés) en el momento  $t_i$ .

La varianza del estimador de Kaplan – Meier, se obtiene a través de la formula de Greenwood (1926):

$$V(S(t)) = S^2(t) \sum_{t_i \leq t} \frac{d(t_i)}{r(t_i)[r(t_i) - d(t_i)]} \tag{7.39}$$

El intervalo de confianza del 95% de escala plana (o de identidad), llamado así porque es obtenido de manera estándar, al que se obtiene cualquiera de los intervalos de confianza, sin utilizar ninguna transformación se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$S(t) \pm 1.96ee(S(t)) \tag{7.40}$$

Donde  $ee(S(t))$ , es el error estándar de estimación del estimador de Kaplan – Meier.

El siguiente ejemplo ilustra esquemáticamente, acerca de la formula mencionada con una población de 1685 tuberías. Estas tuberías al final de cada periodo pueden sufrir un fallo (morir), sobrevivir o ser removida de la población, sin haber tenido un fallo o haber sobrevivido (censura derecha).  $S(t)$  puede derivar en una manera similar, hasta el día  $n$  y  $H(t)$  o  $\ln[-\ln S(t)]$  puede ser subsecuentemente calculada, y graficada para cada

valor de cada variable. Se utiliza el método de Kaplan-Meier para obtener las curvas  $H(t)$  o  $\ln[-\ln S(t)]$ .

Tiempo de supervivencia	Numero de tub. al inicio de $t = nt$	Numero de tub. que fallan durante $t = dt$	Numero de tub. removidas del conjunto durante $t = ct$ (censurado)	Numero de tub. En el rango de $t. nt - dt - ct$	$p(t) = (nt-dt)/nt$	$S(t)$
1	1686	0	0	1686	$1686/1686=1$	1
2	1686	3	0	1683	$1683/1686=0.997$	$1*0.997=0.997$
3	1683	0	8	1675	$1183/1183=1$	$1*0.997*1=0.997$
4	1675	5	3	1667	$1667/1675=0.995$	$1*0.997*0.997*0.995=0.996$

Tabla 7. 6 Calculo de la aproximación de  $S(t)$  de Kaplan-Meier

Basado en la representación grafica, ello determina que para el caso de estudio de la ciudad de Celaya, todas las variables verifican la hipótesis de proporcionalidad; esto se demuestra como lo mencionamos con los gráficos. Los cuales en términos de las probabilidades de supervivencia, las curvas de riesgo acumulado de un grupo se encuentran unas encima de las otras, no se cruzan y son paralelas entre ellas. Por lo cual se cumple la hipótesis de proporcionalidad, el tiempo es en días, las figuras 7.13 - 7.16 muestran los resultados para las variables de la edad, material, longitud y tráfico respectivamente.

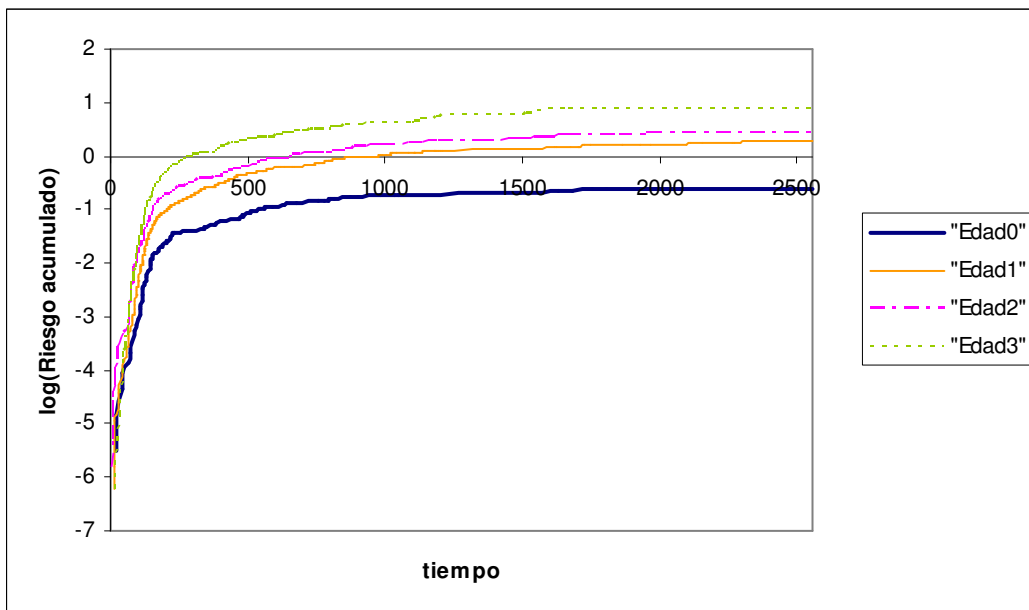


Figura 7. 13  $\ln H(t)$  para la edad.

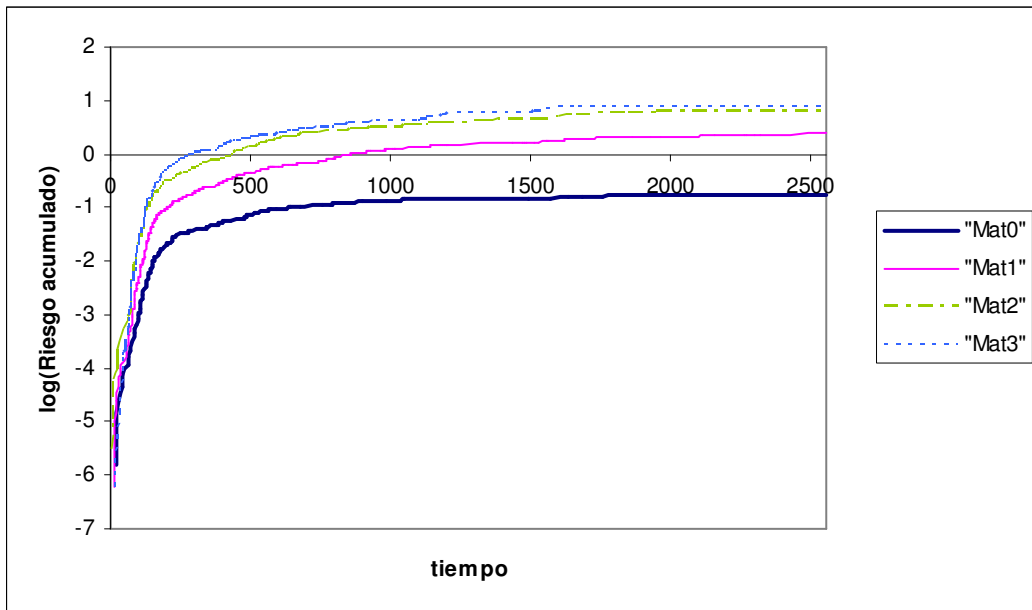


Figura 7. 14  $\ln H(t)$  para el material.

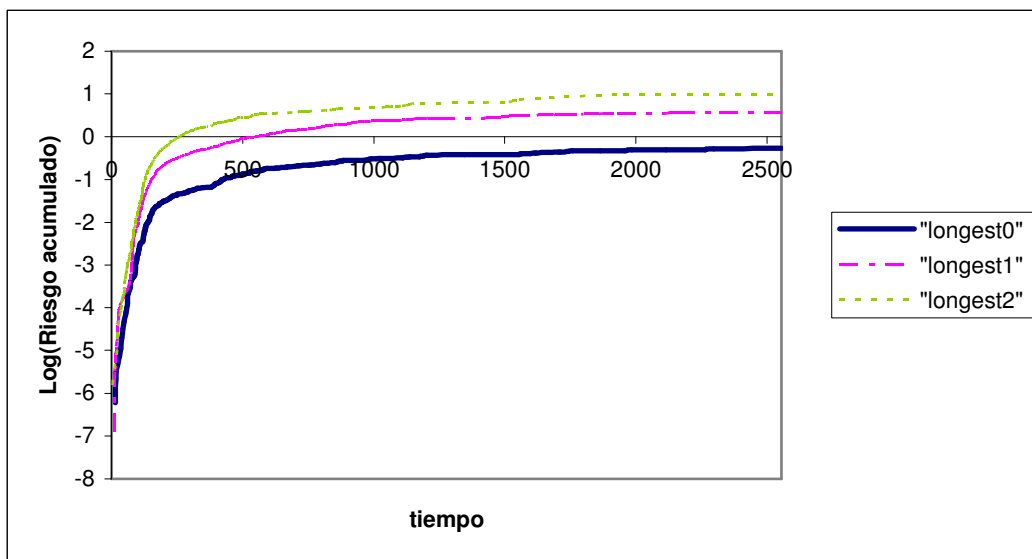


Figura 7. 15  $\ln H(t)$  para la variable longitud por estrato

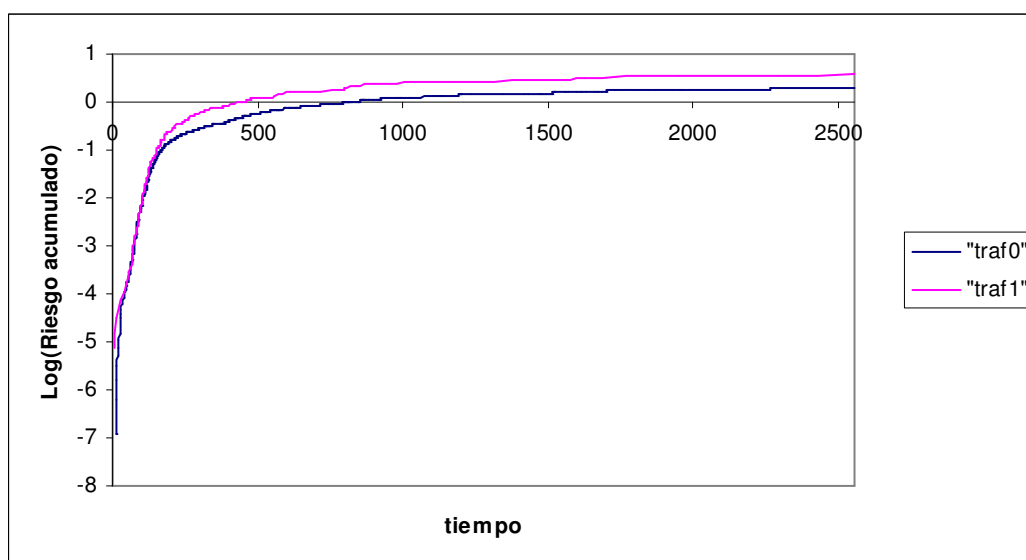


Figura 7. 16  $\ln H(t)$  para la variable trafico.

#### 5.2.4 Descripción estadística de las tuberías.

La información relativa a las tuberías de los individuos estadísticos, es señalada en la tabla 7.7, que reagrupa todos los resultados que se aplican a las tuberías y sus roturas.

La tabla 7.7 concentra las variables específicas de las tuberías (diámetro, edad, material).

		Longitud promedio	A NTS por categoría	B %tub NTS A/1686*100	C longitud total de tub. Por categoría (m)	D % longitud
<b>Diámetro</b>	75 a 100 mm	141.38	1172	69.51	168583	69.64
	150 mm	125.71	242	14.35	39965	16.51
	200-300 mm	124.32	272	16.13	33513	13.84
	<b>total</b>	<b>130</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100</b>
<b>Edad</b>	20	190	484	28.71	92188	38.08
	30	112	237	14.06	26454	10.93
	40	117	526	31.20	61608	25.45
	50	139	439	26.04	61811	25.54
	<b>total</b>	<b>123</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>
<b>Material</b>	AC	112	315	18.68	35236	14.56
	FOFO	143	271	16.07	38780	16.02
	FOGA	122	616	36.54	75857	31.34
	POLIET	190	484	28.71	92188	38.08
	<b>total</b>	<b>126</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>

Tabla 7. 7 Descripción estadística de las tuberías.

La zona de estudio tiene 242.061 m.l de tubería, que a su vez se han derivado en 1.686 tuberías estadísticas. Si las categorías son analizadas, basadas en el número de tuberías estadísticas o en su longitud, esto variara ligeramente en términos de sus respectivos

porcentajes (B y D); esto indica que el promedio de la longitud de los individuos estadísticos de una categoría, varía ligeramente de la longitud promedio total.

Aproximadamente un 70% de la longitud total y del número de tuberías, tienen un diámetro entre 75 y 100 mms, el resto varía aproximadamente un 5% entre ellos. Un 15% de la longitud total cuenta con 30 años de edad, un 30% tiene 40 años y por último las tuberías más antiguas representan el 25% de la longitud total, con 50 años de antigüedad. Respecto al material el 38% de la longitud es de polietileno, seguido por las tuberías de acero galvanizado (29%), y del resto es muy similar el porcentaje entre la longitud de las tuberías de asbesto cemento y fundición.

Por otro lado, es conveniente comentar que las reparaciones que se han realizado, son hechas con tubería del mismo diámetro que la tubería dañada y de material de PVC.

En la tabla 7.8, se muestran las estadísticas de las variables del entorno en las inmediaciones de las tuberías, donde tienen una distribución consistente, podemos comentar que el porcentaje de A y B tienen el mismo orden de magnitud.

		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
		<b>Número de tub. estadísticas por categoría (A)</b>	<b>Porcentaje de (A)</b>	<b>Longitud total de las tub. por categoría (m)</b>	<b>Porcentaje de (C)</b>
<b>traf</b>	moderado	1508	89.44	208191	86.01
	alto	178	10.56	33870	13.99
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>
<b>canprox</b>	existen	236	13.95	40559	16.76
	no existen	1450	86.05	201502	83.24
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>
<b>tiposuelo</b>	relleno exterior	86	4.93	13019	5.38
	nativo	1602	95.07	229042	94.62
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>
<b>relleno</b>	material banco	1231	73.00	168455	69.59
	no adecuado	455	27.00	73606	30.41
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>
<b>profundidad</b>	dentro norma tec.	1375	81.54	201966	83.44
	fuera norma tec.	311	18.46	40095	16.56
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>100.00</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>

*Tabla 7. 8 Descripción estadística de las tuberías, variables específicas del entorno.*

De los siguientes resultados, podemos observar que aproximadamente el 14% de las tuberías, cuentan con tráfico alto, y un gran porcentaje cuentan con un tráfico moderado. Del factor de las canalizaciones próximas, un porcentaje alto (83%) de las tuberías, no se encuentran próximas a canalizaciones de otros servicios subterráneos; respecto al tipo de suelo se ha encontrado, que un porcentaje muy bajo de las tuberías aproximadamente el 5%, se localizan en una zona de material de relleno exterior, es decir; de material no nativo de la zona y por consecuencia, la calidad del mismo no es tan satisfactoria como se requiere, al momento de realizar las excavaciones.

Afortunadamente la mayoría de las tuberías (95%), se encuentran dentro de una zona estable respecto a la excavación, dependiendo la estabilidad de la excavación del

complemento de otros factores. En relación al factor del relleno, se ha encontrado que prácticamente una cuarta parte de las tuberías, no cuentan con el material de relleno adecuado. Lo mismo sucede con la profundidad donde el porcentaje es del 16.56, los cuales son muy próximos. Por tal motivo será interesante en un análisis posterior, determinar si la relación en ambos factores, posee el mismo impacto en el deterioro de las tuberías.

### 5.2.5 Descripción estadística de las roturas

En el periodo de evaluación han ocurrido 1.149 roturas entre las tuberías estadísticas, dentro de las 294 tuberías físicas que se consideran, de las cuales como ya se ha mencionado, se derivan 1686 segmentos de tuberías estadísticas. Las tuberías físicas mencionadas, cuentan algunas desde cero roturas, hasta más de nueve roturas. Observaremos en la siguiente grafica, que no existe una tendencia notable, en el patrón del número de roturas en las tuberías por año, cabe mencionar que el periodo de observación es corto, por tal motivo, es demasiado aventurado señalar alguna tendencia. Pero para nuestro propósito, es conveniente analizar algunos comportamientos de las mismas.

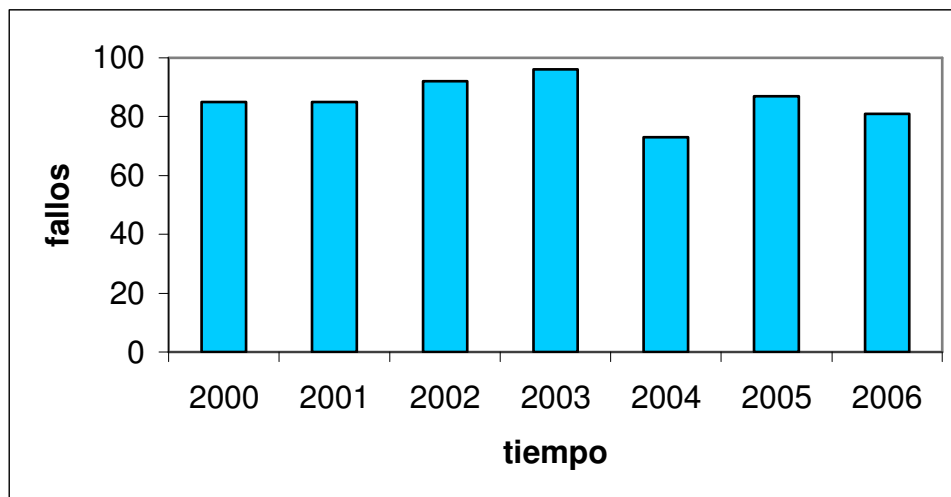


Figura 7. 17 Grafica del número de fallos por año

Cero roturas observadas entre el año 2000 y el año 2006.

530 (1685-1155) segmentos estadísticos, que registraron ninguna rotura entre el periodo señalado.

Durante el periodo de observación (2000 – 2006), se han observado 26 tuberías que experimentaron solo una rotura, esto representa aproximadamente el 8% del total de las tuberías.

⇒ Dos fallos observados entre 2000 y 2006: 35 tuberías presentaron dos fallos, el tiempo promedio entre los fallos son:

- 2000 y el primer fallo el tiempo es de 878,06 días
- El tiempo entre el primer y segundo fallo es de 651,82 días



- Entre el segundo fallo y el año 2006 es de 1019,77 días
- ⇒ Tres fallos observados entre 2000 y 2006: 26 tuberías con tres fallos, por lo tanto el tiempo promedio entre los fallos son:
- 2000 y el primer fallo es de 743,01 días
  - Entre el primer y segundo fallo el tiempo promedio es de 472,52 días
  - Para el segundo y tercer fallo el tiempo promedio es de 442,19 días
  - Entre el tercer fallo y el año 2006 es de 870,33 días
- ⇒ Cuatro fallos observados entre 2000 y 2006: 23 tuberías con cuatro fallos, el tiempo promedio entre los fallos son:
- 2000 y el primer fallo es de 551,57 días
  - Entre el primer y segundo fallo el tiempo promedio es de 401,57
  - Para el segundo y tercer fallo el tiempo promedio es de 466,86 días
  - Entre el tercer fallo y el tercer fallo es de 313,45 días
  - Entre el cuarto fallo y el año 2006 es de 804,14 días

Y así sucesivamente, los resultados completos se presentan en la tabla siguiente:

Numero de roturas	2000 y la 1 <sup>er</sup> rotura	1 <sup>ra</sup> y 2 <sup>da</sup> rotura	2 <sup>da</sup> y 3 <sup>er</sup> rotura	3 <sup>ra</sup> y 4 <sup>ta</sup> rotura	4 <sup>ta</sup> y 5 <sup>ta</sup> rotura	5 <sup>ta</sup> y 6 <sup>ta</sup> rotura	6 <sup>ta</sup> y 7 <sup>ta</sup> rotura	7 <sup>ta</sup> y 8 <sup>ta</sup> rotura	8 <sup>ta</sup> y 9 <sup>na</sup> rotura	Ultima rotura y 2006
1	894.21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1660.79
2	878.05	651.80	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1025.15
3	743.10	472.52	442.19	NA	NA	NA	NA	NA	NA	897.19
4	553.57	401.57	466.86	328.86	NA	NA	NA	NA	NA	804.14
5	356.24	503.59	506.77	413.82	365.40	NA	NA	NA	NA	409.18
6	423.00	462.36	226.55	392.55	204.64	364.09	NA	NA	NA	481.82
7	308.56	444.58	352.94	284.06	320.25	248.59	224.44	NA	NA	371.58
8	459.78	351.08	189.56	279.92	248.04	321.45	167.12	203.45	NA	334.60
9 ó mas	389.45	324.21	340.67	256.48	146.89	201.43	264.25	194.52	213.56	223.54

*Tabla 7. 9 Tiempo promedio observado entre roturas dependiendo del número de roturas.*

La distribución del material con respecto al número de roturas, se muestra en la tabla 7.10, donde se representa el porcentaje de cada uno del tipo de material.

Respecto a los resultados de la tabla 7.10, se pueden interpretar como: por ejemplo, mientras que el 14,56% de las tuberías son de asbesto cemento, el 13,15% de las tuberías que sufren roturas son de asbesto cemento; el 17% de las tuberías sufren dos roturas que es el porcentaje más alto en cuanto a roturas se refiere, de los cuales el 59% corresponde las tuberías de polietileno.

Todas las tuberías han sufrido varias roturas, destacando precisamente como un mayor porcentaje, las tuberías de polietileno que han sufrido más de nueve roturas en

promedio. Cabe mencionar que las tuberías de acero galvanizado representan el 31,34%, del total de las tuberías y ocurren en ellas el 46% de las roturas.

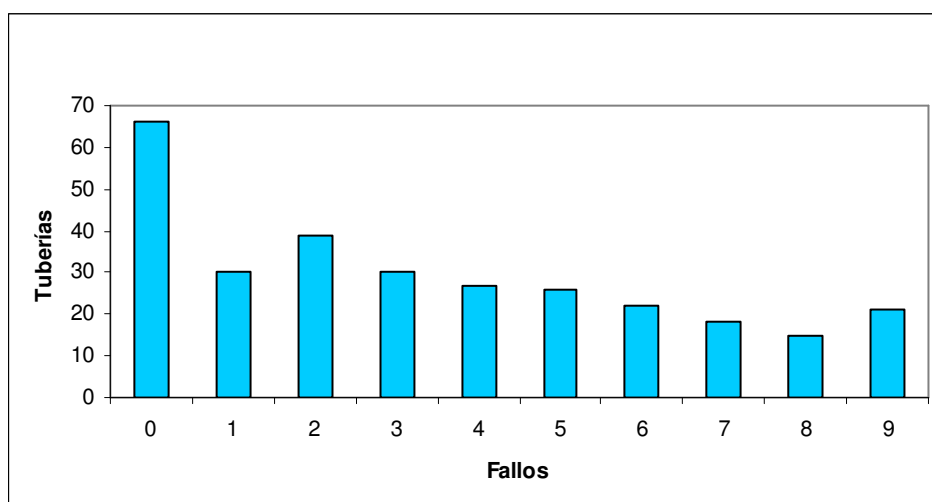
Como observamos en la tabla 7.9, el tiempo de reparación entre cada rotura tiende a disminuir, cuando el número de roturas se incrementa, excepto en algunas roturas. Lo importante de esto, es que podremos aventurarnos en contemplar la posibilidad de un cambio en la práctica de reparación, donde podrá tener un efecto significativo en prolongar el tiempo de reparación, considero que es un punto, en el cual se debe prestar una importante atención; tanto en la obtención de datos, como la preparación de la base de datos, misma que se podrá utilizar para un trabajo posterior.

Nos referimos a la obtención de datos, como una explicación detallada, en cuanto al tipo de rotura y otros aspectos que se consideren relevantes, aspectos que nos permitan evaluar, si la intervención en la práctica de reparación contribuye a disminuir el tiempo entre roturas.

Rotura	Material								Total
	AC ( 13.15%)		FOGA ( 46.49%)		FOFO ( 17.11 % )		POLIETILENO (22.81%)		
1	3	0.01	18	0.08	5	0.02	4	0.02	30.00
2	4	0.02	23	0.10	8	0.04	4	0.02	39.00
3	3	0.01	16	0.07	5	0.02	6	0.03	30.00
4	4	0.02	12	0.05	2	0.01	9	0.04	27.00
5	4	0.02	13	0.06	5	0.02	4	0.02	26.00
6	6	0.03	7	0.03	4	0.02	5	0.02	22.00
7	4	0.02	7	0.03	3	0.01	4	0.02	18.00
8	0	0.00	7	0.03	4	0.02	4	0.02	15.00
9 ó mas	2	0.01	3	0.01	4	0.02	12	0.05	21.00
	30	0.13	106	0.46	40	0.18	52	0.23	228.00

*Tabla 7. 10 Número de tuberías de la misma categoría que se rompen, basado en el material y el número de roturas.*

La distribución del número de fallos, respecto al número de tuberías, también presenta un comportamiento muy variado, donde podemos asumir que no presenta una tendencia notable, el número de fallos respecto al número de tuberías. Lo que es notable es que el 38% del total de las tuberías no sufren ninguna rotura.



*Figura 7. 18 Número de fallos versus tuberías*

### 5.2.6 Descripción estadística de las tuberías y las roturas

Las tablas 7.11 y 7.12 contienen todos los resultados del análisis de la estadística descriptiva. Los valores en **negrita** son los valores promedios, los valores subrayados son los valores menores de cada categoría, los valores que se encuentran en *cursiva* son aquellos valores mas altos. Las tablas son definidas como siguen; un ejemplo es el siguiente:

A = Número de tuberías estadísticas de la misma categoría (NTS); por ejemplo: estas son 1172 tuberías con un diámetro entre 75-100 mm.

B = Longitud de NTS; estos son 168.583 m de tuberías con un diámetro de 75-100 mm.

C = Porcentaje de la longitud de NTS sobre la longitud total de tuberías (242.061); las tuberías de 75-100 mm de diámetro representan el *69,51%* de la longitud total.

D = longitud promedio de NTS; las tuberías de 75-100 de diámetro tienen una longitud promedio de 130,00 m.

E = Número de roturas entre 2000 y 2006 para NTS; tuberías de 75-100 mm de diámetro se rompen 788 veces entre 2000 y 2006.

F = Número de tuberías en la misma categoría que sufren una rotura entre 2000 y 2006; estas son 157 tuberías con un diámetro de 75-100 mm que tienen una rotura entre 2000 y 2006.

G = longitud de las tuberías entre 2000 y 2006; 22.800 m de tuberías con un diámetro de 75-100 mm sufren roturas entre 2000 y 2006.

H = Porcentaje de las tuberías sobre la longitud total; tuberías de 75-100 mm de diámetro que sufren roturas representan el *70,41* de la longitud total.

I = Número de roturas por km. por año por (NTS); tuberías con un diámetro de 75-100 mm que experimentan un índice de roturas de 0,67 por kilómetro y año.

J = Número de roturas por 100 tuberías estadísticas entre 2000 y 2006; entre 2000 y 2006, 100 tuberías estadísticas con 75-100 de diámetro experimentan 67,24 roturas.

		A NTS por categoría	B Longitud de las NTS	C %tub NTS A/1202*100	D Longitud promedio NTS	E Número de roturas de NTS	F Número de tuberías con roturas	G longitud de las tuberías	H % de long. de las tub. sobre el tot.	I Número de roturas por km. y año	J Núm. de roturas por NTS
Diámetro	75 a 100 mm	1172	168583	69.51	141.38	788	157	22800	70.41	0.67	<u>67.24</u>
	150 mm	242	39965	14.35	125.71	174	29	4789	14.79	0.62	<u>71.90</u>
	200-300 mm	272	33513	16.13	124.32	187	42	4791	14.80	0.80	<u>68.75</u>
	<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>130.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>32380</b>	<b>100</b>	<b>0.70</b>	<b>69.30</b>
Edad	20	484	92188	28.71	190.00	411	63	11706	36.15	0.64	<u>0.85</u>
	30	237	26454	14.06	112.00	97	62	2845	8.79	0.52	<u>0.41</u>
	40	526	61608	31.20	117.00	325	21	9598	29.64	0.75	<u>0.62</u>
	50	439	61811	26.04	139.00	316	82	8231	25.42	0.73	<u>0.72</u>
<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>123.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>32380</b>	<b>100.00</b>	<b>0.66</b>	<b>0.58</b>	
Material	AC	315	35236	18.68	112.00	110	23	3165	9.77	0.45	<u>0.35</u>
	FOFO	271	38780	16.07	143.00	210	104	12595	38.90	0.77	<u>0.77</u>
	FOGA	616	75857	36.54	122.00	418	39	4914	15.18	0.79	<u>0.68</u>
	POLIETILENO	484	92188	28.71	190.00	411	62	11706	36.15	0.64	<u>0.85</u>
<b>total</b>	<b>1686</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>126.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>32380</b>	<b>100.00</b>	<b>0.66</b>	<b>0.60</b>	
Traf	moderado	1507	208191	89.44	161.00	1007	205	32468	84.58	0.69	<u>0.67</u>
	alto	178	33870	10.56	189.00	142	23	5921	15.42	0.60	<u>0.80</u>
	<b>total</b>	<b>1685</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>175.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>38389</b>	<b>100.00</b>	<b>0.64</b>	<b>0.73</b>
Canprox	existen	235	40559	13.95	166.00	979	195	6877	17.91	3.45	<u>4.17</u>
	no existen	1450	201502	86.05	172.00	170	33	31512	82.09	0.12	<u>0.12</u>
	<b>total</b>	<b>1685</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>169.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>38389</b>	<b>100.00</b>	<b>1.78</b>	<b>2.14</b>
Tiposuelo	relleno exterior	83	13019	4.93	150.00	997	15	2573	6.70	10.94	<u>12.01</u>
	nativo	1602	229042	95.07	156.00	152	213	35816	110.61	0.09	<u>0.09</u>
	<b>total</b>	<b>1685</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>153.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>38389</b>	<b>117.31</b>	<b>5.52</b>	<b>6.05</b>
Relleno	material banco	1230	168455	73.00	136.00	970	163	28308	73.74	0.82	<u>0.79</u>
	no adecuado	455	73606	27.00	161.00	179	65	10081	31.13	0.35	<u>0.39</u>
	<b>total</b>	<b>1685</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>148.50</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>38389</b>	<b>104.87</b>	<b>0.59</b>	<b>0.59</b>
Profundidad	dentro norma tec.	1374	201966	81.54	146.00	761	168	30266	78.84	0.54	<u>0.55</u>
	fuera norma tec.	311	40095	18.46	128.00	388	60	8123	25.09	1.38	<u>1.25</u>
	<b>total</b>	<b>1685</b>	<b>242061</b>	<b>100.00</b>	<b>137.00</b>	<b>1149</b>	<b>228</b>	<b>38389</b>	<b>103.93</b>	<b>0.96</b>	<b>0.90</b>

Tabla 7. 11 Descripción estadística de las tuberías

Sobre el índice de roturas promedio que es de 0,70 roturas por km., por año. En la tabla 7.11, las tuberías fueron clasificadas en base a su diámetro, edad, material, al trafico, canalizaciones próximas, tipo de suelo, tipo de relleno y la profundidad, así mismo se calcularon dos índices.

I = Número de roturas por km. y año, para las tuberías que pertenecen a una misma categoría del factor de riesgo (indicador 1).

Este indicador se puede considerar como uno de los indicadores más comunes, calculados por las empresas de agua, es importante mencionar que anteriormente se había obtenido este mismo indicador, en este sector y otros sectores de la red de la ciudad de Celaya. Pero para un periodo de tiempo más amplio, en este análisis se descartaron algunos datos, que no se encontraban muy claros, lo cual influye en el cambio de los valores.

Es conveniente contar con las precauciones necesarias, cuando se comparan los índices de rotura entre las diversas empresas de agua, ya que la definición de lo que constituye

---

---

una rotura, puede variar de una empresa a otra. Este índice de roturas es equivalente al valor promedio de  $h(t)$ , del periodo de observación.

J = Número de roturas por 100 tuberías, pertenecientes a una misma categoría del factor de riesgo, para un cierto periodo de observación (indicador 2).

Este indicador expresa la idea de la ocurrencia de fallo, y es introducido para reflejar la variable de interés en el Modelo de Riesgo Proporcional, el tiempo de supervivencia/fallo, el cual también varía con la ocurrencia de roturas, independientemente de la longitud del segmento. Se puede decir que el factor de riesgo que muestra significancia en algunos subgrupos, porque la longitud promedio de este subgrupo es actualmente más corta, que el resto de la longitud promedio. No continuarán mostrando significancia con este segundo indicador (y con un PHM).

Los análisis de los resultados significativos de las tablas 7.9 y 7.10, nos ofrecen aquí una variable a la vez. Estos análisis son necesarios para determinar en qué forma (continua, binaria, logarítmica, o reagrupada por clase), cada variable debe ser organizada para el modelo.

*Diámetro:* la mayoría de las tuberías son de diámetro pequeño (menor que 100 mm) y contrario a lo que se esperaba, son las de menor índice de fugas, así como con las tuberías de longitud promedio mayor, al igual que en conjunto. Respecto al mayor riesgo de rotura, de diámetro mayor, puede ser debido al tipo de material y a la edad.

*Edad:* las tablas 7.11 y 7.12 muestran claramente que las tuberías de asbesto cemento y acero galvanizado, no muestran una tendencia lineal entre la edad de envejecimiento y el riesgo alto de fallo. Esto nos puede indicar, que son varios los factores que influyen en esta variable, y que a su vez provocan un comportamiento indistinto a lo que se pudiera esperar.

*Material:* nos encontramos en este factor, que el material que tiene un peor comportamiento es el de Polietileno, es interesante analizar este dato, debido a que son las tuberías de menor edad. Pero como se he detectado en otros estudios, la instalación de dichas tuberías no fue la más adecuada.

*Tráfico:* definitivamente los resultados obtenidos en la tabla 7.11, nos indican lo que se esperaba, que las tuberías localizadas en una zona donde el tráfico es moderado, tienden a tener un menor índice de rotura.

Respecto al resto de los demás factores, continúan con el mismo comportamiento esperado; es decir, condiciones menos favorables es mayor el índice de roturas, por ejemplo las tuberías que se localizan próximas a los demás servicios subterráneos

**AC**

Edad	Diámetro	Número de NTS	Número de tuberías con roturas 2000-2006	Longitud de las tuberías	Número de roturas de NTS	Número de roturas por km y año
<b>30</b>	75 a 100 mm	201	16	22403	65	0.41
	150 mm	8	1	1480	7	0.68
	200-300 mm	28	4	2571	20	<u>1.11</u>
<b>total</b>		<b>237</b>	<b>21</b>	<b>26454</b>	<b>92</b>	<b>0.50</b>
<b>40</b>	75 a 100 mm	56	2	7083	18	<u>0.36</u>
	150 mm	6	0	519	0	0.00
	200-300 mm	15	0	1180	0	0.00
<b>total</b>		<b>77</b>	<b>2</b>	<b>8782</b>	<b>18</b>	<b>0.29</b>

**FOGA**

Edad	Diámetro	Número de NTS	Número de tuberías con roturas 2000-2006	Longitud de NTS	Número de roturas de NTS	Número de roturas por km y año
<b>40</b>	75 a 100 mm	223	42	25251	149	0.84
	150 mm	40	7	4364	18	0.59
	200-300 mm	185	31	23211	142	<u>0.87</u>
<b>total</b>		<b>448</b>	<b>80</b>	<b>52826</b>	<b>309</b>	<b>0.84</b>
<b>50</b>	75 a 100 mm	100	17	12560	66	<u>0.75</u>
	150 mm	58	6	8262	35	0.61
	200-300 mm	10	1	2209	8	0.52
<b>total</b>		<b>168</b>	<b>24</b>	<b>23031</b>	<b>109</b>	<b>0.68</b>

**FOFO**

Edad	Diámetro	Número de NTS	Número de tuberías con roturas 2000-2006	Longitud de NTS	Número de roturas de NTS	Número de roturas por km y año
<b>50</b>	75 a 100 mm	179	26	24855	142	<u>0.82</u>
	150 mm	72	9	11735	58	0.71
	200-300 mm	20	4	2190	10	0.65
<b>total</b>		<b>271</b>	<b>39</b>	<b>38780</b>	<b>210</b>	<b>0.77</b>

**POLIETILENO**

Edad	Diámetro	Número de NTS	Número de tuberías con roturas 2000-2006	Longitud de NTS	Número de roturas de NTS	Número de roturas por km y año
<b>20</b>	75 a 100 mm	413	26	76291	357	<u>0.67</u>
	150 mm	58	9	13675	46	0.48
	200-300 mm	13	4	2222	7	0.45
<b>total</b>		<b>484</b>	<b>39</b>	<b>92188</b>	<b>410</b>	<b>0.64</b>

*Tabla 7. 12 Descripción estadística de las tuberías por material y edad*

Los resultados de la tabla 7.12 que se deben de considerar, son aquellos valores considerados altos, por ejemplo en las tuberías de Asbesto Cemento de 30 años de antigüedad, las tuberías de mayor diámetro, son las que cuentan con un índice mayor de roturas por kilómetro y año. Caso contrario con las tuberías de asbesto cemento de 40 años de edad, en las cuales como es de esperarse, el índice de roturas es mayor en las tuberías de menor diámetro.

---

---

## 6 Caso de Estudio

Ahora realizaremos la conformación y la ejecución de los modelos, un paso importante en la construcción de un modelo de riesgo proporcional, que es nuestro caso. Es la elección de cuales variables se deben de incluir en el modelo y cuáles no. Existen diferentes estrategias sistemáticas, para la elección de variables a incluir en los modelos que se van a evaluar, hay distintos métodos siendo los métodos “paso a paso” (stepwise), los métodos que están más ampliamente recomendados en los estudios predictivos. Estos métodos consisten en ir calculando los valores de los coeficientes ( $\beta_i$ ), según se van cambiando una a una las variables explicativas del modelo, en cada paso del análisis y al mismo tiempo, cuantificar estadísticamente los cambios que se producen en el ajuste del modelo, como consecuencia de los cambios en las variables y en sus coeficientes.

Estos cambios de las variables del modelo paso a paso, y la evaluación del ajuste que esta conlleva, se puede realizar de diversas maneras. Entre ellas podemos encontrar el método “step-up” o hacia delante, y el método “step-down” o hacia atrás. Para este propósito que es el modelo de riesgo proporcional (PHM) de Cox, por sus siglas en ingles. El método que se utilizara en este trabajo será el de “step-down”, el cual se describe en *varios textos*. Para un estudio detallado puede consultarse los textos de *Machine et al.* (2006), *Kleinbaum et al.* (1998) o *Parmar et al.* (1995), el procedimiento de ajuste “step-down”, es más apropiado cuando el número inicial de variables es alto, como es el caso de este trabajo.

En el método de ajuste, cada variable es primero probada una a una; solo las variables significantes permanecen en el modelo original completo. El supuesto es que si una variable no sostiene una significancia estadística en ella misma, tendrá poca oportunidad de tener cualesquier impacto en el modelo.

Paso 1. El procedimiento “step-down” inicia con el modelo completo (el cual incluye todas las variables que son significativas, cuando se prueban por ellas mismas), ajustando los datos. En orden de determinar si el modelo es una mejora sobre el modelo nulo (el cual no contiene ninguna variable), el likelihood ratio (ratio de verosimilitud) por sus siglas en ingles, y que será la expresión utilizada en adelante. Con una distribución  $X^2$  y los grados de libertad apropiados (igual al número de variables en el modelo considerado), serán considerados en el modelo completo.

Si el p-valor es estadísticamente significativo ( $p < 0.05$ ), esto indica que el modelo completo es una mejora sobre la hipótesis nula, y que el modelo completo puede mantenerse si el p-valor no es significativo. El modelo que debe ser adoptado es el modelo nulo.

Paso 2.- El siguiente paso, es verificar si cualesquiera de las variables del modelo completo, puede ser removida sin la pérdida significativa del ajuste o de información relevante. El objetivo es tener un modelo con pocas variables como sea posible, pero el mejor ajuste posible, en otras palabras, cualesquier variable que no mejore el ajuste es removida. El respectivo ratio de verosimilitud ( $LR$ ) de todas las variables del modelo completo, de cada modelo realizado menos uno ( $LR_{11}$ ), es comparado con el  $LR$  del  $LR_0$  del modelo completo.

---

---

Son calculados los valores de  $LR_0-LR_{11}$ ,  $LR_0-LR_{12}$ , etcétera, y el resultado de p-valor de cada diferencia. Si el p-valor es mayor que el nivel convencional de significancia (0.05), la inclusión de la variable correspondiente, no es considerada como el aporte de información relevante. Por lo tanto, esta variable es removida del modelo. Si todas las diferencias  $LR_0 - LR_{11}$ , resultan ser estadísticamente significantes, el modelo entero es conservado y el proceso de selección es completado. Si varios modelos con el mismo número de variables continúan, el del valor más pequeño es guardado (si los grados de libertad son iguales, sino se realiza nuevamente una prueba en la diferencia de  $LR$ ), el paso 2 es repetido hasta que un modelo es seleccionado.

### 6.1 Significancia del factor de riesgo/ajustando los datos para un modelo de Cox (PHM).

Los modelos son ajustados para varios subgrupos de los datos de roturas, con un historial de 7 años (2000-2006).

Base de datos, todos los individuos

Base de datos estratificados en el material

Base de datos estratificados en el material y el historial de roturas.

Esto resulta en los siguientes estratos:

- ⇒ Todos los individuos sin estratificar
- ⇒ Material acero galvanizado
- ⇒ Material Asbesto cemento-Polietileno
- ⇒ Uno o mas fallos

El test de cada variable sencilla con un modelo de Cox (PHM) en un estrato específico, muestra la relevancia de cada variable en una familia específica de tuberías. El ajuste de los estratos completos de datos para el modelo de Cox, indica la importancia relativa de la selección previa de las variables significativas. Incluso aunque significativo sobre el mismo, algunas variables no pueden aparecer en el modelo, porque su importancia relativa es modesta, comparada a otra variable dominante.

Esto es, porque el paso donde se reviso la significancia estadística, de cada variable sencilla, es más que un paso hacia el ajuste del modelo. Ello actualmente provee información valiosa, que no podrá aparecer en el modelo completo, y puede sin embargo ser usado para los propósitos de prevención. La base de datos (**ver anexo 3**) es importada a Splus como un primer estrato completo; que sirve como proporción para el resto de los otros estratos.





## 6.1.1 Todos los individuos

### 6.1.1.1 Significancia del factor de riesgo

Los resultados de la prueba de cada variable con un modelo de Cox PHM, son presentados en la tabla 7.13.

De los resultados anteriores, mantenemos los que resultan estadísticamente significativos, los cuales se muestran en la tabla 7.13.

Nombre variable	Coefficiente de regresión	Índice de riesgo	Error estándar	p-valor
relleno	0.707	2.03	0.074	1.20E-02
<b>profundidad</b>	<b>0.091</b>	<b>1.1</b>	<b>0.087</b>	<b>2.90E-01</b>
<b>traf</b>	<b>-0.141</b>	<b>0.87</b>	<b>0.117</b>	<b>2.30E-01</b>
canprox	-0.219	0.8	0.105	3.80E-02
<b>tiposuelo</b>	<b>0.037</b>	<b>1.04</b>	<b>0.137</b>	<b>7.80E-01</b>
<b>servcontin</b>	<b>-0.400</b>	<b>0.67</b>	<b>0.174</b>	<b>4.21E-01</b>
nfp1	0.597	1.82	0.097	7.90E-10
nfp2	0.691	2.0	0.118	2.90E-10
nfp3	0.762	2.14	0.115	3.70E-11
nfp4	0.832	2.30	0.103	6.70E-16
lnlong	0.365	1.44	0.115	8.90E-04
lndiam	0.649	1.92	0.234	5.50E-03
diam2	-0.273	0.76	0.163	9.40E-02
diam3	-0.437	0.65	0.278	1.20E-02
edadstrat1	-0.158	0.85	0.129	2.20E-02
edadstrat2	-0.168	0.85	0.055	2.30E-03
edadstrat3	0.340	1.41	1.065	7.50E-02
mat2	-1.167	0.31	0.249	2.90E-06
mat3	-1.124	0.33	4.252	8.00E-02
mat4	0.769	0.86	0.104	1.20E-13
longestrat1	0.133	1.14	0.055	1.40E-02
longestrat2	0.084	1.09	0.042	4.20E-02

**Las variables en negritas no son estadísticamente significativas.**

*Tabla 7. 13 Significancia estadística de cada variable con un PHM de Cox, para la población total*

De los resultados obtenidos en la tabla anterior, se puede comentar lo siguiente. En la variable “mat2” que pertenece a las tuberías de acero galvanizado, es 0.31 veces mas probable de sufrir una rotura que las de asbesto cemento (AC que son el mejor material y el material de referencia para la categorización de la variable “mat”), respecto a las tuberías del material de Polietileno, son 0.33 veces mas probable de sufrir una rotura que las de asbesto cemento, valor muy similar al de las tuberías de acero galvanizado, y

---

---

el que tiene un riesgo mayor de sufrir una rotura, son las tuberías de fundición (FOFO) que es de 0.86.

También otro comentario que podemos hacer de los resultados obtenidos, es respecto al logaritmo de la longitud, cuando se incrementa en una unidad el logaritmo de la longitud ( $\ln(L)$ ), el riesgo de sufrir una rotura es 1.44 veces mayor.

Es conveniente aclarar, antes de realizar un análisis de los resultados anteriores y abordar la significancia de cada factor de riesgo, deben hacerse algunas observaciones con respecto a la potencial dependencia de las variables, y el sesgo que puede mostrar una variable sobre otra. La dependencia de las variables puede ser identificada por la evaluación, ya sea de los coeficientes de regresión, o el índice de riesgo de una variable, que puede estar influenciada por la presencia de otra variable.

En el análisis descriptivo estadístico previo que se realizó, se mostraba que las tuberías de mayor diámetro son de acero galvanizado (FOGA), con lo cual se pudiera presentar algún tipo de sesgo estadístico, por tal motivo; es conveniente analizar conjuntamente las tuberías por el tipo de material y el diámetro, de tal manera que los coeficientes de regresión y los índices de riesgo, se podrán ajustar sustancialmente, así mismo se puede confirmar la dependencia si existiera y corregir su efecto.

Por lo tanto se ejecutara el modelo de riesgo proporcionales de Cox (PHM), para cada tipo de material individualmente y los diferentes diámetros. Una vez que se realizan los análisis correspondientes, estaremos en condiciones de plantear varios escenarios con la confrontación de parejas de variables, o la conjugación de más variables.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
mat2	-1.0139	0.363	0.1077	1.1e-003
mat3	0.4762	1.610	0.0851	1.3e-004
mat4	0.6215	1.862	0.0733	2.2e-008
diam2	-0.0213	0.979	0.0855	8.0e-002
diam3	0.2031	1.225	0.0835	1.5e-002

Rsquare= 0.169 (max possible= 0.999 )  
Likelihood ratio test= 254 on 5 df, p=0.0001248

De los resultados obtenidos, observamos que los coeficientes de regresión y los índices de riesgo, cambian al considerar la interacción entre ambos: el material y el diámetro. Es decir; porque al evaluar de manera global todas las covariables, el modelo nos arroja unos valores de los coeficientes de regresión y los índices de riesgo. Al evaluar estos factores conjuntamente nos arroja otros valores, lo que nos indica es que el material evaluado conjuntamente con el diámetro, cambia el índice de riesgo del modelo. De tal manera que el material interactúa con el diámetro, influyendo en los resultados del modelo.



	coef	exp(coef)	se(coef)	p
materialACdiametro1	-0.742	0.476	0.393	0.0590
materialFOFOdiametro1	0.849	2.338	0.387	0.0280
materialFOGAdiametro1	0.321	1.378	0.384	0.4000
materialPOLIETdiametro1	1.057	2.878	0.382	0.0057
materialACdiametro2	-0.123	0.884	0.535	0.8200
materialFOFOdiametro2	1.008	2.739	0.400	0.0120
materialFOGAdiametro2	0.193	1.212	0.400	0.6300
materialPOLIETdiametro2	0.916	2.500	0.406	0.0240
materialACdiametro3	-0.151	0.860	0.434	0.7300
materialFOFOdiametro3	0.570	1.769	0.458	0.2100
materialFOGAdiametro3	0.713	2.039	0.387	0.0650
materialPOLIETdiametro3	NA	NA	0.000	NA

Rsquare= 0.185 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 346 on 11 df, p=0.00654

Como mencionamos; respecto a la interacción entre el material y el diámetro podemos observar en los resultados de los valores en los coeficientes de regresión y los índices de riesgo, la interacción de manera más individual, por ejemplo; es necesario comentar el valor alto de riesgo entre las tuberías de fundición (FOFO), y los diámetros pequeños, se confirma los resultados obtenidos en el análisis de los datos previo. Otro comentario es respecto a la no significancia de las tuberías de asbesto cemento y los diámetros mayores de 150 mm. Lo cual se podría pensar que se esperaba dichos resultados.

Lo anterior confirma lo mostrado en los análisis estadísticos previos, donde las tuberías de fundición (FOFO), y las tuberías de diámetro pequeño son las de mayores números de roturas. Por tal motivo se deduce que poseen un mayor riesgo para sufrir un fallo. De los resultados obtenidos, el resultado de no aplica (NA) en la interacción entre las tuberías de Polietileno y los diámetros mayores de 200 mms., es debido que no existe tuberías en este material para tales diámetros; por tal motivo (NA).

Las interacción entre las tuberías de menor riesgo, son las tuberías de asbesto cemento y los diámetros menores de 100mm. Es por demás interesante y necesario, el análisis de la interacción individual del material de las tuberías y los estratos de los diámetros.

De la tabla 7.13, otro análisis que podemos comentar de los resultados obtenidos; es referente a la variable “canprox”, la cual muestra resultados significantes. Las canalizaciones adyacentes de los diferentes servicios, que se encuentran a una distancia muy próxima a las tuberías de distribución de agua, por lo regular se localizan paralelamente a las mismas, por lo tanto la longitud de las tuberías podrá jugar un papel fundamental al conjuntar las dos variables, esto da pauta para evaluar el riesgo a que suceda un evento.

Por lo tanto, es necesario realizar el análisis de dichas variables conjuntamente. Por ultimo y no menos importante, es la no significancia de la variable “edadstrat3”, la cual corresponde a la edad de 20 años y donde el comportamiento de dicha variable es muy variable.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
canprox	-0.0413	0.96	0.1359	0.010241

longestrat1	0.4326	1.54	0.0412	0.007450
longestrat2	0.2709	1.31	0.0337	8.9e-016

Rsquare= 0.128 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 165 on 3 df, p=0.0000362

Los resultados nos muestran que los valores de los coeficientes de regresión, y los índices de riesgo, varían al evaluar conjuntamente las variables de canalizaciones próximas y la longitud, pero de manera aislada del resto de las demás variables. Donde nuevamente se muestra una interacción, entre las canalizaciones próximas y la longitud de la tubería, de tal manera que el mayor índice de riesgo, es la longitud que se encuentra en el rango entre 100-200 m., por encima de las tuberías de mayor longitud. Es necesario analizar uno a uno, la variable de la longitud con las canalizaciones próximas, para observar más detalladamente su interacción. Aclarando que no pierden su significancia ninguna variable.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
canproxlongestrat1	-0.647	0.524	0.237	0.0064
canproxlongestrat2	0.334	1.397	0.169	0.0470
canproxlongestrat3	0.569	1.766	0.498	0.2500

Rsquare= 0.012 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 14.5 on 3 df, p=0.00229

Observamos resultados interesantes; como el valor del índice de riesgo que es mayor al interactuar las canalizaciones próximas, con las longitudes mayores de 200 m., se obtiene un resultado diferente, al realizar el análisis de la interacción en conjunto de las canalizaciones con las longitudes. Esto nos puede indicar cierta dependencia entre las dos variable “canprox” y “long”.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.7992	2.22	0.0806	0.000000
diametro1	0.2015	1.22	0.0506	0.000069
diametro2	0.0715	1.07	0.0294	0.015000

Rsquare= 0.092 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 116 on 3 df, p=0.0004

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
rellenodiametro1	0.756	2.13	0.0925	3.3e-016
rellenodiametro2	0.784	2.19	0.2135	2.4e-004
rellenodiametro3	0.878	2.41	0.1433	9.1e-010

Rsquare= 0.069 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 86.6 on 3 df, p=0.0068

Otro análisis que se realizo, es el examinar conjuntamente el factor de la variable relleno con los diversos diámetros, así como la interacción entre ellos. Donde los resultados nos indican que respecto a la interacción, son muy similares los valores de

los factores, de tal forma que al hacer el análisis de la interacción entre ellos; es decir el relleno con cada uno de los diámetros, arrojan resultados diferentes a los anteriormente obtenidos, y el valor de los coeficientes es muy similar. Esto nos indica que cuentan con el mismo riesgo los tres estratos al interactuar con el relleno.

### 6.1.2 Conclusión

Cuando es examinada la población completa, las variables del entorno que muestran resultados estadísticamente significativos son “canprox” y el “relleno”, lo cual nos puede indicar que las tuberías de los sectores analizados, son sensibles a los factores de la proximidad las tuberías. Riesgo con el que interactúa las tuberías, por considerarlo de alguna manera. Así mismo se encontró que la variable “canprox” interactúa con la variable “long”, al igual que la variable “relleno” interactúa con la variable “diámetro”, según los resultados mostrados.

Como se esperaba, en base a los análisis estadísticos previos, el factor de riesgo inherente a las tuberías mismas como son el material, longitud, diámetro, historial de roturas, etcétera. Son de manera estadística, altamente significativas con un claro dominio del factor de riesgo del número de fallos previos.

## 6.2 Aplicación del modelo de Cox con ajuste de las covariables

Las variables que son altamente significativas señaladas en la tabla 7.13, se mantienen en el modelo, debido que son las que potencialmente aportaran mejores resultados al ajuste del modelo, en este caso se elimina las variables “traf”, “tiposuelo”, “profundidad”, “servcontin”. Esto en relación al método hacia atrás, el cual se desarrollara e ilustrara paso a paso, los resultados en el primer ajuste para todas las variables significativas son.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.7057	2.025	0.0740	0.0e+000
canprox	-0.2683	0.765	0.0961	5.3e-003
nfp1	0.6114	1.843	0.0968	2.6e-010
nfp2	0.7103	2.035	0.1092	7.9e-011
nfp3	0.7799	2.181	0.1148	1.1e-011
nfp4	0.8525	2.345	0.1022	1.1e-016
lnlong	0.3750	1.455	0.1102	6.7e-004
lndiam	0.5780	1.782	0.2290	1.2e-002
<b>diam2</b>	<b>-0.2674</b>	<b>0.765</b>	<b>0.1627</b>	<b>1.0e-001</b>
<b>diam3</b>	<b>-0.4147</b>	<b>0.661</b>	<b>0.2786</b>	<b>1.4e-001</b>
<b>edadstrat1</b>	<b>-0.1619</b>	<b>0.851</b>	<b>0.1289</b>	<b>2.1e-001</b>
edadstrat2	-0.1802	0.835	0.0535	7.5e-004
<b>edadstrat3</b>	<b>0.3340</b>	<b>1.397</b>	<b>1.0637</b>	<b>7.5e-001</b>
mat2	-1.1999	0.301	0.2463	1.1e-006
<b>mat3</b>	<b>-1.1149</b>	<b>0.328</b>	<b>4.2486</b>	<b>7.9e-001</b>
mat4	0.7739	2.168	0.1030	5.6e-014
longestrat1	0.1326	1.142	0.0544	1.5e-002
longestrat2	0.0707	1.073	0.0408	8.3e-002

Rsquare= 0.341 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 703 on 18 df, p=0.00634

Las variables “diam2” y “diam3” dejan de ser estadísticamente significativa (0.1,0.14>0.05), probablemente se encuentre en una fuerte dependencia entre estas variables y la variable “longestrat”, además de algunas de las variables eliminadas que no tuvieron un valor estadísticamente significativo. Cabe mencionar que los valores del índice de riesgo no varían, pero el ratio de verosimilitud varia de manera significativa, así como la variación de los valores de los coeficientes y por consiguiente del índice de riesgo, al remover las variables de “traf”, “tiposuelo”, “profundidad”, “servcontin”. Por tal motivo deberán ser removidas del modelo.

Lo mismo sucede con las variables “edadstrat1” y “edadstrat3”, las cuales tienen un valor no significativo estadísticamente, así como la variable “mat3”. Lo que podemos comentar respecto al diámetro, la significancia estadística es considerada a través de la variable “Indiam”, por tal motivo debemos de eliminar las variables referentes al diámetro y dejamos la variable “Indiam”.

En relación a la edad, podemos considerar que al remover algunas de las variables del entorno, existe una correlación, que hace que pierdan significancia estadística las variables relacionadas con la edad; en específico con la “edadstrat1” y “edadstrat3”. Podemos asumir que lo mismo sucede con la variable “mat3”, la cual interactúa con las variables eliminadas.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.6501	1.916	0.0719	0.0e+000
canprox	-0.1896	0.827	0.0935	4.3e-002
nfp1	0.6659	1.946	0.0964	4.9e-012
nfp2	0.7486	2.114	0.1091	6.9e-012
nfp3	0.8285	2.290	0.1146	4.8e-013
nfp1	0.8941	2.445	0.1019	0.0e+005
lnlong	0.4159	1.516	0.1085	1.3e-004
Indiam	0.2708	1.311	0.0730	2.1e-004
diam2	-0.1672	0.846	0.0908	6.6e-002
mat2	-0.8142	0.443	0.1114	2.7e-013
mat3	0.3007	1.351	0.0855	4.4e-004
mat4	0.5953	1.814	0.0922	1.1e-010
longestrat1	0.1009	1.106	0.0537	6.0e-002
<b>longestrat2</b>	<b>0.0501</b>	<b>1.051</b>	<b>0.0403</b>	<b>2.1e-001</b>

Rsquare= 0.333 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 683 on 14 df, p=0.00617

Como observamos, aunque la variable “mat3” había obtenido un valor estadísticamente no significativo, optamos por dejarla y se observa la interacción que tiene con la edad. Esto lo deducimos al momento de eliminar la variable “edad”, con lo cual la variable “mat3” obtiene nuevamente un valor estadísticamente significativo.

El ratio de verosimilitud varía ligeramente, si observamos los valores la variación es mínima, al igual que los valores de los coeficientes y del índice de riesgo. Respecto a la variable “diamestrat”, se crea la variable diamestrat2 (“diametro2=1” si diam<150mm sino “diametro2=0”), así mismo se realiza el mismo procedimiento con la variable “longitud” (“longitud2=1” si long<150m sino “longitud2=0”), donde se obtienen los resultados siguientes:

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.6503	1.916	0.0720	0.0e+000
canprox	-0.2176	0.804	0.0933	2.0e-002
nfp1	0.6906	1.995	0.0962	6.8e-013
nfp2	0.7587	2.136	0.1089	3.2e-012
nfp3	0.8465	2.331	0.1144	1.3e-013
nfp4	0.9027	2.466	0.1018	0.0e-011
lnlong	0.5902	1.804	0.0916	1.2e-010
lndiam	0.1543	1.167	0.1269	2.2e-001
diametro2	-0.0664	0.936	0.0753	3.8e-001
mat2	-0.7966	0.451	0.1115	9.2e-013
mat3	0.3181	1.374	0.0868	2.5e-004
mat4	0.5818	1.789	0.0909	1.6e-010
longitud2	0.0591	1.061	0.0980	5.5e-001

Rsquare= 0.331 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 678 on 13 df, p=0.00598

Por los resultados obtenidos, debemos de considerar remover de manera definitiva, las variables referentes al diámetro y a la longitud, donde cabe recalcar que el valor del ratio de verosimilitud varia; por tal motivo, nos confirma que debemos remover la variable recién creada “longitud2” y la variable “diametro2”, donde el factor de riesgo respecto a la longitud es “llevado” por la variable “lnlong”, y para el diámetro por la variable “lndiam”. Debemos comentar que la variable “lndiam”, es estadísticamente no significativa, pero permanecerá en el modelo, con el objetivo de evaluar si esta afectada por la variable “diametro2”.

Nuevamente realizaremos una nueva simulación con los ajustes mencionados.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.649	1.913	0.0720	0.0e+000
canprox	-0.230	0.795	0.0919	1.2e-002
nfp1	0.906	2.475	0.1018	0.0e+000
nfp2	0.763	2.145	0.1088	2.3e-012
nfp3	0.846	2.330	0.1144	1.4e-013
nfp4	0.691	1.997	0.0961	6.3e-013
lnlong	0.544	1.722	0.0631	1.1e-016
lndiam	0.242	1.274	0.0718	7.5e-004
mat2	-0.794	0.452	0.1111	8.6e-013
mat3	0.313	1.368	0.0853	2.5e-004
mat4	0.569	1.767	0.0901	2.7e-010

Rsquare= 0.331 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 676 on 11 df, p=0.00563

De acuerdo a los resultados obtenidos, este será el modelo definitivo de todas las variables que son significativas para nuestro estudio. Esto para todos los individuos sin estratificar. Y como se había comentado la variable “lndiam”, resulta altamente significativa al eliminar la variable “diametro2”.

### 6.3 Estratificación respecto al material

Es necesario realizar un análisis respecto a los estratos del material, iniciaremos por realizar el estrato de las tuberías de acero galvanizado (FOGA), del resto de los

materiales, es decir de los materiales de asbesto cemento, fundición y polietileno. Con lo cual seleccionaremos los factores de riesgo más relevantes para este subgrupo.

Iniciamos con el estrato de las tuberías de acero galvanizado, obteniendo los siguientes resultados:

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.66068	1.936	0.1284	2.7e-007
profundidad	0.35555	1.427	0.1496	1.7e-002
<b>traf</b>	<b>0.25280</b>	<b>1.288</b>	<b>0.1879</b>	<b>1.8e-001</b>
<b>canprox</b>	<b>-0.28710</b>	<b>0.750</b>	<b>0.1800</b>	<b>1.1e-001</b>
<b>tiposuelo</b>	<b>-0.21471</b>	<b>0.807</b>	<b>0.3886</b>	<b>5.8e-001</b>
nfp1	0.59247	1.808	0.1671	3.9e-004
nfp2	0.60286	1.827	0.1554	1.0e-004
nfp3	0.69522	2.004	0.1857	1.8e-004
nfp4	0.77341	2.167	0.1590	1.2e-006
lnlong	0.42588	1.531	0.1480	4.0e-003
Indiam	0.77396	2.168	0.3734	3.8e-002
<b>diam2</b>	<b>-0.29255</b>	<b>0.746</b>	<b>0.2527</b>	<b>2.5e-001</b>
<b>diam3</b>	<b>-0.44098</b>	<b>0.643</b>	<b>0.4110</b>	<b>2.8e-001</b>
<b>edadstrat</b>	<b>-0.08587</b>	<b>0.918</b>	<b>0.0802</b>	<b>2.8e-001</b>
<b>longestrat1</b>	<b>0.03416</b>	<b>1.035</b>	<b>0.0754</b>	<b>6.5e-001</b>
<b>longestrat2</b>	<b>-0.00198</b>	<b>0.998</b>	<b>0.0745</b>	<b>9.8e-001</b>

Rsquare= 0.24 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 169 on 16 df, p=0.000327

Respecto a los factores inherentes a las tuberías mismas como son: la edad, diámetro y la longitud obtienen valores no significativos, esto debido a la fuerte correlación entre ellos, es decir entre los factores de riesgo de las variables “Indiam” y “diam”, al igual que los factores de riesgo “lnlong”(estadísticamente significativa) y “longestrat”. Por tal motivo permanecerán ambos factores (“lnlong”, “Indiam”) para el próximo modelo y observaremos los resultados que se obtienen. Respecto a la variable “edad” se incluyo en este modelo con el objetivo de conocer si la diferencia de edad entre las tuberías de acero galvanizado de 40 y 50, tiene alguna significancia estadística y su respectivo índice de riesgo si es que correspondiera, pero con los resultados obtenidos observamos que no tiene significancia estadística.

En relación al resto de los factores inherentes de las tuberías, como el número de roturas sigue siendo altamente significativas, y con los valores de los índices de riesgo más altos.

En lo que se refiere a las variables del entorno, tenemos que las variables de “relleno” y “profundidad”, poseen una significancia estadística y es la variable de “relleno”, la que posee un índice de riesgo mayor. Es decir, aquellas tuberías que se encuentren alojadas en sitios donde el relleno no es el adecuado, tienen 1.936 mas veces de sufrir una rotura, que aquellas tuberías que se localizan en una zona con el relleno adecuado.

Observamos que al eliminar ciertas variables, el riesgo referente a los fallos aumenta, lo que se refiere al valor del riesgo de la covariable “lnlong” y “Indiam” permanece constante.



	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.529	1.70	0.112	2.2e-006
profundidad	0.411	1.51	0.120	6.3e-004
nfp1	0.629	1.88	0.165	1.4e-004
nfp2	0.638	1.89	0.154	1.4e-004
nfp3	0.725	2.06	0.185	8.6e-005
nfp4	0.869	2.38	0.154	1.9e-008
lnlong	0.434	1.54	0.088	8.2e-007
Indiam	0.461	1.59	0.104	8.6e-006

Rsquare= 0.229 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 161 on 8 df, p=0.000301

En la tabla anterior, tenemos el modelo final con las covariables que son estadísticamente significativas, en donde los valores de mayor índice de riesgo, son aquellas tuberías que cuentan con tres y cuatros fallos previos. Y el resto de las covariables cuentan con índice de riesgo muy similar, respecto a su valor e importancia.

#### 6.4 Análisis de tuberías que no son de acero (Asbesto cemento y polietileno)

Se genera la estratificación con los individuos que pertenecen a este estrato, es decir, las tuberías que son de asbesto cemento y polietileno, se realiza el cálculo y se obtiene los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.7554	2.128	0.1022	1.5e-013
<b>profundidad</b>	<b>0.0659</b>	<b>1.068</b>	<b>0.1730</b>	<b>7.0e-001</b>
traf	-0.7441	0.475	0.2130	4.8e-004
<b>canprox</b>	<b>0.1576</b>	<b>1.171</b>	<b>0.1574</b>	<b>3.2e-001</b>
<b>tiposuelo</b>	<b>0.0428</b>	<b>1.044</b>	<b>0.1850</b>	<b>8.2e-001</b>
nfp4	0.5202	1.682	0.1592	1.1e-003
nfp2	0.8815	2.415	0.1797	9.3e-007
nfp3	0.9232	2.517	0.1803	3.0e-007
nfp1	1.1357	3.113	0.1726	4.8e-011
<b>lnlong</b>	<b>0.3536</b>	<b>1.424</b>	<b>0.2301</b>	<b>1.2e-001</b>
lndiam	0.8163	2.262	0.3791	3.1e-002
<b>diam2</b>	<b>-0.2742</b>	<b>0.760</b>	<b>0.2947</b>	<b>3.5e-001</b>
<b>diam3</b>	<b>-0.7408</b>	<b>0.477</b>	<b>0.4565</b>	<b>1.0e-001</b>
<b>edadstrat1</b>	<b>-0.1240</b>	<b>0.883</b>	<b>0.1324</b>	<b>3.5e-001</b>
edadstrat2	0.3948	1.484	0.0562	2.1e-012
<b>longestrat1</b>	<b>0.1581</b>	<b>1.171</b>	<b>0.1099</b>	<b>1.5e-001</b>
longestrat2	0.1388	1.149	0.0702	4.8e-002

Rsquare= 0.444 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 468 on 17 df, p=0.000510

Al estructurar el modelo de Cox con todas las covariables, que pueden tener alguna significancia en los factores de riesgo, para las tuberías que no son de acero, observamos que los factores del entorno que tienen una significancia estadística, son los factores de relleno y trafico (“traf”), cabe mencionar que por primera vez aparece el factor de riesgo del trafico, esto para las tuberías que no son de acero. Es decir para las tuberías de asbesto cemento y polietileno. Eliminamos las covariables del entorno que no son estadísticamente significativas, y dejamos el resto de las demás covariables, en relación a las covariables de la “longestrat”, creamos una nueva covariable “longitud2”

(“longitud2=1” si long<150m sino “longitud2=0”), donde se obtiene los resultados siguientes:

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.7331	2.081	0.1018	6.0e-013
<b>profundidad</b>	<b>0.0895</b>	<b>1.094</b>	<b>0.1733</b>	<b>6.1e-001</b>
traf	-0.7536	0.471	0.2107	3.5e-004
<b>canprox</b>	<b>0.2079</b>	<b>1.231</b>	<b>0.1559</b>	<b>1.8e-001</b>
<b>tiposuelo</b>	<b>0.0201</b>	<b>1.020</b>	<b>0.1836</b>	<b>9.1e-001</b>
nfp1	0.5525	1.738	0.1587	5.0e-004
nfp2	0.8961	2.450	0.1796	6.1e-007
nfp3	0.9481	2.581	0.1800	1.4e-007
nfp4	1.1513	3.162	0.1718	2.1e-011
lnlong	0.8016	2.229	0.1964	4.5e-005
lndiam	0.7276	2.070	0.3756	5.3e-002
<b>diam2</b>	<b>-0.2753</b>	<b>0.759</b>	<b>0.2944</b>	<b>3.5e-001</b>
<b>diam3</b>	<b>-0.6347</b>	<b>0.530</b>	<b>0.4524</b>	<b>1.6e-001</b>
<b>edadstrat1</b>	<b>-0.1004</b>	<b>0.905</b>	<b>0.1323</b>	<b>4.5e-001</b>
edadstrat2	0.3785	1.460	0.0555	8.9e-012
<b>longitud2</b>	<b>0.0869</b>	<b>1.091</b>	<b>0.1823</b>	<b>6.3e-001</b>

Rsquare= 0.441 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 465 on 16 df, p=0.000518

Al incluir la covariable “longitud2”, observamos que la covariable “lnlong” se convierte estadísticamente significativa, con un aumento en el valor del factor de riesgo, la covariable “longitud2” será eliminada debido a que no es estadísticamente significativa. Lo que podemos comentar es que el factor lnlong “lleva” el riesgo de dicha covariable. Lo mismo sucede con la covariable “diam”, la cual no es estadísticamente significativa, pero la covariable “lndiam” si lo es. Concluimos que es la que lleva el riesgo respecto al diámetro.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.3634	1.438	0.0931	9.6e-005
traf	-0.2161	0.806	0.1477	1.4e-001
nfp1	1.0852	2.960	0.1560	3.5e-012
nfp2	1.3144	3.722	0.1806	3.4e-013
nfp3	1.3628	3.907	0.1774	1.6e-014
nfp4	1.4893	4.434	0.1718	1.3e-014
lnlong	1.0040	2.729	0.1265	2.1e-015
lndiam	0.0933	1.098	0.1404	5.1e-001

Rsquare= 0.387 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 390 on 8 df, p=0

Una vez que se han eliminado las covariables, que no son estadísticamente significativas, se obtiene los resultados anteriores, donde la covariable “traf” tiene interacción con alguna de las covariables eliminadas, en específico con la covariable “edad”, ya que se realiza la simulación y la covariable “traf” sigue siendo significativa. Al momento de eliminar las covariables señaladas, influyen en los resultados y sobre manera, en los valores de los factores de riesgo.

---



---

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.3502	1.42	0.0928	1.6e-004
nfp1	1.1095	3.03	0.1555	9.7e-013
nfp2	1.3394	3.82	0.1800	1.0e-013
nfp3	1.3930	4.03	0.1765	2.9e-015
nfp4	1.5129	4.54	0.1711	1.8e-013
lnlong	0.9311	2.54	0.1154	6.7e-016
lndiam	0.0037	1.00	0.1287	9.8e-001

Rsquare= 0.385 (max possible= 1 )  
 Likelihood ratio test= 388 on 7 df, p=0

En la tabla anterior, tenemos el modelo final de los factores de riesgo que son significativos, en los fallos de las tuberías de asbesto cemento y polietileno. Lo que resalta en este estrato, es que respecto a las variables del entorno, solo el factor del relleno es el que resulta estadísticamente significativo.

### 6.5 Analisis de las tuberías que sufren una o más roturas

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.32218	1.380	0.0864	1.9e-001
profundidad	-0.13673	0.872	0.1004	1.7e-001
traf	0.08617	1.090	0.1321	5.1e-001
canprox	-0.23347	0.792	0.1195	5.1e-002
tiposuelo	-0.11892	0.888	0.1585	4.5e-001
nfp1	0.22182	1.380	0.3753	3.9e-001
nfp2	0.23403	1.264	0.3749	5.3e-001
nfp3	0.29165	1.339	0.3775	4.4e-001
nfp4	0.32307	1.250	0.3700	5.5e-001
lnlong	0.12925	1.138	0.1601	4.2e-001
lndiam	0.54164	1.719	0.2680	4.3e-002
diam2	-0.21338	0.808	0.1891	2.6e-001
diam3	-0.54092	0.582	0.3236	9.5e-001
edadstrat1	0.23738	1.268	0.1375	8.4e-001
edadstrat2	0.00399	1.004	0.0624	9.5e-001
edadstrat3	0.12991	1.139	0.0364	3.6e-001
longestrat1	0.13413	1.144	0.0681	4.9e-002
longestrat2	0.09229	1.097	0.0522	7.7e-002
mat2	0.23721	1.268	0.2758	3.9e-001
mat3	NA	NA	0.0000	NA
mat4	0.55569	1.743	0.1198	3.5e-001

Rsquare= 0.081 (max possible= 1 )  
 Likelihood ratio test= 97.5 on 20 df, p=3.47e-012

Como observamos, son escasos los factores de riesgo los que cuentan con un valor de riesgo estadísticamente significativo, tan solo los factores “canprox” y “lndiam”.

### 6.6 Resumen de los resultados

La siguiente tabla, muestra un resumen de la selección de las variables, para un modelo de riesgo proporcional de Cox en cada uno de los estratos.

<b>Nombre variable</b>	<b>Datos completos</b>	<b>FOGA</b>	<b>AC-POLIET</b>	<b>Mas de una fuga</b>
relleno				
profundidad				
traf				
canprox				
tiposuelo				
nfp1				
nfp2				
nfp3				
nfp4				
lnlong				
Indiam				
diam2				
diam3				
edadstrat1				
edadstrat2				
edadstrat3				
mat2				
mat3				
mat4				
longestrat1				
longestrat2				

*Tabla 7. 14 Resumen de la selección de Variables de un modelo de riesgo proporcional de Cox*

Con los resultados obtenidos, de las diversas consideraciones que se realizaron con el estrato completo de todos los individuos, el estrato de las tuberías de acero galvanizado FOGA, seguidamente del estrato de las tuberías que no son de acero; como son las tuberías de asbesto cemento y polietileno, y por ultimo la clasificación del estrato de las tuberías que han sufrido una o mas roturas. Según los resultados obtenidos, nos indican que las covariables inherentes a las tuberías como son: los fallos previos, la longitud y el diámetro. Evaluados a través de las covariables “lnlong” y “Indiam” respectivamente, poseen un factor de riesgo alto, para todos los estratos evaluados de manera conjunta e individual, algo relevante es la edad, que pensaríamos que es un factor de riesgo importante, concluimos que según lo resultados obtenidos no lo es. Así mismo, la covariable que resulta relevante, en cuanto al factor de riesgo para todo tipo de material de las tuberías es el “relleno”.

Para las tuberías de acero galvanizado, las covariables profundidad y relleno son relevantes, esto nos indica que el material de relleno y la profundidad es un factor de

---

---

riesgo para la ocurrencia de roturas, se requiere un estudio mas profundo para conocer si estos factores, se relacionan con la “agresividad” del suelo. Por tal motivo resulta interesante tener lo anterior en consideración.

Dentro de las covariables del entorno, la covariable que resulta significativa para todos los individuos, y para aquellos que tienen mas de una rotura, son las canalizaciones próximas (canprox), factor que se debe de considerar al momento de determinar los factores de riesgo, en conjunto para las tuberías que presentan roturas.

## 7 Análisis de los datos para el modelo de riesgo proporcional de Weibull

### 7.1 Forma paramétrica de las funciones de riesgo y de sobrevivencia

Una vez que las variables significativas han sido identificadas, cada estrato de la base de datos, es ajustado para aplicarse en el modelo de riesgo proporcional de Weibull. En dicho modelo se obtendrán los parámetros de escala y forma respectivamente. Así como se calcula las formas paramétricas de las funciones de riesgo y de sobrevivencia. Nuevamente nos auxiliaremos del lenguaje R y del software estadístico S-plus, para la realización de los cálculos de los parámetros de escala, forma y los coeficientes de regresión. El análisis se realizará para el mismo periodo de los datos 2000-2006, donde de la base de datos de cada estrato, se selecciona y se ajusta con el objetivo de conocer las características de cada estrato definido.

Las variables que aparecen en las funciones de riesgo y de supervivencia como  $X_i$ , se interpretan de la siguiente manera:

$X_1=1$  Si relleno = 1 (material no nativo) de lo contrario  $X_1=0$

$X_2=1$  Si profundidad = 1 (profundidad fuera de norma) de lo contrario  $X_2=0$

$X_3=1$  Si canprox = 1 (existen canalizaciones próximas a las tuberías de distribución) de lo contrario  $X_3=0$

$X_4=1$  Si nfpo1= 1 (segmentos que han sufrido una rotura) de lo contrario  $X_4=0$

$X_5=1$  Si nfpo2 = 1 (segmentos que han sufrido dos rotura) de lo contrario  $X_5=0$

$X_6=1$  Si nfpo3= 1 (segmentos que han sufrido tres rotura) de lo contrario  $X_6=0$

$X_7=1$  Si nfpo4= 1 (segmentos que han sufrido cuatro o mas roturas) de lo contrario  $X_7=0$

Si estas no sufren ninguna rotura, esto significa que  $X_4, X_5, X_6, X_7 = 0$

$X_8 = \text{Ln}(\text{diam})$

$X_9 = \text{Ln}(\text{long})$

$X_{10}=1$  Si Edad1 = 1 (tuberías con 40 años de edad) de lo contrario  $X_{10}=0$

- $X_{11}=1$  Si Edad2 = 1 (tuberías con 50 años de edad) de lo contrario  $X_{11}=0$   
 $X_{12}=1$  Si Edad3 = 1 (tuberías con 20 años de edad) de lo contrario  $X_{12}=0$   
 $X_{13}=1$  Si Mat1 = 1 (el segmento es de acero galvanizado) de lo contrario  $X_{13}=0$   
 $X_{14}=1$  Si Mat2 = 1 (el segmento es de fundición) de lo contrario  $X_{14}=0$   
 $X_{15}=1$  Si Mat3 = 1 (el segmento es de polietileno) de lo contrario  $X_{15}=0$

## 7.2 Todos los individuos sin estratificar

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	10.9328	9.2871	2.39e-001
relleno	-1.5372	0.0776	9.28e-028
<b>profundidad</b>	<b>-0.1320</b>	<b>0.0889</b>	<b>1.37e-001</b>
canprox	0.8763	0.0970	1.07e-004
nfp1	-0.7468	0.1062	2.23e-028
nfp2	-1.1085	0.1121	1.31e-022
nfp3	-1.3234	0.1174	2.39e-025
nfp4	-1.6246	0.0985	5.56e-026
lnlong	-1.1843	0.0666	2.47e-021
lndiam	0.5641	0.0792	1.23e-005
edadstrat1	-0.8927	0.1355	1.74e-002
edadstrat2	-0.0923	0.0569	1.26e-003
edadstrat3	-1.4368	0.2734	8.72e-002
mat2	-1.1162	0.2620	8.14e-007
mat3	-1.1072	0.0928	8.78e-002
mat4	-0.8887	0.1080	1.84e-003

Scale= 1.05

Loglik(model)= -8681.6

Chisq= 814.84 on 14 degrees of freedom, p= 3.03e-06

Todas las covariables en el modelo son significativas, excepto la variable que se refiere a la profundidad, inclusive las covariables que no fueron estadísticamente significativas en el modelo de Cox, resultan estadísticamente significativas.

Conocemos que la forma de la función del índice de riesgo es:

$$h(t) = \lambda p (\lambda t)^{p-1} \exp\left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right) \quad (7.41)$$

Por lo tanto en esta expresión  $p = \frac{1}{\text{factor escala}}$ ,  $\lambda = e^{f.\text{forma}}$ ,  $\beta_i = \frac{-\beta_i^*}{\text{factor escala}}$ .

Con lo anteriormente descrito, nosotros obtenemos:

$$p = \frac{1}{1.05}, \lambda = e^{-12.76}, \beta_i = \frac{-\beta_i^*}{1.05}$$

Y el índice de riesgo resulta.

$$h(t) = \frac{1}{1.05} e^{\left(\frac{-10.93}{1.05}\right) t^{\frac{1-1.05}{1.05}}} e^{[-0.952(-1.537x_1 + 0.876x_3 - 0.746x_4 - 1.108x_5 - 1.323x_6 - 1.624x_7 - 1.184x_8 + 0.564x_9 - 0.892x_{10} - 0.092x_{11} - 1.436x_{12} - 1.116x_{13} - 1.107x_{14} - 0.888x_{15})]}$$

$$h(t) = 2.865x10^{-5} t^{-0.0476} e^{[-0.952(-1.537x_1 + 0.876x_3 - 0.746x_4 - 1.108x_5 - 1.323x_6 - 1.624x_7 - 1.184x_8 + 0.564x_9 - 0.892x_{10} - 0.092x_{11} - 1.436x_{12} - 1.116x_{13} - 1.107x_{14} - 0.888x_{15})]}$$

Ahora obtendremos la función de supervivencia, la cual tiene la siguiente expresión.

$$S(t) = e^{\left[-(\lambda t)^p e^{\left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right)}\right]} \quad (7.42)$$

$$S(t) = e^{\left(-e^{\frac{-10.93}{1.05}} x t^{\frac{1}{1.05}}\right)} * e^{[-0.952(-1.537x_1 + 0.876x_3 - 0.746x_4 - 1.108x_5 - 1.323x_6 - 1.624x_7 - 1.184x_8 + 0.564x_9 - 0.892x_{10} - 0.092x_{11} - 1.436x_{12} - 1.116x_{13} - 1.107x_{14} - 0.888x_{15})]}$$

$$S(t) = e^{\left(-3.0144x10^{-5} * t^{0.952}\right)} * e^{[-0.952(-1.537x_1 + 0.876x_3 - 0.746x_4 - 1.108x_5 - 1.323x_6 - 1.624x_7 - 1.184x_8 + 0.564x_9 - 0.892x_{10} - 0.092x_{11} - 1.436x_{12} - 1.116x_{13} - 1.107x_{14} - 0.888x_{15})]}$$

Para ilustrar la ecuación de la función de riesgo, se realiza un ejemplo para una tubería donde el relleno es el adecuado ( $X_1=1$ ), primero la tubería no sufre ninguna rotura ( $X_4=X_5=X_6=X_7=0$ ), después de cierto tiempo, la tubería experimenta un primer fallo ( $X_4=1, X_5=X_6=X_7=0$ ), seguidamente la tubería sufre un segundo fallo ( $X_5=1, X_4=X_6=X_7=0$ ), después experimenta un tercer fallo ( $X_6=1, X_4=X_5=X_7=0$ ), con un diámetro de 150 mm ( $X_8=Ln150$ ) y una longitud de 110 metros ( $X_9=Ln110$ ), una edad de 40 años ( $X_{10}=1$ ), la tubería es de material acero galvanizado ( $X_{13}=1$ ). La expresión de la función subsecuente es la siguiente:

$$\text{Ninguna rotura al primer fallo: } h(t) = 2.20 \text{ E-}02 t^{-0.0476} \quad (7.43)$$

$$\text{1er fallo al 2do fallo: } h(t) = 4.02 \text{ E-}02 t^{-0.0476} \quad (7.44)$$

$$\text{2do fallo al 3er fallo: } h(t) = 5.74 \text{ E-}02 t^{-0.0476} \quad (7.45)$$

$$\text{3er fallo al 4to fallo: } h(t) = 7.16 \text{ E-}02 t^{-0.0746} \quad (7.46)$$

El tiempo de las roturas se selecciona aleatoriamente, la forma de la función se muestra en la figura 7.19.

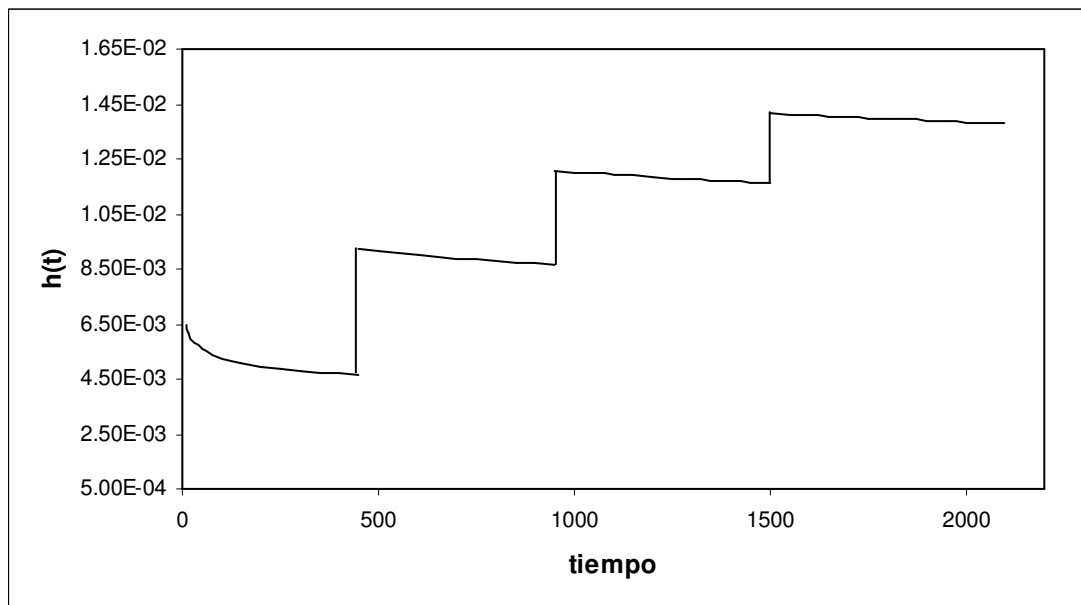


Figura 7. 19 Función de riesgo de una tubería de acero galvanizado de 40 años, con un relleno correcto, de un diámetro de 150 mm y 110 m. de longitud

De la figura anterior, observamos que la función de riesgo es decreciente entre cada fallo, lo cual es como se esperaba, debido a que el parámetro de escala es mayor que uno (por lo tanto  $p < 1$ ). Sin embargo, se pudiera considerar como sorprendente una función de riesgo decreciente, de hecho, es más bien esperado que el riesgo aumentará con el tiempo. Al investigar para tratar de explicar el fenómeno, encontramos que el mismo fenómeno es experimentado en el campo de la demografía, con el segmento de la población que disfruta de una excepcional longevidad, por lo tanto la función de riesgo no decrece.

La explicación se basa, en el hecho de que a finales de la vida de una población, los individuos más frágiles han muerto, en el caso de las tuberías han sido remplazadas; las tuberías más antiguas que quedan son las más resistentes (buena manufactura/genes, instalación/nacimiento adecuado, entorno/condiciones de vida), y disfrutan de una vida duradera disminuyendo las funciones de riesgo.

El salto vertical después de cada fallo, es debido al hecho que el riesgo se incrementa sustancialmente después de cada fallo, esto es trasladado en la ecuación por un nuevo valor de la variable representada por “nfpo”.



### 7.3 Estrato de tuberías de acero galvanizado FOGA

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	12.6239	1.9185	2.48e-014
relleno	-0.7471	0.1307	1.10e-008
profundidad	-0.4196	0.1559	7.10e-003
canprox	0.3483	0.1853	6.02e-002
nfp1	-0.8344	0.1606	2.05e-007
nfp2	-0.8554	0.1717	6.27e-007
nfp3	-0.9986	0.1902	1.52e-007
nfp4	-1.0758	0.1624	3.49e-011
lnlong	-0.4333	0.1500	3.87e-003
lndiam	-1.0234	0.3764	6.55e-003
<b>longestrat1</b>	<b>-0.0452</b>	<b>0.0784</b>	<b>5.65e-001</b>
<b>longestrat2</b>	<b>-0.0158</b>	<b>0.0772</b>	<b>8.38e-001</b>
<b>edadstrat</b>	<b>0.0846</b>	<b>0.0828</b>	<b>3.07e-001</b>
<b>diam2</b>	<b>0.4188</b>	<b>0.2567</b>	<b>1.03e-001</b>
<b>diam3</b>	<b>0.5561</b>	<b>0.4218</b>	<b>1.87e-001</b>

Scale= 1.05

Loglik(model)= -3289.3

Chisq= 243.67 on 14 degrees of freedom, p= 2.10e-07

Una vez eliminadas las covariables que no son significativas, obtenemos el modelo final.

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	12.0627	0.7143	1.06e-074
relleno	-0.6957	0.1223	1.29e-008
profundidad	-0.4779	0.1277	1.83e-004
canprox	0.3415	0.1760	5.23e-002
nfp1	-0.8766	0.1596	3.99e-008
nfp2	-0.9056	0.1703	1.06e-007
nfp3	-1.0507	0.1891	2.75e-008
nfp4	-1.1477	0.1591	5.45e-013
lnlong	-0.4719	0.0903	1.76e-007
lndiam	-0.6160	0.1170	1.39e-007

Scale= 1.05

Loglik(model)= -3291.9

Chisq= 238.54 on 9 degrees of freedom, p= 2.12e-07

$$p = \frac{1}{1.05}, \lambda = e^{-12.76}, \beta_i = \frac{-\beta^*}{1.05}$$

Y el índice de riesgo resulta.

$$h(t) = \frac{1}{1.05} e^{\left(\frac{-12.06}{1.05}\right) t^{\frac{1-1.05}{1.05}}} e^{[-0.952(-0.695x_1 - 0.477x_2 + 0.341x_3 - 0.876x_4 - 0.905x_5 - 1.050x_6 - 1.147x_7 - 0.471x_8 - 0.616x_9)]}$$

$$h(t) = 9.82x10^{-6} t^{-0.0476} e^{[-0.952(-0.695x_1 - 0.477x_2 + 0.341x_3 - 0.876x_4 - 0.905x_5 - 1.050x_6 - 1.147x_7 - 0.471x_8 - 0.616x_9)]}$$

Ahora obtendremos la función de supervivencia, la cual tiene la siguiente expresión.

$$S(t) = e \left[ -(\lambda t)^p e \left( \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \right) \right] \quad (7.47)$$

$$S(t) = e \left( -e^{\frac{-12.06}{1.05} x t^{1.05}} \right) * e[-0.952(-0.695x_1 - 0.477x_2 + 0.341x_3 - 0.876x_4 - 0.905x_5 - 1.050x_6 - 1.147x_7 - 0.471x_8 - 0.616x_9)]$$

$$S(t) = e \left( -1.028x_6 10^{-5} * t^{0.952} \right) * e[-0.952(-0.695x_1 - 0.477x_2 + 0.341x_3 - 0.876x_4 - 0.905x_5 - 1.050x_6 - 1.147x_7 - 0.471x_8 - 0.616x_9)]$$

#### 7.4 Estrato de tuberías de asbesto cemento y polietileno

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	9.32176	2.4234	0.00012
<b>relleno</b>	<b>-0.24968</b>	<b>0.1089</b>	<b>0.22192</b>
<b>profundidad</b>	<b>0.14577</b>	<b>0.1724</b>	<b>0.39796</b>
traf	0.03702	0.2140	0.06262
<b>canprox</b>	<b>0.13480</b>	<b>0.1605</b>	<b>0.40086</b>
<b>tiposuelo</b>	<b>0.11649</b>	<b>0.1871</b>	<b>0.53347</b>
<b>nfp1</b>	<b>-0.28452</b>	<b>0.6596</b>	<b>0.37553</b>
<b>nfp2</b>	<b>-0.46304</b>	<b>0.6598</b>	<b>0.45493</b>
nfp3	-0.49494	0.6621	0.04825
nfp4	-0.58054	0.6555	0.06866
lnlong	0.12363	0.2811	0.06005
lndiam	-0.76710	0.3936	0.05130
<b>diam2</b>	<b>0.20019</b>	<b>0.3081</b>	<b>0.51584</b>
<b>diam3</b>	<b>1.15565</b>	<b>0.4987</b>	<b>0.20487</b>
<b>edadstrat1</b>	<b>-0.27833</b>	<b>0.1287</b>	<b>0.03062</b>
<b>edadstrat2</b>	<b>-0.08765</b>	<b>0.0567</b>	<b>0.12230</b>
<b>longestrat1</b>	<b>0.00562</b>	<b>0.1154</b>	<b>0.96116</b>
<b>longestrat2</b>	<b>-0.09763</b>	<b>0.0773</b>	<b>0.20680</b>
<b>mat2</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.0000</b>	<b>NA</b>
<b>mat3</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.0000</b>	<b>NA</b>
<b>mat4</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.0000</b>	<b>NA</b>

Scale= 0.913

Loglik(model)= -3076

Chisq= 41.89 on 20 degrees of freedom, p= 0.0029

Una vez eliminadas las covariables que no son significativas, obtenemos el modelo final.

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	7.93608	0.9708	2.97e-016
traf	-0.08705	0.0907	3.37e-002
nfp3	-0.01946	0.1367	8.87e-002
nfp4	0.11464	0.1024	2.63e-003
lnlong	-0.36799	0.1283	4.12e-003
lndiam	-0.01475	0.1288	9.71e-002

Scale= 0.943

Loglik(model)= -3092.3

Chisq= 9.45 on 5 degrees of freedom, p= 0.0092

$$p = \frac{1}{0.94}, \lambda = e^{-8.985}, \beta_i = \frac{-\beta^*}{0.94}$$

Y el índice de riesgo resulta.

$$h(t) = \frac{1}{0.94} e^{\left(\frac{-7.93}{0.94}\right)} t^{\frac{1-0.94}{0.94}} e^{[-1.063(-0.087x_3 - 0.019x_6 + 0.114x_7 - 0.368x_8 - 0.014x_9)]}$$

$$h(t) = 2.307x10^{-6} t^{0.063} e^{[-1.063(-0.087x_3 - 0.019x_6 + 0.114x_7 - 0.368x_8 - 0.014x_9)]}$$

Ahora obtendremos la función de supervivencia, la cual tiene la siguiente expresión.

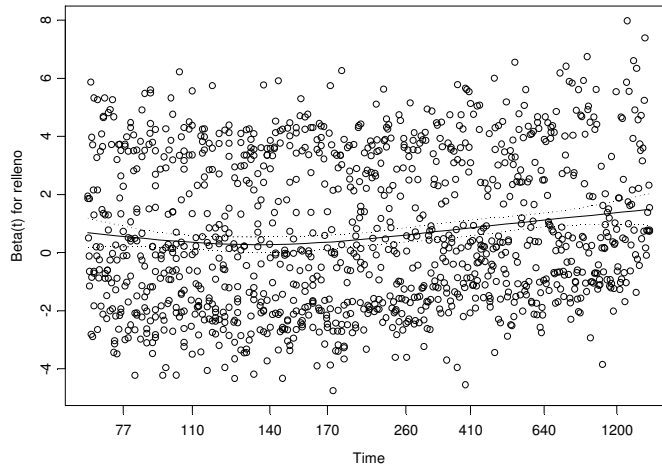
$$S(t) = e^{\left[-(\lambda t)^p e^{\left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right)}\right]} \quad (7.48)$$

$$S(t) = e^{\left(-e^{\frac{-7.93}{0.94}} x t^{\frac{1}{0.94}}\right)^* e^{[-1.063(-0.087x_3 - 0.019x_6 + 0.114x_7 - 0.368x_8 - 0.014x_9)]}}$$

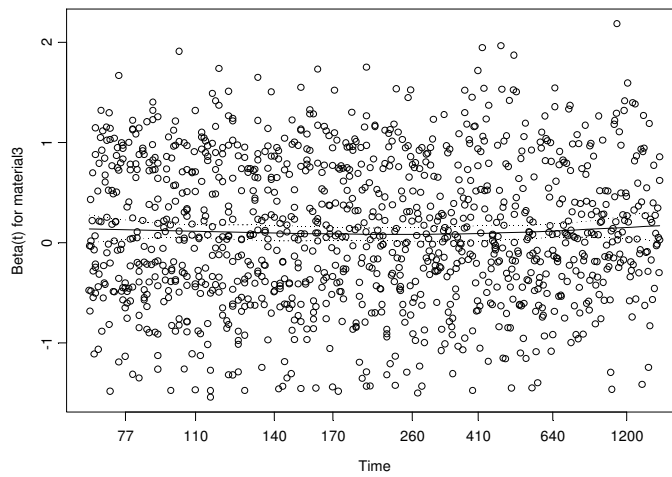
$$S(t) = e^{\left(-2.16x10^{-4} * t^{1.063}\right)^* e^{[-1.063(-0.087x_3 - 0.019x_6 + 0.114x_7 - 0.368x_8 - 0.014x_9)]}}$$

## 7.5 Valoración de los residuos en el análisis de supervivencia

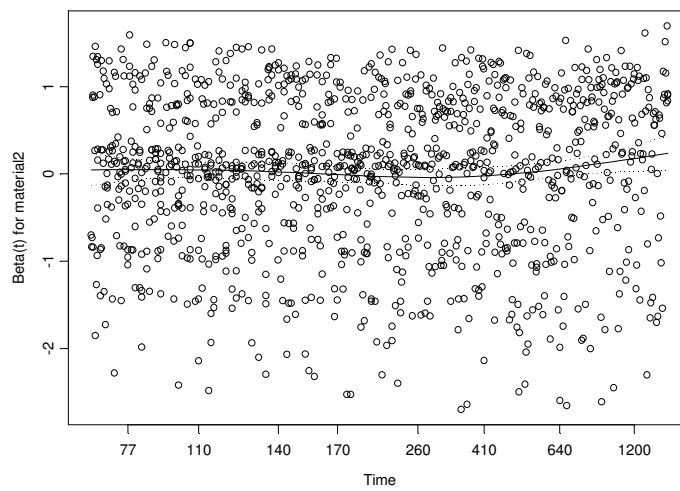
Una de las ventajas que han surgido del enfoque del análisis de supervivencia, es la posibilidad de efectuar análisis de residuos (Andersen *et al.* 1993, Fleming y Harrington 1991, Therneau y Grambsch, 2000, Therneau *et al.* 1990). Una de las principales hipótesis del modelo de Cox, es precisamente que la función de riesgo sea proporcional, dado dos perfiles de cambio de estado diferentes y por tanto, se debe mantener a lo largo del tiempo. Esto se puede verificar gráficamente. Para facilitar la interpretación de estos gráficos se suele superponer una curva de ajuste, utilizando alguna función de ajuste local de alisado.



*Figura 7. 20 Betas para la covariable relleno*



*Figura 7. 21 Betas para la covariable material3*



*Figura 7. 22 Betas para la covariable material2*

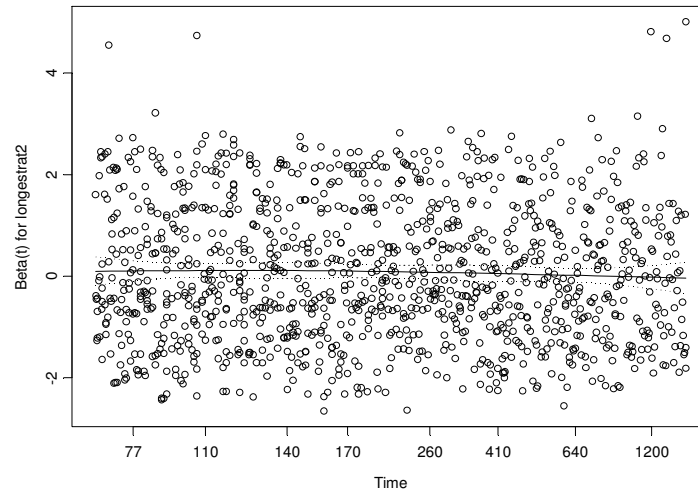


Figura 7. 23 Betas para la covariable longestrat2

Al agruparse los residuos de forma aleatoria a ambos lados del valor 0 del eje “y”, y al no observarse una tendencia con cambios bruscos, entonces puede observarse que no hay violación del supuesto de riesgo proporcional, de ahí puede confirmarse al observarse el siguiente resultado.

	<b>rho</b>	<b>chisq</b>	<b>p</b>
traf	0.03778	0.7084	0.19
canprox	-0.0829	0.2154	0.37
tiposuelo	-0.0394	0.0187	0.59
relleno	0.1807	0.9952	0.15
profundidad	0.1404	0.9013	0.31
lnlong	0.0136	0.1348	0.44
Indiam	0.1245	0.0254	0.27
material1	0.0872	0.0315	0.30
material2	0.0323	0.2544	0.26
material3	0.0281	0.7423	0.21
longestrat1	-0.0196	0.3152	0.22
longestrat2	-0.0235	0.5416	0.33
Global	NA	3.0408	0.52

Tabla 7. 15 Resultados de la comprobación del supuesto de riesgo proporcional

Por ser todos los valores calculados de p mayores al 5%, se confirma el supuesto de riesgo proporcional de forma global y para cada covariable analizada.

---

---

## 8 Validación del modelo de Weibull

Para determinar el número de roturas para un tiempo determinado, en este caso, para nosotros el periodo de tiempo será de dos años del 2007 al 2008, son los años de los cuales se cuenta con datos. Para tal propósito se utilizará el modelo de Weibull acelerado (Rostum, 2000), donde se asume que las covariables aceleran el tiempo de fallos, como se ha comprobado en los resultados obtenidos en los análisis previos. Una vez que se obtienen los resultados del número de fallos esperado, se compara con los fallos observados.

Esto será primero realizado para cada estrato definido en el apartado 6.1, mostrando a manera de resumen los resultados obtenidos para cada estrato.

La validación del modelo de Weibull, se lleva a cabo primero para el estrato general; es decir para todos los individuos sin estratificar, seguidamente para las tuberías de acero galvanizado (FOGA), después para el estrato de las tuberías conjuntas de asbesto cemento y polietileno.

El modelo sobre estima ligeramente de manera global, los resultados de los fallos esperados, respecto a los fallos observados. Los resultados son comparados con los fallos observados, a través de la metodología desarrollada por Yves Le Gatt (Le Gatt, 2002) para el Cemagref, dicha metodología es llamada índice de beneficio. Las tuberías son listadas, basadas en el orden de priorización del número de fallos esperados. En la misma tabla se agrega el número de roturas observadas, con el objetivo de realizar la comparación entre ambas.

De los resultados obtenidos, se calcula el porcentaje de roturas que se pueden evitar, al reemplazar cierto porcentaje de la longitud de la tubería. En la tabla 7.16 se muestra un estrato de los resultados de los cálculos señalados.

ID	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	4.7860	3	3	1	0.551	0.340
T391	4.7003	4	7	2	1.287	0.680
T10	4.5982	5	12	3	2.206	1.020
T398	4.4945	4	16	4	2.941	1.361
T393	4.4621	2	18	5	3.309	1.701
T449	4.3335	6	24	6	4.412	2.041
T433	4.3278	3	27	7	4.963	2.381
T463	4.2894	4	31	8	5.699	2.721
T396	4.2870	2	33	9	6.066	3.061
T434	4.2794	4	37	10	6.801	3.401
T25	4.2755	1	38	11	6.985	3.741
T302	4.2631	3	41	12	7.537	4.082
T451	4.2468	5	46	13	8.456	4.422
T287	4.2310	4	50	14	9.191	4.762
T394	4.2157	3	53	15	9.743	5.102
T21	4.2097	4	57	16	10.478	5.442
T52	4.2006	2	59	17	10.846	5.782

T234	4.1774	4	63	18	11.581	6.122
T271	4.0924	3	66	19	12.132	6.463
T436	4.0585	4	70	20	12.868	6.803
T116	4.0344	4	74	21	13.603	7.143
T288	4.0337	0	74	22	13.603	7.483
T303	4.0253	2	76	23	13.971	7.823
T454	4.0253	4	80	24	14.706	8.163
T23	3.9967	4	84	25	15.441	8.503
T392	3.9901	3	87	26	15.993	8.844
T397	3.9451	2	89	27	16.360	9.184
T18	3.9127	2	91	28	16.728	9.524
T72	3.8679	1	92	29	16.912	9.864
T65	3.8278	3	95	30	17.463	10.204
T119	3.8115	4	99	31	18.199	10.544
T435	3.7687	2	101	32	18.566	10.884
T126A	3.7290	4	105	33	19.301	11.224
T432	3.7269	4	109	34	20.037	11.565
T395	3.7250	2	111	35	20.404	11.905
T2A4	3.7193	3	114	36	20.956	12.245
T464	3.6747	4	118	37	21.691	12.585
T19	3.6684	1	119	38	21.875	12.925
T20	3.6605	3	122	39	22.426	13.265
T85	3.6338	3	125	40	22.978	13.605
T457	3.6082	4	129	41	23.713	13.946
T469	3.5902	2	131	42	24.081	14.286
T47A	3.5671	3	134	43	24.632	14.626
T456	3.5668	3	137	44	25.184	14.966
T438	3.5617	4	141	45	25.919	15.306
T60A	3.5311	2	143	46	26.287	15.646
T16	3.5090	3	146	47	26.838	15.986
T64	3.4800	1	147	48	27.022	16.327
T105A	3.4779	1	148	49	27.206	16.667
T127A	3.4693	3	151	50	27.757	17.007
T437	3.4408	5	156	51	28.676	17.347
T424	3.4265	4	160	52	29.412	17.687
T106	3.4242	2	162	53	29.779	18.027
T29A	3.4208	4	166	54	30.515	18.367
T81	3.3911	3	169	55	31.066	18.707
T78A	3.3836	2	171	56	31.434	19.048
T26A	3.3778	2	173	57	31.801	19.388

*Tabla 7. 16 Tabla Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar.*

Es necesario hacer una apreciación respecto al orden de priorización, sobre todo cuando el número de fallos esperado es pequeño, y si dos o más tuberías tienen el mismo número de fallos esperados; del cual depende el orden de priorización. Las tuberías con el mismo número de fallos esperados, podrán estar en un nivel más o menos importante, dependiendo de la aleatoriedad al momento de computar los resultados, para comprender mejor lo anterior, lo ilustraremos con un ejemplo.

El ejemplo consta por ejemplo del extracto de una tabla hipotética, con un total de 10 roturas y 200 tuberías, pero solo 80 valores diferentes para el número de fallos

esperados (los otros son exactamente igual), y son mostrados en la tabla 7.17. El orden o la posición de una parte de la tabla son mostradas con las tuberías, que tienen el mismo número de fallos esperados y la ocurrencia de los fallos observados. La priorización es basada en el número de fallos esperados, como comentamos. Porque ellos son iguales, cada una de estas tuberías podrá ocupar cualquiera de los sitios en la priorización, el orden se obtiene en la siguiente tabla.

ID	Número de fallos observados	Número de fallos esperados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T13	0	0.213	6	12	60	6
T25	0	0.213	6	13	60	6.5
T30	0	0.213	6	14	60	7
T52	1	0.213	7	15	70	7.5
T67	1	0.213	8	16	80	8

*Tabla 7. 17 Caso 1 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados*

ID	Número de fallos observados	Número de fallos esperados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T67	1	0.213	7	12	70	6
T52	1	0.213	8	13	80	6.5
T30	0	0.213	8	14	80	7
T25	0	0.213	8	15	80	7.5
T13	0	0.213	8	16	80	8

*Tabla 7. 18 Caso 2 para el índice de beneficio, con el número de fallos igualados*

Dependiendo del orden de priorización (aleatorio) de los que se encuentran igualados, la tabla 7.17 indica que el 60% de los fallos son evitados, si el 6% de las tuberías que se encuentran en primer sitio son reemplazadas; el porcentaje de roturas o fallos evitados asciende al 80% en la tabla en la tabla 7.18, lo cual es una notable diferencia. El porcentaje de roturas evitadas, depende del orden de priorización aleatorio de las tuberías que son iguales. Por tal motivo, en aquellos grupos de tuberías donde el número de fallos o roturas son pequeñas, una o dos roturas pueden influir sustancialmente en los resultados. En nuestro caso son pocas las tuberías que cuentan con el número de fallos esperados igual, además que la población de las tuberías tienen un número considerable de fallos, por tal motivo se toma con reserva como puede influir en los resultados finales.

ID	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	4.7860	3	3	1	0.551	0.340
T391	4.7003	4	7	2	1.287	0.680
T10	4.5982	5	12	3	2.206	1.020
T398	4.4945	4	16	4	2.941	1.361
T393	4.4621	2	18	5	3.309	1.701
T449	4.3335	6	24	6	4.412	2.041
T433	4.3278	3	27	7	4.963	2.381



T463	4.2894	4	31	8	5.699	2.721
T396	4.2870	2	33	9	6.066	3.061
T434	4.2794	4	37	10	6.801	3.401
T25	4.2755	1	38	11	6.985	3.741
T302	4.2631	3	41	12	7.537	4.082
T451	4.2468	5	46	13	8.456	4.422
T287	4.2310	4	50	14	9.191	4.762
T394	4.2157	3	53	15	9.743	5.102
T21	4.2097	4	57	16	10.478	5.442
T52	4.2006	2	59	17	10.846	5.782
T234	4.1774	4	63	18	11.581	6.122
T271	4.0924	3	66	19	12.132	6.463
T436	4.0585	4	70	20	12.868	6.803
T116	4.0344	4	74	21	13.603	7.143
T288	4.0337	0	74	22	13.603	7.483
T303	4.0253	2	76	23	13.971	7.823
T454	4.0253	4	80	24	14.706	8.163
T23	3.9967	4	84	25	15.441	8.503
T392	3.9901	3	87	26	15.993	8.844
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T29	2.7991	1	233	82	42.831	27.891
T281	2.7916	3	236	83	43.382	28.231
T63	2.7724	2	238	84	43.750	28.571
T53	2.7724	3	241	85	44.301	28.912
T30	2.7724	2	243	86	44.669	29.252
T35	2.7724	2	245	87	45.037	29.592
T37	2.7545	4	249	88	45.772	29.932
T34	2.7260	4	253	89	46.507	30.272
T67A	2.7058	4	257	90	47.243	30.612
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T455	2.3371	4	295	108	54.228	36.735
T106A	2.3271	2	297	109	54.596	37.075
T129A	2.3271	2	299	110	54.963	37.415
T429	2.3098	3	302	111	55.515	37.755
T223	2.2964	2	304	112	55.882	38.095
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

Tabla 7. 19 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, sin modificar.

Para corregir lo anterior, se realiza una nueva interpretación que es mostrada en las tablas siguientes, en donde la modificación de los resultados se muestra en negritas, esta nueva priorización es independiente del orden de priorización de las tuberías “iguales”.

ID	Número de fallos observados	Número de fallos esperados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esp.	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemp.	Número de fallos acum. obs.	Prior. en base del núm. de fallos esp.	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplaz
T13	0	0.213	6	12	60	6	8	16	80	8
T25	0	0.213	6	13	60	6.5	8	16	80	8
T30	0	0.213	6	14	60	7	8	16	80	8
T52	1	0.213	7	15	70	7.5	8	16	80	8
T67	1	0.213	8	16	80	8	8	16	80	8

*Tabla 7. 20 Caso 1 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados*

ID	Número de fallos observados	Número de fallos esperados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esp.	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemp.	Número de fallos acum. obs.	Prior. en base del núm. de fallos esp.	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplaz
T67	1	0.213	7	12	70	6	8	16	80	8
T52	1	0.213	8	13	80	6.5	8	16	80	8
T30	0	0.213	8	14	80	7	8	16	80	8
T25	0	0.213	8	15	80	7.5	8	16	80	8
T13	0	0.213	8	16	80	8	8	16	80	8

*Tabla 7. 21 Caso 2 para el índice de beneficio modificado, con el número de fallos igualados*

Los resultados se pueden interpretar de la siguiente manera; si el 8% de las tuberías son reemplazadas, el 80% de las roturas son evitadas. La aleatoriedad y los resultados erróneos dados por la primera tabla (el 6% de las tuberías reemplazadas evitan el 80% de las roturas, el 9% de las tuberías reemplazadas evitan el 80% de las roturas, respectivamente) no son consideradas.

Como primera aproximación se considera interesante los señalamientos realizados, de tal manera que el índice de beneficio, resulta como se muestra el estrato en la siguiente tabla. Las tablas completas tanto del caso 1 y caso 2 del índice de beneficio, se muestran en el **anexo 3**.

ID	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	4.7860	3	3	1	0.551	0.340
T391	4.7003	4	7	2	1.287	0.680
T10	4.5982	5	12	3	2.206	1.020
T398	4.4945	4	16	4	2.941	1.361
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T116	4.0344	4	74	19	13.603	7.143
T288	4.0337	0	74	20	13.603	7.483
T303	4.0253	2	80	21	14.706	7.823
T454	4.0253	4	80	21	14.706	8.163
T23	3.9967	4	84	22	15.441	8.503
T392	3.9901	3	87	23	15.993	8.844
T397	3.9451	2	89	24	16.360	9.184

T18	3.9127	2	91	25	16.728	9.524
T72	3.8679	1	92	26	16.912	9.864
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
T29	2.7991	1	233	79	42.831	27.891
T281	2.7916	3	236	80	43.382	28.231
T63	2.7724	2	245	81	45.037	28.571
T53	2.7724	3	245	81	45.037	28.912
T30	2.7724	2	245	81	45.037	29.252
T35	2.7724	2	245	81	45.037	29.932
T37	2.7545	4	249	82	45.772	29.932
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
T455	2.3371	4	295	102	54.228	36.735
T106A	2.3271	2	299	103	54.963	37.075
T129A	2.3271	2	299	103	54.963	37.415
T429	2.3098	3	302	104	55.515	38.095
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
T69	1.6858	2	375	139	68.934	49.660
T407	1.6581	2	377	140	69.301	50.000
T120	1.6519	3	382	141	70.221	50.340
T233	1.6519	2	382	141	70.221	50.680
T296	1.6464	4	386	142	70.956	51.020
T390	1.6412	0	386	143	70.956	51.361
T47	1.6375	0	386	144	70.956	52.041
T77A	1.6364	2	388	145	71.324	52.041
T63A	1.6294	3	391	146	71.875	52.381
T122	1.6209	3	394	147	72.426	52.721
T117	1.6088	2	396	148	72.794	53.061
T7A	1.5997	2	400	149	73.529	53.741
T9A	1.5997	2	400	149	73.529	53.741
T6A	1.5914	1	401	150	73.713	54.082
T298	1.5872	2	408	151	75.000	55.102
T89	1.5872	3	408	151	75.000	55.102
T96	1.5872	2	408	151	75.000	55.102
T79A	1.5870	3	411	152	75.551	55.442
T443	1.5852	0	411	153	75.551	55.782

Tabla 7. 22 Índice de beneficio todos los individuos sin estratificar, modificada.

En base a los comentarios anteriores, es conveniente comparar los resultados obtenidos con el índice de beneficio base, en similar número de roturas evitadas. Todas las tablas pertenecientes a una misma población, tienen acceso para comparar con este respecto. Una grafica podrá ilustrar mejor estos resultados. A continuación se muestra dos figuras, la primera con todas las tuberías de la población considerada, una segunda grafica con aproximadamente el 10% de las tuberías en riesgo. Si realizamos la

comparación de las curvas con los datos completos (100%), nos ofrece una perspectiva de la tendencia global, pero el 10% de la curva es la herramienta de interés para la toma de decisiones, con el objetivo de identificar las tuberías de mayor riesgo.

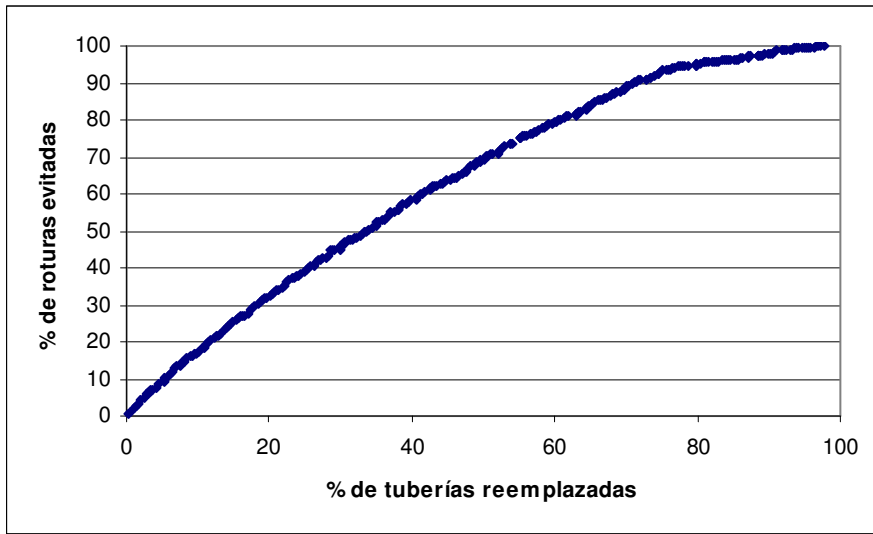


Figura 7. 24 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 100% de los individuos

Aquí se muestra la tendencia global del porcentaje de las tuberías reemplazadas versus las roturas evitadas, con el 100% de las tuberías

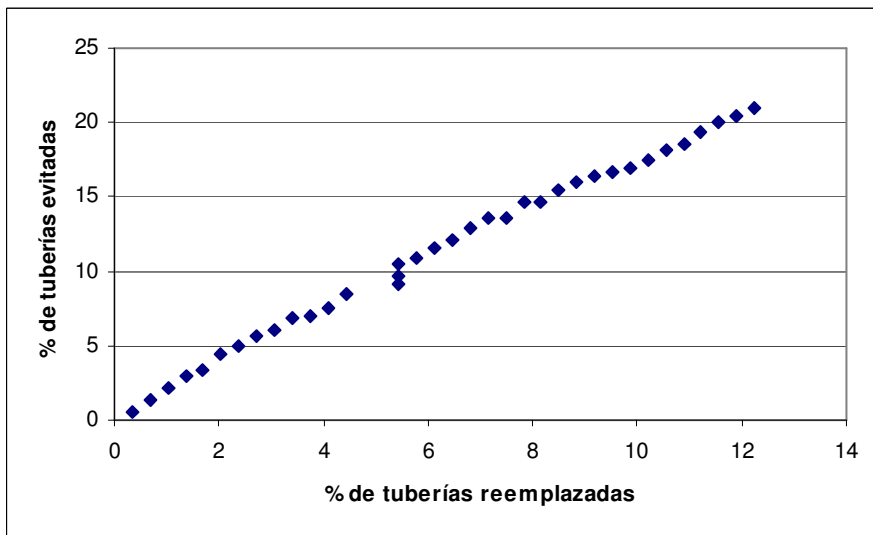


Figura 7. 25 Grafica Índice de beneficio sin estratificación, con el 10% de los individuos

Se realiza el cálculo correspondiente para las tuberías de acero galvanizado (FOGA), en la tabla 7.23 se muestra un extracto de los resultados obtenidos, en el **anexo 3** se muestra los resultados completos.

ID Serie	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	3.8092	3	3	1	1.099	0.787
T434	3.6234	4	7	2	2.564	1.575
T424	3.5427	4	11	3	4.029	2.362
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T52	3.0114	2	68	18	24.908	14.173
T13	3.0061	5	73	19	26.740	14.961
T287	2.9551	4	83	20	30.403	15.748
T303	2.9551	2	83	20	30.403	15.748
T454	2.9551	4	83	20	30.403	15.748
T451	2.9247	5	88	21	32.234	16.535
T393	2.9018	2	90	22	32.967	17.323
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T17	1.3801	1	245	98	89.744	77.165
T399	1.2633	1	253	106	92.674	83.465
T276	1.2558	0	254	107	93.040	84.252
T279	1.2558	1	254	107	93.040	84.252
T55	1.2558	0	254	107	93.040	84.252
T26	1.2364	0	254	108	93.040	85.039
T38	1.2260	1	255	109	93.407	85.827
T41	1.2260	0	255	109	93.407	85.827
T43	1.2108	1	256	110	93.773	86.614
T44	1.2046	1	257	110	94.139	86.614
T409	1.1986	1	258	111	94.505	87.402
T411	1.1986	0	258	111	94.505	87.402
T265	1.1956	0	258	112	94.505	88.189
T448	1.1802	1	259	113	94.872	88.976
T444	1.1584	2	261	114	95.604	89.764
T445	1.1584	0	261	114	95.604	89.764
T278	1.1028	1	263	118	96.337	92.913
T54	1.0834	1	264	119	96.703	93.701
T72	1.0824	1	265	120	97.070	94.488
T413	1.0650	0	266	121	97.436	95.276
T62	1.0650	1	266	122	97.436	96.063
T258	1.0582	1	267	123	97.802	96.850
T14	1.0531	1	268	124	98.168	97.638
T407	1.0459	2	270	125	98.901	98.425
T18	1.0270	2	272	126	99.634	99.213
T15	1.0199	1	273	127	100.000	100.000
<b>Total</b>	<b>316.0841</b>	<b>273</b>				

Tabla 7. 23 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de FOGA

De la misma tabla se realizan las graficas del índice de beneficio, para observar la comparación de la tendencia con el 100% de las tuberías y con el 10% de las mismas. Las graficas que nos muestran los resultados son las siguientes:

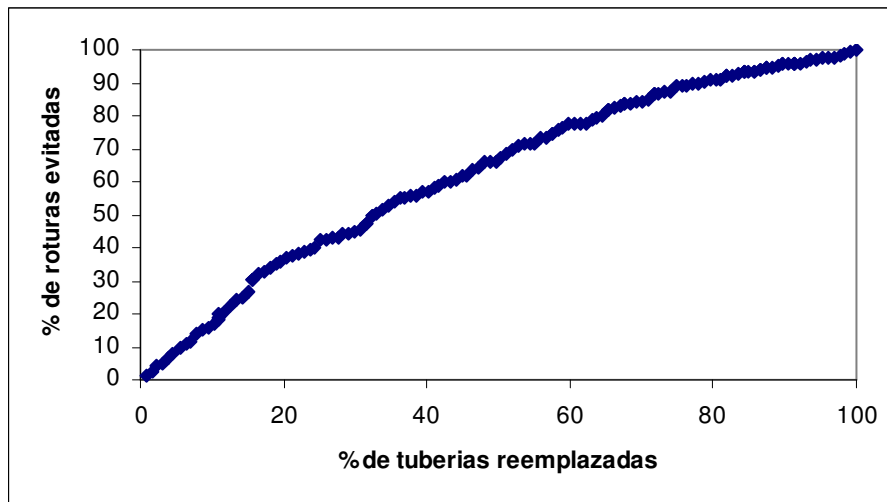


Figura 7. 26 Gráfica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 100% de los individuos

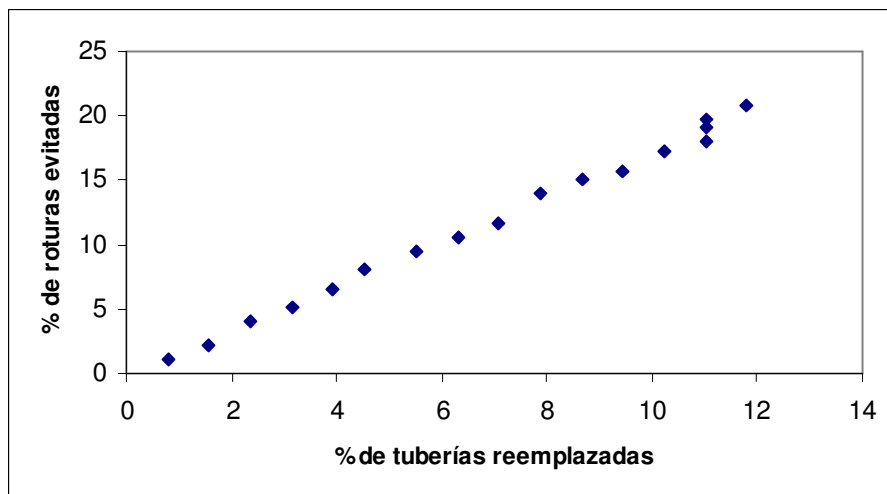


Figura 7. 27 Gráfica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de FOGA, con el 10% de los individuos

Como podemos observar el modelo sobreestima el número de fallos, el valor se incrementa, en comparación con los resultados obtenidos con toda la población sin estratificar. Se realiza a continuación el cálculo para el estrato de las tuberías conjuntas de asbesto cemento y polietileno.

ID	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	4.6479	3	3	1	0.591	0.476
T391	4.5977	4	7	2	1.378	0.952
T10	4.4177	5	12	3	2.362	1.429
T398	4.3542	4	16	4	3.150	1.905
T393	4.3172	2	18	5	3.543	2.381
T449	4.1732	6	24	6	4.724	2.857

T433	4.1670	3	27	7	5.315	3.333
T463	4.1250	4	31	8	6.102	3.810
T396	4.1223	2	33	9	6.496	4.286
T434	4.1141	4	37	10	7.283	4.762
T25	4.1098	1	38	11	7.480	5.238
T302	4.0963	3	41	12	8.071	5.714
T451	4.0787	5	46	13	9.055	6.190
T287	4.0616	4	56	14	11.024	6.667
T303	4.0616	2	56	14	11.024	6.667
T454	4.0616	4	56	14	11.024	6.667
T394	4.0453	3	59	15	11.614	7.143
T21	4.0388	4	63	16	12.402	7.619
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T296	2.1009	4	330	111	64.961	52.857
T75	2.0988	3	333	112	65.551	53.333
T292	1.4173	2	474	177	93.307	84.286
T37A	1.4095	1	477	178	93.898	84.762
T49A	1.4095	2	477	178	93.898	84.762
T110	1.3998	1	478	179	94.094	85.238
T101	1.3913	1	481	180	94.685	85.714
T98	1.3913	2	481	180	94.685	85.714
T125	1.3845	1	482	181	94.882	86.190
T78	1.3763	3	485	182	95.472	86.667
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
T43A	1.1486	1	501	205	98.622	97.619
T84B	1.1125	2	503	206	99.016	98.095
T115A	1.0859	0	503	207	99.016	98.571
T135	1.0844	1	504	208	99.213	99.048
T299	1.0711	2	506	209	99.606	99.524
T127	1.0195	2	508	210	100.000	100.000
<b>Total</b>	<b>550.2465</b>	<b>508</b>				

*Tabla 7. 24 Índice de beneficio para el estrato de las tuberías de asbesto cemento y polietileno*

Al igual que para el estrato de todos los individuos sin estratificar, y del estrato del material de FOGA, se realizan las graficas del índice de beneficio, para el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, para observar la comparación de la tendencia con el 100% de las tuberías y con el 10%, las figuras 7.28 y 7.29 respectivamente, nos muestran los resultados obtenidos.

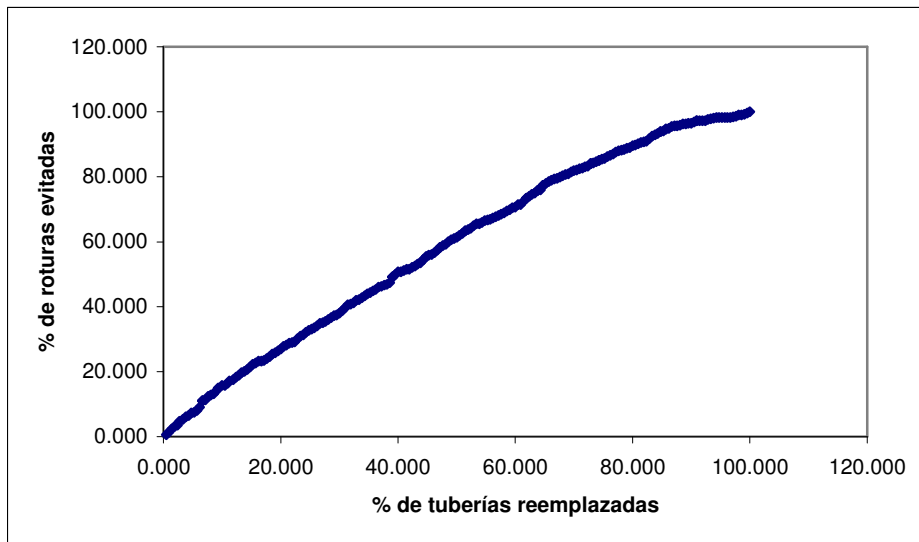


Figura 7. 28 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 100% de los individuos

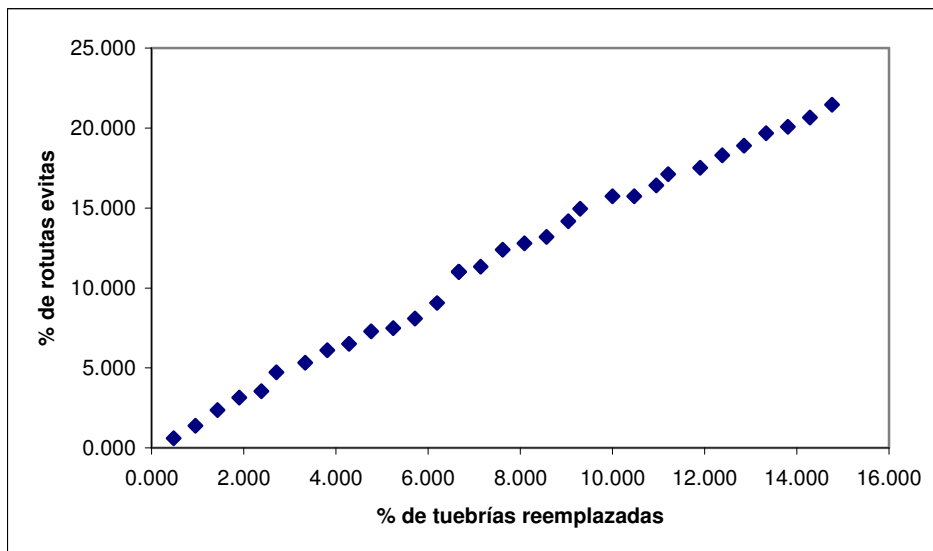


Figura 7. 29 Grafica Índice de beneficio con el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno, con el 10% de los individuos

### 8.1 Conclusión de los resultados con el modelo de Weibull

En base a los resultados obtenidos, podemos concluir que el modelo, sobreestima en general el número de fallos respecto a los observados, dicha sobreestimación, varía según el número de individuos o tuberías como sucedió en los diversos estratos, donde precisamente varía el número de tuberías, pero la sobreestimación se mantiene en todos los casos con la variación en el porcentaje. Respecto al método gráfico para comparar la tendencia en el índice de beneficio, es importante llevar a cabo dicho contraste. Porque como ya se observó, para la toma de decisiones es preciso analizar de manera más detallada, la tendencia y a su vez la priorización en el orden para la rehabilitación.



## 9 El Índice de Evaluación de las Condiciones Físicas

Los resultados previos obtenidos con una metodología basada en una simulación de Weibull, observamos que la estratificación en los fallos previos no mejora los resultados, que la estratificación sobre el material sólo los mejora ligeramente de forma marginal, y que ajustando un conjunto de datos sin estratificar para un modelo de Weibull PHM, es una opción válida. Esto abre la puerta a un método completamente nuevo, cuando el objetivo de una empresa de agua, es tomar la decisión de priorizar las tuberías por el riesgo de fallo; se puede emplear una población entera que puede ser calculada con un modelo de Cox.

Una mayor ventaja de un modelo de riesgo proporcional de Cox, es que el índice del riesgo de dos tuberías permanece constante sobre el tiempo (riesgo proporcional). Por lo tanto como se ha mencionado previamente, las tuberías pueden ser priorizadas en base a sus factores de riesgo, la función de línea base  $h_0(t)$  no necesariamente debe ser explícitas.

Por ejemplo, una tubería A tiene las siguientes características, basadas en el modelo de todos los individuos con roturas en el periodo 2000-2006

Relleno adecuado ( $x_1=1$ ), no existen canalizaciones próximas ( $x_3=0$ ), ninguna rotura ( $x_4=x_5=x_6=x_7=0$ ), una longitud de 140 m ( $x_8=\ln 140$ ), el diámetro es de 75 m ( $x_9=\ln 75$ ), Fundición ( $x_{14}=1$ ).

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.649	1.913	0.0720	0.0e+000
canprox	-0.230	0.795	0.0919	1.2e-002
nfp4	0.691	1.997	0.0961	6.3e-013
nfp2	0.763	2.145	0.1088	2.3e-012
nfp3	0.846	2.330	0.1144	1.4e-013
nfp1	0.906	2.475	0.1018	2.0e-012
lnlong	0.544	1.722	0.0631	1.1e-016
lndiam	0.242	1.274	0.0718	7.5e-004
mat2	-0.794	0.452	0.1111	8.6e-013
mat3	0.313	1.368	0.0853	2.5e-004
mat4	0.569	1.767	0.0901	2.7e-010

$$h(t) = h_0(t)e^{[0.649 + 0.544(\ln 140) + 0.242(\ln 75) + 0.313]} = h_0(t)109.40$$

La tubería B tiene las siguientes características.

Relleno adecuado ( $x_1=1$ ), la tubería ha sufrido dos roturas ( $x_5=1$ ), una longitud de 110 m ( $x_8=\ln 110$ ), el diámetro es de 100 m ( $x_9=\ln 100$ ), y el material es de polietileno ( $x_{15}=1$ ).

$$h(t) = h_0(t)e^{[0.649 - 0.763 + 0.544(\ln 110) + 0.242(\ln 100) + 0.569]} = h_0(t)161.34$$

$$h(t) = h_0(t)e[ICCF] = h_0(t)161.34$$

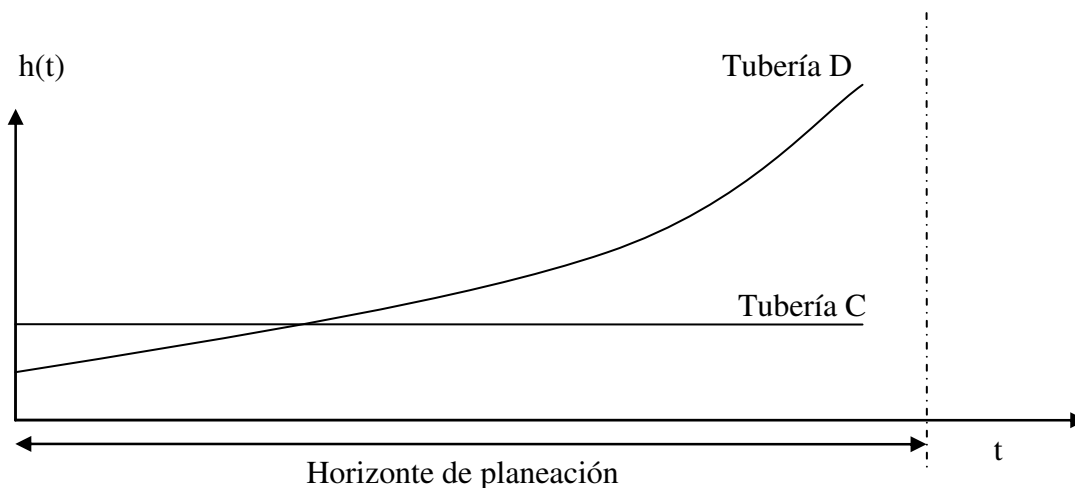
Por lo tanto, en el tiempo presente (y hasta la próxima rotura para cualesquier de la tubería) la tubería B es 1.47 veces más propenso a sufrir una rotura que la tubería A. El termino en paréntesis es constante y específico para cada tubería, de tal manera que lo

llamaremos Índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF); para los datos que se ajusten a un modelo de riesgo proporcional, y no experimentan ningún cambio en su factor de riesgo, un IECF indica el riesgo relativo aparente para cada individuo.

Un Índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF), no puede ser empleado en una base de datos, que no puede ser ajustada por un modelo de riesgo proporcional. Por ejemplo, las tuberías C y D ilustran lo anterior para una base de datos; al momento de la toma de decisión, la tubería C ha alcanzado un índice de rotura que es superior a la tubería D.

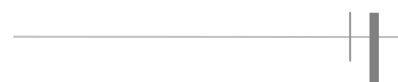
De tal manera, la curva del índice de roturas para la tubería C permanece constante sobre el horizonte de planeación (modelo exponencial), mientras que la tubería D experimenta una forma de degradación (riesgo no proporcional), resultando en un paso el incremento del índice de rotura.

El número de roturas es la integral de  $h(t)$ , también ilustrada por la superficie bajo la curva. Como un resultado sobre el horizonte de planeación considerado, la tubería D podrá experimentar un largo número de roturas, más que la tubería C y por lo tanto tendrá que ser reemplazada primero, en la figura 7.30 se ilustra lo comentado.



*Figura 7. 30 Funciones del índice de riesgo de dos tuberías no modelado por un modelo de riesgo proporcional; la tubería C (constante) y la tubería D (incrementándose).*

Por otro lado, si los datos pueden ser modelados por un modelo de riesgo proporcional, todas las tuberías que pertenecen a un mismo estrato y no experimentan ningún cambio en sus factores de riesgo, durante el horizonte de planeación tienen una función del índice de riesgo distinta, pero esta permanece proporcional sobre el tiempo. Esto a su vez, significa que si no hay ningún cambio del factor de riesgo, durante el horizonte de planeación y dentro de un mismo estrato, la tubería que tiene el índice de rotura más alto en el principio del horizonte de planeación (la curva E en la figura 7.31), seguirá manteniendo el índice más alto, y es también el que experimentará el número más alto de roturas.



Esto es ilustrado en la figura 7.31, notemos que como se menciono anteriormente, la proporcionalidad en el riesgo es representado gráficamente por las curvas paralelas  $H(t)$ ; las curvas  $h(t)$  representadas no son paralelas pero son proporcionales.

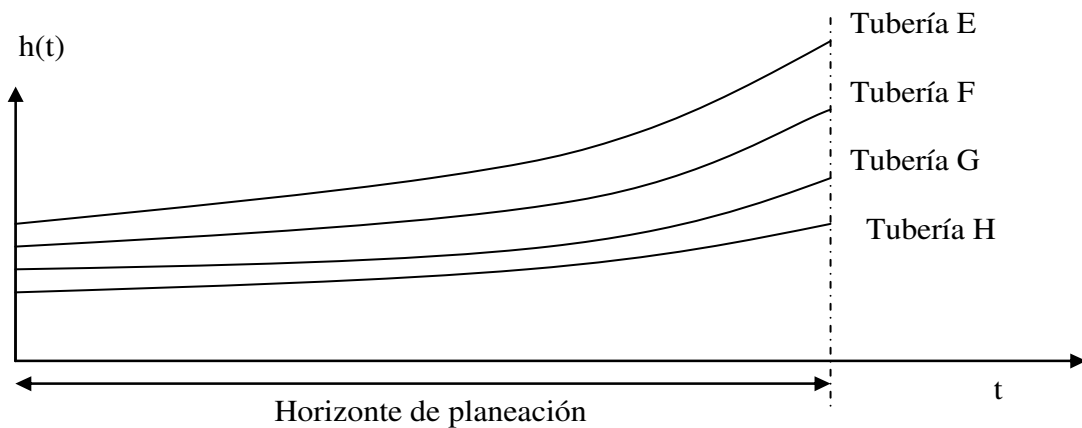


Figura 7. 31 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; con ningún cambio en los factores de riesgo.

Necesitaremos asumir hipótesis en la utilización de un IECF, ya que estos son obstáculos teóricos. La siguiente hipótesis que se asume, es que no se produce ningún cambio en todos los factores de riesgo durante el horizonte de planeación. Por lo tanto se asume que las tuberías no se rompen durante el horizonte de planeación, ya que en el actual modelo el número de roturas previas es un factor de riesgo. Esto en la realidad tal vez no suceda, y puede de hecho tener un impacto en los resultados como se verá en el siguiente ejemplo.

La figura 7.31 es ajustada con las siguientes consideraciones.

- El valor del factor de riesgo del número de fallos previos observados, es agrupado en tres categorías: ninguna rotura, una rotura, dos roturas o más.
- Las tuberías son definidas como:
  - ⇒ Tubería E:  $nfpo=2$ ; la función de riesgo permanece igual después de cada rotura siguiendo la segunda rotura.
  - ⇒ Tubería F:  $nfpo=1$ ; la segunda rotura no ocurre durante el horizonte de planeación, otro factor de riesgo diferente de la tubería E.
  - ⇒ Tubería G:  $nfpo=1$ ; la segunda rotura ocurre durante el horizonte de planeación, otro factor de riesgo es similar a la tubería E. Esto significa que después la tubería G ha experimentado una segunda rotura, la función de riesgo “brinca” a la curva de la tubería E.

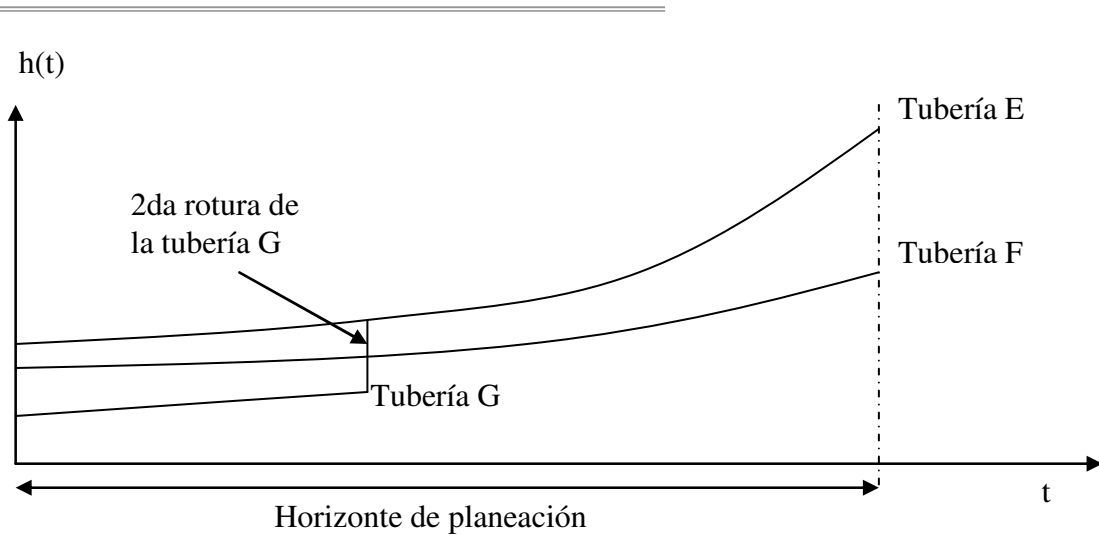


Figura 7. 32 Funciones del índice de riesgo de un grupo de tuberías, modelado por un modelo de riesgo proporcional; una tubería experimenta una rotura.

Comparando ahora la superficie bajo la curva de la tubería G, incluyendo el salto a la tubería E, después la segunda rotura y la superficie bajo la tubería F, ahora sucede que la tubería G experimenta un alto número de roturas. Este ejemplo muestra que la propiedad de los modelos de riesgo proporcional, no garantiza que puedan ser capaces de ordenar las tuberías, basadas en su función del índice de riesgo, y el principio del horizonte de planeación, puede complicar la utilización de un IECF.

Por lo tanto, se asume que pocas tuberías son afectadas por el cambio de la función del índice de riesgo, además que un IECF puede efectivamente predecir a corto plazo, las posibles roturas de las tuberías. Esto puede ser verificado mas adelante, cuando se realice el cálculo basado en el ajuste de las diferentes bases de datos. Ahora procederemos a calcular los IECF, para las diferentes variantes que venimos manejando.

**9.1 Todos los individuos 2000-2006**

Un programa es preparado en Visual Basic para calcular el IECF de cada tubería, basado en los modelos de riesgo proporcional de Cox, para la base de datos de siete años. La validación es realizada en los datos del periodo 2007-2008.

La formula para calcular el IECF es.

$$IECF_{2000-2006} = 0.649x_1 - 0.230x_3 + 0.691x_4 + 0.763x_5 + 0.846x_6 + 0.906x_7 + 0.544x_8 + 0.242x_9 - 0.794x_{13} + 0.313x_{14} + 0.569x_{15}$$

Definimos nuevamente las equis y son las siguientes:

- $x_1=1$  Si relleno = 1 (material no nativo) de lo contrario  $x_1=0$
- $x_2=1$  Si profundidad = 1 (profundidad fuera de norma) de lo contrario  $x_2=0$

- 
- $x_3=1$  Si canprox = 1 (existen canalizaciones proximas a las tuberías de distribución) de lo contrario  $x_3=0$   
 $x_4=1$  Si nfpo1= 1 (segmentos que han sufrido una rotura) de lo contrario  $x_4=0$   
 $x_5=1$  Si nfpo2 = 1 (segmentos que han sufrido dos rotura) de lo contrario  $x_5=0$   
 $x_6=1$  Si nfpo3= 1 (segmentos que han sufrido tres rotura) de lo contrario  $x_6=0$   
 $x_7=1$  Si nfpo4= 1 (segmentos que han sufrido cuatro o mas roturas) de lo contrario  $x_7=0$   
 Si estas no sufren ninguna rotura, esto significa que  $x_4, x_5, x_6, x_6 =0$   
 $x_8 =$  Ln(diam)  
 $x_9=$  Ln (long)  
 $x_{10}=1$  Si Edad1 = 1 (tuberías con 40 años de edad) de lo contrario  $x_{10}=0$   
 $x_{11}=1$  Si Edad2 = 1 (tuberías con 50 años de edad) de lo contrario  $x_{11}=0$   
 $x_{12}=1$  Si Edad3 = 1 (tuberías con 20 años de edad) de lo contrario  $x_{12}=0$   
 $x_{13}=1$  Si Mat1 = 1 (el segmento es de acero galvanizado) de lo contrario  $x_{13}=0$   
 $x_{14}=1$  Si Mat2 = 1 (el segmento es de fundición) de lo contrario  $x_{14}=0$   
 $x_{15}=1$  Si Mat3 = 1 (el segmento es de polietileno) de lo contrario  $x_{15}=0$

El índice del IECF es calculado. La tabla completa es mostrada en el anexo 3.

## 9.2 Estrato de las tuberías de acero galvanizado (FOGA)

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.529	1.70	0.112	2.2e-006
profundidad	0.411	1.51	0.120	6.3e-004
nfp1	0.629	1.88	0.165	1.4e-004
nfp2	0.638	1.89	0.154	1.4e-004
nfp3	0.725	2.06	0.185	8.6e-005
nfp4	0.869	2.38	0.154	1.9e-008
lnlong	0.434	1.54	0.088	8.2e-007
ln diam	0.461	1.59	0.104	8.6e-006

$$IECF_{FOGA} = 0.529x_1 - 0.411x_2 + 0.629x_4 + 0.638x_5 + 0.725x_6 + 0.869x_7 + 0.434x_8 + 0.461x_9$$

Es calculado el índice del IECF. La tabla completa es mostrada en el anexo 3.

---

---

### Estrato de las tuberías de Asbesto cemento y polietileno

relleno	0.3502	1.42	0.0928	3.7749	1.6e-004
nfp1	1.5129	4.54	0.1711	8.8407	0.0e+000
nfp2	1.3930	4.03	0.1765	7.8944	2.9e-015
nfp3	1.3394	3.82	0.1800	7.4393	1.0e-013
nfp4	1.1095	3.03	0.1555	7.1345	9.7e-013
lnlong	0.9311	2.54	0.1154	8.0663	6.7e-016
Indiam	0.0137	1.00	0.1287	0.0288	9.8e-001

$$IECF_{AC-POLIET} = 0.350x_1 + 1.109x_4 + 1.339x_5 + 1.393x_6 + 1.513x_7 + 0.931x_8 + 0.013x_9$$

Los resultados se muestran en el anexo 3.

### 9.3 Comparación entre métodos.

Es necesario, realizar una comparación entre las metodologías empleadas para la predicción de fallos, es decir del modelo de riesgo proporcional de Weibull y el método del Índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF). Para este propósito se generan las graficas correspondientes, con los valores de ambas metodologías.

La comparación se realiza para los distintos estratos que se han manejado, que son para el estrato de todos los individuos sin estratificar, para el estrato de las tuberías de acero galvanizado y para el estrato de las tuberías de asbesto-cemento. Las graficas para la población de todas las tuberías sin estratificar son las siguientes.

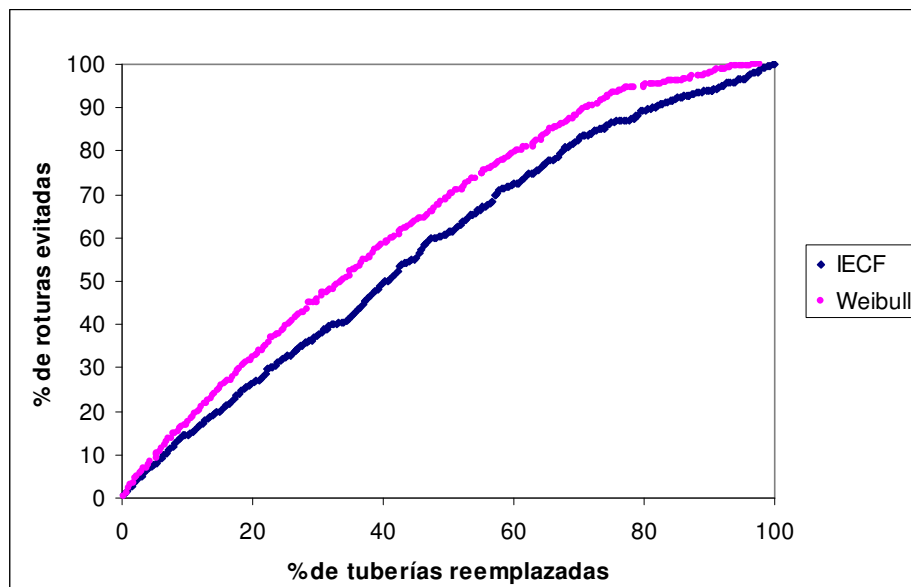


Figura 7. 33 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos.

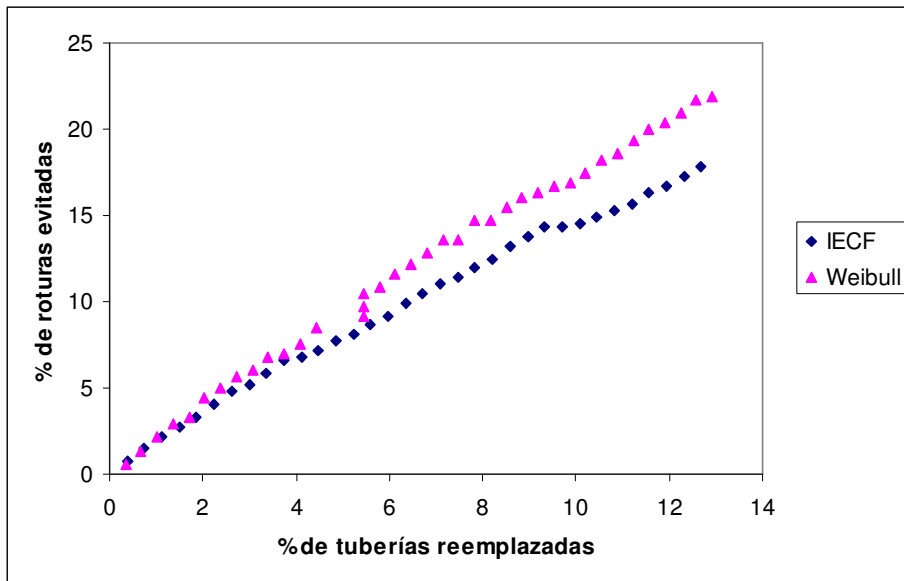


Figura 7. 34 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos.

Para el estrato de las tuberías de acero galvanizado (FOGA), las graficas de la comparación entre los métodos se muestran en la figuras 7.35 y 7.36.

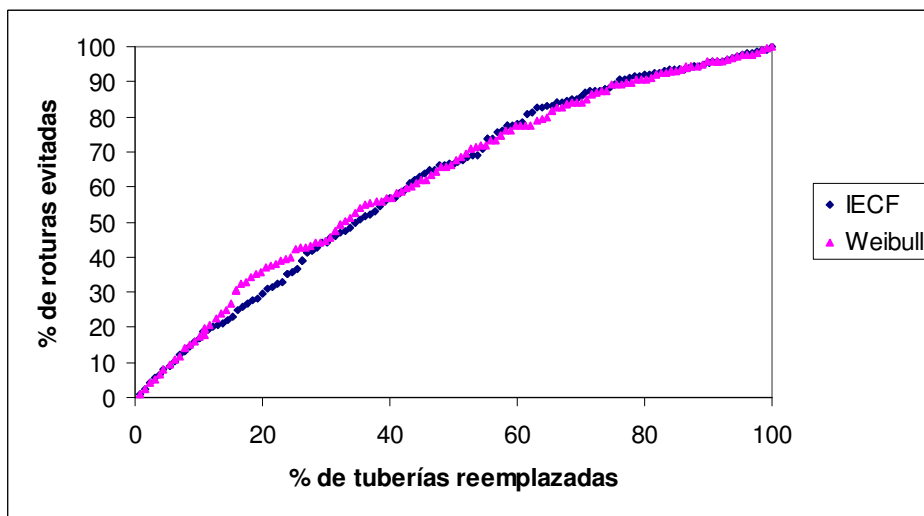


Figura 7. 35 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos.

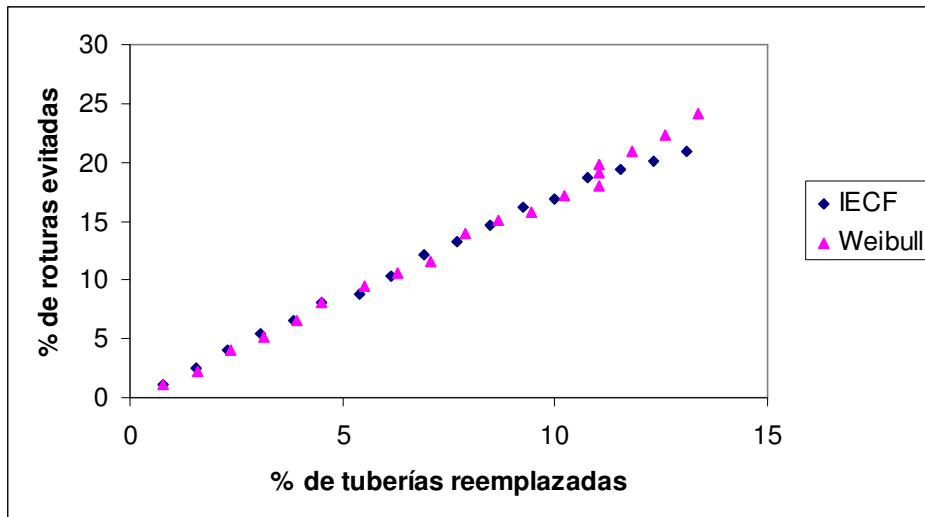


Figura 7. 36 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos.

En las figuras 7.37, 7.38 podemos observar la comparación de los métodos de WPHM y IECF, para el estrato de las tuberías de asbesto cemento.

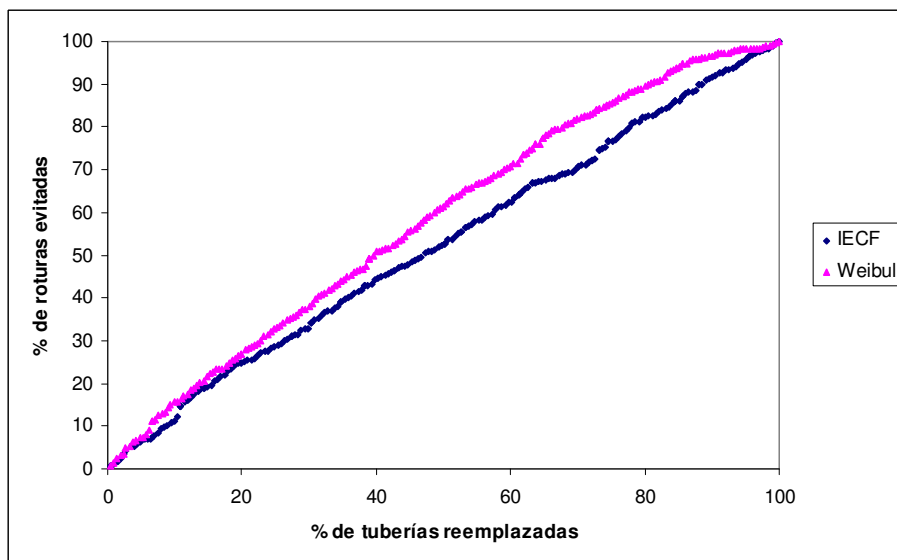


Figura 7. 37 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 100% de todos los individuos.



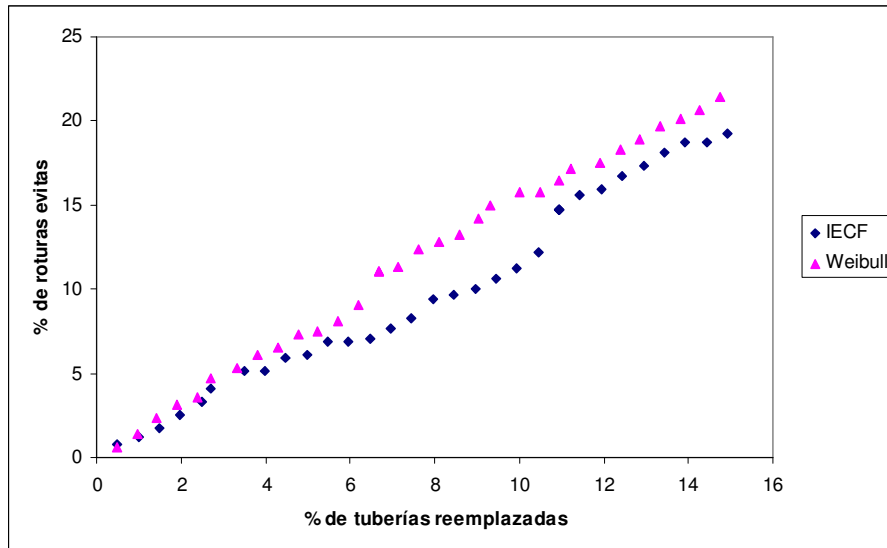


Figura 7. 38 Comparación de los resultados del modelo de Weibull y del Índice de evaluación de las condiciones físicas, con el 10% de todos los individuos.

De los resultados obtenidos con los dos métodos descritos, podemos comentar lo siguiente:

### 9.3.1 Para el estrato de los todos los individuos

El 20,03% de las roturas son evitadas si el 11,56% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 14,92% de las tuberías son reemplazadas.

El 50% de las roturas son evitadas si el 33,67% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 40,67% son reemplazadas.

El 90,07% de las roturas son evitadas si el 70,92% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 81,71% son reemplazadas.

### 9.3.2 Para el estrato de las tuberías de acero galvanizado (FOGA)

El 20,14% de las roturas son evitadas si el 11,52% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 12,31% son reemplazadas.

El 50,18% de las roturas son evitadas si el 33,08% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 34,94% son reemplazadas.

El 90.47% de las roturas son evitadas si el 76.15% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 78.74% son reemplazadas.

### 9.3.3 Para el estrato de las tuberías asbesto cemento y polietileno

El 20.47% de las roturas son evitadas si el 14.06% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 15.92% son reemplazadas.

El 50.18% de las roturas son evitadas si el 39.65% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 47.26% son reemplazadas.

El 90.47% de las roturas son evitadas si el 82.38% de las tuberías son reemplazadas, esto se obtuvo con el método Weibull (PHMW). Con el método de Cox (IECF) el mismo porcentaje de roturas son evitadas si el 89.05% son reemplazadas.

## 9.4 Priorización del orden de las tuberías para rehabilitar, aplicando los modelos de riesgo proporcional de Cox y de Weibull.

Primeramente se aplico un modelo de riesgo proporcional de Cox, para la base de datos de la historia de roturas del periodo 2000-2006, para posteriormente calcular el Índice de evaluación de las condiciones físicas.

	coef	exp(coef)	se(coef)	p
relleno	0.649	1.913	0.0720	0.0e+000
canprox	-0.230	0.795	0.0919	1.2e-002
nfp1	0.906	2.475	0.1018	0.0e+000
nfp2	0.763	2.145	0.1088	2.3e-012
nfp3	0.846	2.330	0.1144	1.4e-013
nfp4	0.691	1.997	0.0961	6.3e-013
lnlong	0.544	1.722	0.0631	1.1e-016
lndiam	0.242	1.274	0.0718	7.5e-004
mat2	-0.794	0.452	0.1111	8.6e-013
mat3	0.313	1.368	0.0853	2.5e-004
mat4	0.569	1.767	0.0901	2.7e-010

Rsquare= 0.331 (max possible= 1 )  
Likelihood ratio test= 676 on 11 df, p=0.00563

$$IECF_{2000-2006} = 0.649x_1 - 0.230x_3 + 0.691x_4 + 0.763x_5 + 0.846x_6 + 0.906x_7 + 0.544x_8 + 0.242x_9 - 0.794x_{13} + 0.313x_{14} + 0.569x_{15}$$

Una vez que es calculado el índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF), se prioriza el orden de rehabilitación de las tuberías en base a los resultados obtenidos, en tabla 7.25, se muestran las primeras tuberías de la lista de priorización con todos los detalles pertinentes, y con el formato de cómo aparecerán para la toma de decisiones.

Así mismo se utiliza el modelo de Weibull, con el cual se calcula el orden de priorización de Weibull, el resultado del orden de priorización se muestra en la tabla 7.23, el total del número de tuberías se muestra en el **anexo 3**.

	Value	Std. Error	p
(Intercept)	10.9328	9.2871	2.39e-001
relleno	-1.5372	0.0776	9.28e-028
<b>profundidad</b>	<b>-0.1320</b>	<b>0.0889</b>	<b>1.37e-001</b>
canprox	0.8763	0.0970	1.07e-004
nfp1	-0.7468	0.1062	2.23e-028
nfp2	-1.1085	0.1121	1.31e-022
nfp3	-1.3234	0.1174	2.39e-025
nfp4	-1.6246	0.0985	5.56e-026
lnlong	-1.184	0.0666	2.47e-021
lndiam	-0.3464	0.0792	1.23e-005
<b>edadstrat1</b>	<b>0.1842</b>	<b>0.1355</b>	<b>1.74e-002</b>
edadstrat2	0.1835	0.0569	1.26e-003
<b>edadstrat3</b>	<b>-1.4971</b>	<b>9.2734</b>	<b>8.72e-002</b>
mat2	1.2923	0.2620	8.14e-007
mat3	5.6709	0.0928	8.78e-002
mat4	-0.8887	0.1080	1.84e-016

Scale= 1.05

Loglik(model)= -8681.6

Chisq= 814.84 on 14 degrees of freedom, p= 3.03e-06

$$S(t) = e\left(-3.0144x_{10}^{-5} * t^{0.952}\right) * e\left[-0.952(-1.537x_1 + 0.876x_3 - 0.746x_4 - 1.108x_5 - 1.323x_6 - 1.624x_7 - 1.184x_8 + 0.564x_9 - 0.892x_{10} - 0.092x_{11} - 1.436x_{12} - 1.116x_{13} + 1.107x_{14})\right]$$

En las siguientes tablas, se muestra un extracto de los resultados de la priorización en el orden de las tuberías, calculadas con el IECF para los siguientes estratos; primeramente para todos los individuos (ver tabla 7.25), para las tuberías de acero galvanizado (ver tabla 7.26 ), y por ultimo para el estrato de las tuberías de Asbesto cemento y Polietileno (ver tabla 7.27).

ID	Calle	Intercepción	Intercepción	NFPO	Diametro	Edad	Material	Longitud	Index	Orden	% Orden
T272	Fco. I. Madero	V. Carranza	Río Bravo	9	300	40	POLIET	160	4.786	1	0.383
T391	Benito Juárez	Fco. I. Madero	M. Doblado	6	200	40	POLIET	93	4.700	2	0.766
T10	Czada Independencia	Fco. I. Madero	Górgora	6	300	40	FOFO	110	4.598	3	1.149
T398	Fco. I. Madero	Álvaro Obregón	Czada Independencia	4	300	40	POLIET	141	4.494	4	1.533
T393	5 de Mayo	Benito Juárez	Tres Guerras	8	100	40	FOFO	76	4.462	5	1.916
T449	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Aguilar Nieto	7	300	40	POLIET	80	4.333	6	2.299
T433	Los Aztecas	Leandro Valle	Insurgentes	8	100	50	POLIET	30	4.328	7	2.682
T463	16 de Septiembre	A. Arroyo Chico	M. de la Cruz	9	300	30	AC	40	4.289	8	3.065
T396	Álvaro Obregón	5 de Mayo	Priv. Rioja	6	150	40	POLIET	70	4.287	9	3.448
T434	Hermeregildo Galeana	Insurgentes	Hermanos Aldama	9	200	50	FOFO	150	4.279	10	3.831
T25	Benito Juárez	Democracia	Av. López Mateos	6	75	40	POLIET	80	4.276	11	4.215
T302	Río bravo	Acapulco	5 de Mayo	4	300	40	FOFO	100	4.263	12	4.598
T451	Miguel Hidalgo	E. Valencia	Aguilar Nieto	9	300	40	POLIET	105	4.247	13	4.981
T287	Río bravo	José Ma. Morelos	Priv. V. Carranza	8	300	40	POLIET	110	4.231	14	5.364
T394	Tres Guerras	5 de Mayo	Priv. Rioja	2	100	40	FOGA	70	4.216	14	5.364
T21	Benito Juárez	Colunga Guerrero	M. Doblado	4	200	40	FOFO	20	4.210	14	5.364
T52	José Ma. Morelos	Cortazar	Tenochtitlan	8	300	40	FOGA	120	4.201	15	5.747
T234	Río bravo	Fco. I. Madero	Acapulco	7	300	40	FOFO	128	4.177	16	6.130
T271	Fco. I. Madero	Guadalupe Victoria	Riva Palacio	9	300	40	POLIET	160	4.092	17	6.513
T436	Hermanos Aldama	1ro de Mayo	Fco. I Madero	8	150	50	FOFO	150	4.059	18	6.897
T116	16 de Septiembre	Melitón Balderas	Tampico	7	300	30	POLIET	80	4.034	19	7.280
T288	Río bravo	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	300	40	AC	74	4.034	20	7.663
T303	Río bravo	5 de Mayo	Tampico	4	300	40	FOGA	110	4.025	21	8.046
T454	Miguel Hidalgo	Concha Cuauhtemoc	Emeteria Valencia	7	300	40	POLIET	110	4.025	21	8.046
T23	Colunga Guerrero	Benito Juárez	Álvaro Obregón	4	200	40	FOGA	86	3.997	22	8.429
T392	Benito Juárez	5 de Mayo	Fco. I Madero	4	75	40	FOGA	170	3.990	23	8.812
T397	Álvaro Obregón	Priv. Rioja	Fco. I Madero	3	150	40	POLIET	100	3.945	24	9.195
T18	Miguel Hidalgo	Zaragoza	Corregidora	0	300	40	FOGA	8	3.913	25	9.579
T72	José Ma. Morelos	16 de Septiembre	Plan de Iguala	0	300	40	FOGA	15	3.868	26	9.962
T65	José Ma. Morelos	Chapala	Plan de Iguala	7	300	40	FOGA	290	3.828	27	10.345
T119	16 de Septiembre	Texcoco	Melitón Balderas	4	300	30	POLIET	130	3.811	28	10.728
T435	Insurgentes	Los Aztecas	Hermeregildo Galeana	5	100	50	FOGA	120	3.769	29	11.111
T126A	Lajas	Mna del Sto. Niño	Silao Nita	4	100	20	FOGA	194	3.729	30	11.494
T432	Insurgentes	Mariano Jiménez	Los Aztecas	6	100	50	AC	130	3.727	31	11.877
T395	Priv. Rioja	Tres Guerras	Álvaro Obregón	2	75	40	FOGA	118	3.725	32	12.261
T2A4	Diamante	Negríta	Esmeralda	4	75	20	FOGA	108	3.719	33	12.644
T464	16 de Septiembre	Texcoco	Czada. Linan	4	300	30	FOGA	100	3.675	34	13.027
T19	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Zaragoza	1	300	40	POLIET	83	3.668	35	13.410
T20	Benito Juárez	Miguel Hgo.	Colunga Guerrero	3	200	40	POLIET	100	3.660	36	13.793
T85	16 de Septiembre	Campeche	Zacatecas	2	300	50	FOGA	40	3.634	37	14.176
T457	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	Democracia	2	200	40	FOGA	75	3.608	38	14.559
T469	Álvaro Obregón	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	150	40	FOGA	200	3.590	39	14.943
T47A	Rubí	Antrasita	Turmalina	4	75	20	FOGA	142	3.567	40	15.326
T456	Democracia	E. Valencia	Rayón Ignacio López	5	150	40	POLIET	110	3.567	41	15.709
T438	Insurgentes	Hermeregildo Galeana	5 de Mayo	6	100	50	POLIET	175	3.562	42	16.092
T60A	Jade	Pedernal	Negríta	4	75	20	FOFO	151	3.531	43	16.475
T16	José Ma. Morelos	I. Allende	Czada Independencia	4	300	40	FOGA	110	3.509	44	16.858
T64	José Ma. Morelos	Mitla	Chapala	1	300	40	FOGA	115	3.480	45	17.241
T105A	Mina del Cubo	Lajas	Silao Nita	5	75	20	FOFO	165	3.478	46	17.625
T127A	Mina del Cubo	Alunta	Lajas	4	75	20	POLIET	100	3.469	47	18.008
T437	1ro de Mayo	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	75	50	FOGA	117	3.441	48	18.391
T424	Mariano Jiménez	Insurgentes	Hermanos Aldama	5	100	50	FOGA	219	3.427	49	18.774
T106	16 de Septiembre	Tampico	Campeche	1	300	50	AC	30	3.424	50	19.157
T29A	Diamante	Pedernal	Espinela	4	75	20	POLIET	181	3.421	51	19.540
T81	16 de Septiembre	José Ma. Morelos	Fco. I Madero	4	300	50	POLIET	150	3.391	52	19.923
T78A	Calcedonia	Agata	Acerina	4	75	20	FOGA	192	3.384	53	20.307
T26A	Brillante	Mina San Bernabé	Av. Torres Landa	4	100	20	AC	75	3.378	54	20.690
T439	5 de Mayo	Leandro Valle	Insurgentes	1	100	50	AC	30	3.376	55	21.073
T48A	Antrasita	Titania	Circón	4	75	20	FOGA	221	3.292	56	21.456
T28	Democracia	Rayón Ignacio López	Benito Juárez	2	150	40	FOFO	70	3.278	57	21.839
T24	Benito Juárez	Democracia	Miguel Hidalgo	4	100	40	FOFO	80	3.232	58	22.222
T75A	Calcedonia	Ámbar	Aguamarina	4	75	20	FOFO	249	3.212	59	22.605
T84	16 de Septiembre	Fco. I. Madero	Zacatecas	2	300	50	FOGA	80	3.202	60	22.989
T12A	Acerina	Guanajuato	Madre Perla	4	75	20	FOGA	256	3.193	61	23.372
T56	Av. López Mateos	Agrarismo Norte	Priv. Revolución	5	100	40	FOGA	90	3.151	62	23.755
T108A	Mármol	Circón	Rubí	4	150	20	FOGA	266	3.098	63	24.138
T13	Czada Independencia	Miguel Hgo.	Fco. I Madero	4	300	40	POLIET	207	3.094	64	24.521
T89A	Brillante	Mina de Mellado	Mina Valencia	5	150	20	FOGA	268	3.093	65	24.904
T466	A. Arroyo Chico	16 de Septiembre	C. Tenochtitlan	4	75	40	POLIET	115	3.078	66	25.287
T15	Fco. I. Madero	Czada Independencia	Guadalupe Victoria	0	300	40	FOGA	12	3.072	67	25.670
T440	Fco. I. Madero	Hermanos Aldama	Benito Juárez	3	150	40	FOGA	140	3.062	68	26.054
T422	Hermanos Aldama	Mariano Jiménez	Guanajuato	4	75	50	POLIET	210	3.048	69	26.437

T50	José Ma. Morelos	Pedro Figueroa	Venustiano Carranza	2	300	40	FOGA	90	3.035	70	26.820
T442	M. Doblado	E. Valencia	Aguilar Nieto	4	100	40	POLIET	65	3.031	71	27.203
T458	Av. López Mateos	E. Valencia	Rayón Ignacio López	4	100	40	FOFO	115	2.974	72	27.586
T8A	Brillante	Mina de las Torres	Mina del Cubo	4	150	20	FOGA	330	2.941	73	27.969
T452	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	M. Doblado	2	200	40	AC	130	2.922	74	28.352
T104A	Mina Mellado	Brillante	Caofin	4	100	20	POLIET	151	2.889	75	28.736
T51	José Ma. Morelos	Venustiano Carranza	Río Bravo	4	300	40	FOFO	170	2.882	76	29.119
T420	1ro de Mayo	Mariano Jiménez	Cda. 1ro de Mayo	2	75	50	FOFO	114	2.821	77	29.502
T91	Av. 2 de abril	Campeche	Zacatecas	4	150	50	FOFO	80	2.808	78	29.885
T29	Av. López Mateos	Benito Juárez	Zaragoza	3	100	40	POLIET	85	2.799	79	30.268
T281	Venustiano Carranza	José Ma. Morelos	Priv. V. Carranza	4	75	40	FOGA	80	2.792	80	30.651
T63	Miña	Av. López Mateos	Ma. Dolores Avellanal	4	100	40	POLIET	150	2.772	81	31.034
T53	Av. López Mateos	Cortazar	Tenochtitlan	6	100	40	FOGA	150	2.772	81	31.034
T30	Zaragoza	Av. López Mateos	Democracia	4	75	40	FOFO	82	2.772	81	31.034
T35	Zaragoza	Democracia	Miguel Hidalgo	4	75	40	POLIET	82	2.772	81	31.034
T37	Av. López Mateos	I. Allende	Czda Independencia	3	100	40	POLIET	90	2.755	82	31.418
T34	Democracia	Zaragoza	I. Allende	4	75	40	POLIET	87	2.726	83	31.801
T67A	Basalto	Onix	Perla	4	75	20	FOGA	307	2.706	84	32.184
T14	Fco. I. Madero	Calzada Ind.	Czda Independencia	0	300	40	POLIET	20	2.685	85	32.567
T400	Tres Guerras	Fco. I. Madero	Priv. Rioja	3	100	40	AC	100	2.671	86	32.950
T116A	Mármol	Av. Torres Landa	Perla	4	100	20	POLIET	201	2.666	87	33.333
T238	Tenochtitlan	Texcoco	Tampico	5	75	40	FOFO	205	2.638	88	33.716
T45	José Ma. Morelos	Pedro Figueroa	Venustiano Carranza	1	300	40	FOFO	80	2.634	89	34.100
T115	Margarita Basurto	Tampico	Melitón Balderas	4	150	30	FOFO	185	2.619	90	34.483
T405	20 de Nov	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	150	50	FOGA	65	2.613	91	34.866
T39	Democracia	I. Allende	Czada Independencia	3	75	40	POLIET	60	2.596	92	35.249
T389	Benito Juárez	5 de Mayo	Fco. I Madero	3	150	40	POLIET	170	2.553	93	35.632
T280	Guadalupe Victoria	Fco. I. Madero	5 de Mayo	1	200	40	FOGA	180	2.545	94	36.015
T58	Av. López Mateos	Plan de Ayutla	Ocampo	2	100	40	POLIET	80	2.544	95	36.398
T59	Av. López Mateos	Ocampo	Plan de Iguala	2	100	40	POLIET	80	2.544	96	36.782
T109	Tampico	P. Pachuca	Ignacio Gtz.	4	150	50	FOFO	116	2.511	97	37.165
T441	M. Doblado	Aguilar Nieto	Benito Juárez	2	100	40	FOFO	85	2.494	98	37.548
T447	M. Doblado	E. Valencia	Benito Juárez	0	150	40	POLIET	30	2.434	99	37.931
T227	Rayón Ignacio López	Av. López Mateos	Democracia	3	75	40	FOFO	75	2.413	100	38.314
T36	I. Allende	Democracia	José Ma. Morelos	2	200	40	FOGA	89	2.374	101	38.697
T455	Ch. Concha Cuah.	Miguel Hgo.	M. Doblado	4	75	40	AC	140	2.337	102	39.080
T106A	Mina Valencia	Brillante	Rocas	3	100	20	FOGA	94	2.327	103	39.464
T129A	Mina Valencia	Rocas	Mármol	4	100	20	FOGA	94	2.327	103	39.464
T429	Hermanos Aldama	Hermeregildo Galeana	Los Aztecas	4	150	50	FOFO	150	2.310	104	39.847
T223	Tampico	S. de Gto.	Tenochtitlan	4	150	50	POLIET	150	2.296	105	40.230
T124A	Mina de la Sirena	Mármol	Crisolita	3	100	20	FOFO	98	2.292	106	40.613
T111	Tampico	Ignacio. Gtz.	Margarita Basurto	4	150	50	FOFO	155	2.269	107	40.996
T195	Tampico	16 de Septiembre	S. de Gto.	4	150	50	POLIET	157	2.258	108	41.379
T428	Hermanos Aldama	Aztecas	Mariano Jiménez	4	150	50	FOGA	110	2.197	109	41.762
T444	Fco. I. Madero	E. Valencia	H. Aldama	0	150	40	FOFO	40	2.192	110	42.146
T459	Emeteria Valencia	Av. López Mateos	Democracia	0	200	40	POLIET	75	2.170	111	42.529
T40	Av. López Mateos	Gpe. Victoria	Czada Independencia	1	100	40	FOGA	70	2.116	112	42.912
T465	A. Arroyo Chico	16 de Septiembre	C. Tenochtitlan	0	200	40	POLIET	115	2.071	113	43.295
T453	M. Doblado	Concha Cuauhtemoc	E. Valencia	3	75	40	FOFO	114	2.057	114	43.678
T67	Ma. Dolores Avellanal	Ocampo	Plan de Iguala	2	75	40	FOGA	80	2.034	115	44.061
T301	Ma. Dolores Avellanal	Miña	Plan de Ayutla	4	75	40	FOGA	200	2.033	116	44.444
T93	Av. 2 de abril	Morelos	Pról. Fco. I. Madero	4	150	50	FOFO	210	2.008	117	44.828
T75	José Ma. Morelos	Plan de Ayutla	Palmas	4	150	50	POLIET	215	1.988	118	45.211
T446	Insurgentes	5 de Mayo	Fco. I Madero	2	100	40	POLIET	160	1.957	119	45.594
T44	José Ma. Morelos	Czda Independencia	Gpe. Victoria	0	300	40	FOGA	50	1.915	120	45.977
T273	Venustiano Carranza	Fco. I. Madero	J. Fdez. de Lizardi	2	75	40	AC	92	1.913	121	46.360
T235	5 de Mayo	Álvaro Obregón	Gpe. Victoria	2	200	40	FOFO	157	1.889	122	46.743
T95A	Mina Peregrina	Ing. Vicente Fdez	Losas	1	75	20	POLIET	276	1.888	123	47.126
T33	I. Allende	Av. López Mateos	Democracia	1	200	40	FOGA	84	1.874	124	47.510
T118	Melitón Balderas	Fco. Mascareno	Ignacio Gtz.	4	75	30	POLIET	105	1.868	125	47.893
T112	Av. 2 de abril	Tampico	Campeche	2	150	50	FOFO	100	1.859	126	48.276
T60	Tenochtitlan	Av. López Mateos	José Ma. Morelos	2	100	40	FOFO	180	1.855	127	48.659
T445	Fco. I. Madero	Insurgentes	E. Valencia	0	150	40	FOFO	40	1.833	128	49.042
T350	Fco. I. Madero	Benito Juárez	Tres Guerras	0	150	40	POLIET	61	1.828	129	49.425
T130	16 de Septiembre	C. Fundación	A. Arroyo Chico	4	75	30	POLIET	110	1.828	130	49.808
T406	20 de Nov	Hermanos Aldama	Insurgentes	4	150	50	POLIET	270	1.805	131	50.192
T117A	Av. Torres Landa	Marfil	Basalto	4	100	20	AC	181	1.765	132	50.575
T68	Ocampo	Ma. Dolores Avellanal	Av. López Mateos	3	75	40	AC	160	1.765	133	50.958
T2A	Coral	Marquesita	Turmalina	4	100	20	POLIET	183	1.755	134	51.341
T48	Av. López Mateos	Cortazar	Gpe. Victoria	4	100	40	POLIET	335	1.755	135	51.724
T460	Av. López Mateos	Concha Cuauhtemoc	E. Valencia	1	100	40	FOGA	110	1.727	136	52.107
T1A	Av. Del Sauz	Ojo de Gato	Esmeralda	4	75	20	FOGA	340	1.711	137	52.490
T62	José Ma. Morelos	Tenochtitlan	Miña	0	100	40	FOFO	30	1.706	138	52.874
T69	Ma. Dolores Avellanal	Ocampo	Plan de Ayutla	2	75	40	AC	80	1.686	139	53.257

Tabla 7. 25 Estrato para todos los individuos

ID	Calle	Intercepción	Intercepción	NFPO	Diametro	Edad	Material	Longitud	Index	Orden	% Orden
T272	Fco. I. Madero	V. Carranza	Río Bravo	9	300	40	FOGA	160	3.8092	1	0.79
T434	Hermeregildo Galeana	Insurgentes	Hermanos Aldama	9	200	50	FOGA	150	3.6234	2	1.57
T424	Mariano Jiménez	Insurgentes	Hermanos Aldama	5	100	50	FOGA	219	3.5427	3	2.36
T65	José Ma. Morelos	Chapala	Plan de Iguala	7	300	40	FOGA	290	3.5387	4	3.15
T436	Hermanos Aldama	1ro de Mayo	Fco. I Madero	8	150	50	FOGA	150	3.5053	5	3.94
T398	Fco. I. Madero	Álvaro Obregón	Czada Independencia	4	300	40	FOGA	141	3.4576	6	4.72
T438	Insurgentes	Hermeregildo Galeana	5 de Mayo	6	100	50	FOGA	175	3.4177	7	5.51
T422	Hermanos Aldama	Mariano Jiménez	Guanajuato	4	75	50	FOGA	210	3.3960	8	6.30
T391	Benito Juárez	Fco. I. Madero	M. Doblado	6	200	40	FOGA	93	3.3585	9	7.09
T10	Czda Independencia	Fco. I. Madero	Góngora	6	300	40	FOGA	110	3.3139	10	7.87
T392	Benito Juárez	5 de Mayo	Fco. I Madero	4	75	40	FOGA	170	3.2714	11	8.66
T469	Álvaro Obregón	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	150	40	FOGA	200	3.2602	12	9.45
T432	Insurgentes	Mariano Jiménez	Los Aztecas	6	100	50	FOGA	130	3.2422	13	10.24
T435	Insurgentes	Los Aztecas	Hermeregildo Galeana	5	100	50	FOGA	120	3.1932	14	11.02
T271	Fco. I. Madero	Guadalupe Victoria	Riva Palacio	9	300	40	FOGA	160	3.1929	14	11.02
T406	20 de Nov	Hermanos Aldama	Insurgentes	4	150	50	FOGA	270	3.1887	14	11.02
T48	Av. López Mateos	Cortazar	Gpe. Victoria	4	100	40	FOGA	335	3.1301	15	11.81
T234	Río bravo	Fco. I. Madero	Acapulco	7	300	40	FOGA	128	3.0528	16	12.60
T437	1ro de Mayo	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	75	50	FOGA	117	3.0390	17	13.39
T52	José Ma. Morelos	Cortazar	Tenochtitlan	8	300	40	FOGA	120	3.0114	18	14.17
T13	Czda Independencia	Miguel Hgo.	Fco. I Madero	4	300	40	FOGA	207	3.0061	19	14.96
T287	Río bravo	José Ma. Morelos	Priv. V. Carranza	8	300	40	FOGA	110	2.9551	20	15.75
T303	Río bravo	5 de Mayo	Tampico	4	300	40	FOGA	110	2.9551	20	15.75
T454	Miguel Hidalgo	Concha Cuauhtemoc	Emeteria Valencia	7	300	40	FOGA	110	2.9551	20	15.75
T451	Miguel Hidalgo	E. Valencia	Aguilar Nieto	9	300	40	FOGA	105	2.9247	21	16.54
T393	5 de Mayo	Benito Juárez	Tres Guerras	8	100	40	FOGA	76	2.9018	22	17.32
T302	Río bravo	Acapulco	5 de Mayo	4	300	40	FOGA	100	2.8928	23	18.11
T51	José Ma. Morelos	Venustiano Carranza	Río Bravo	4	300	40	FOGA	170	2.8776	24	18.90
T397	Álvaro Obregón	Priv. Rioja	Fco. I Madero	3	150	40	FOGA	100	2.8182	25	19.69
T429	Hermanos Aldama	Hermeregildo Galeana	Los Aztecas	4	150	50	FOGA	150	2.8104	26	20.47
T25	Benito Juárez	Democracia	Av. López Mateos	6	75	40	FOGA	80	2.7902	27	21.26
T389	Benito Juárez	5 de Mayo	Fco. I Madero	3	150	40	FOGA	170	2.7889	28	22.05
T395	Priv. Rioja	Tres Guerras	Álvaro Obregón	2	75	40	FOGA	118	2.7874	29	22.83
T280	Guadalupe Victoria	Fco. I. Madero	5 de Mayo	1	200	40	FOGA	180	2.7853	30	23.62
T420	1ro de Mayo	Mariano Jiménez	Cda. 1ro de Mayo	2	75	50	FOGA	114	2.7644	31	24.41
T449	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Aguilar Nieto	7	300	40	FOGA	80	2.7446	32	25.20
T431	Los Aztecas	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	100	50	FOGA	175	2.7062	33	25.98
T64	José Ma. Morelos	Mitla	Chapala	1	300	40	FOGA	115	2.6930	34	26.77
T49	Libertad	Pedro Figueroa	Cortazar	3	75	40	FOGA	250	2.6923	35	27.56
T396	Álvaro Obregón	5 de Mayo	Priv. Rioja	6	150	40	FOGA	70	2.6850	36	28.35
T408	Liborio Crespo	Insurgentes	Leandro Valle	3	150	50	FOGA	250	2.6765	37	29.13
T440	Fco. I. Madero	Hermanos Aldama	Benito Juárez	3	150	40	FOGA	140	2.6588	38	29.92
T301	Ma. Dolores Avellanal	Mitla	Plan de Ayutla	4	75	40	FOGA	200	2.6481	39	30.71
T63	Mitla	Av. López Mateos	Ma. Dolores Avellanal	4	100	40	FOGA	150	2.6025	40	31.50
T53	Av. López Mateos	Cortazar	Tenochtitlan	6	100	40	FOGA	150	2.6025	40	31.50
T428	Av. López Mateos	E. Valencia	Rayón Ignacio López	4	100	40	FOGA	115	2.6024	41	32.28
T456	Democracia	E. Valencia	Rayón Ignacio López	5	150	40	FOGA	110	2.6024	41	32.28
T452	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	M. Doblado	2	200	40	FOGA	130	2.5984	42	33.07
T16	José Ma. Morelos	I. Allende	Czda Independencia	4	300	40	FOGA	110	2.5865	43	33.86
T23	Colunga Guerrero	Benito Juárez	Álvaro Obregón	4	200	40	FOGA	86	2.5847	44	34.65
T394	Tres Guerras	5 de Mayo	Priv. Rioja	2	100	40	FOGA	70	2.5844	45	35.43
T20	Benito Juárez	Miguel Hgo.	Colunga Guerrero	3	200	40	FOGA	100	2.5802	46	36.22
T19	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Zaragoza	1	300	40	FOGA	83	2.4731	47	37.01
T60	Tenochtitlan	Av. López Mateos	José Ma. Morelos	2	100	40	FOGA	180	2.4604	48	37.80
T288	Río bravo	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	300	40	FOGA	74	2.4275	49	38.58
T458	Av. López Mateos	E. Valencia	Rayón Ignacio López	4	100	40	FOGA	115	2.4232	50	39.37
T425	Insurgentes	C. Guanajuato	Mariano Jiménez	1	100	50	FOGA	178	2.4212	51	40.16
T455	Ch. Concha Cuah.	Miguel Hgo.	M. Doblado	4	75	40	FOGA	140	2.4076	52	40.94
T68	Ocampo	Ma. Dolores Avellanal	Av. López Mateos	3	75	40	FOGA	160	2.3915	53	41.73
T446	Insurgentes	5 de Mayo	Fco. I Madero	2	100	40	FOGA	160	2.3812	54	42.52
T235	5 de Mayo	Álvaro Obregón	Gpe. Victoria	2	200	40	FOGA	157	2.3527	55	43.31
T427	Aztecas	Hermanos Aldama	Benito Juárez	3	100	50	FOGA	115	2.3177	56	44.09
T433	Los Aztecas	Leandro Valle	Insurgentes	8	100	50	FOGA	30	2.2791	57	44.88
T414	Guanajuato	Insurgentes	Priv. 20 de Nov.	1	100	50	FOGA	140	2.2608	58	45.67
T56	Av. López Mateos	Agrarismo Norte	Priv. Revolución	5	100	40	FOGA	90	2.2595	59	46.46
T405	20 de Nov	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	150	50	FOGA	65	2.2493	60	47.24
T457	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	Democracia	2	200	40	FOGA	75	2.2297	61	48.03
T400	Tres Guerras	Fco. I. Madero	Priv. Rioja	3	100	40	FOGA	100	2.2251	62	48.82
T426	Insurgentes	Héroes de Nacozeri	C. Guanajuato	1	100	50	FOGA	128	2.2018	63	49.61

Tabla 7. 26 Estrato acero galvanizado

ID	Calle	Intercepción	Intercepción	NFPO	Diametro	Edad	Material	Longitud	Index	Orden	% Orden
T272	Fco. I. Madero	V. Carranza	Río Bravo	9	300	40	POLIET	160	4.6479	1	0.48
T391	Benito Juárez	Fco. I. Madero	M. Doblado	6	200	40	POLIET	93	4.5977	2	0.95
T10	Czda Independencia	Fco. I. Madero	Góngora	6	300	40	FOFO	110	4.4177	3	1.43
T398	Fco. I. Madero	Álvaro Obregón	Czda Independencia	4	300	40	POLIET	141	4.3542	4	1.90
T393	5 de Mayo	Benito Juárez	Tres Guerras	8	100	40	FOFO	76	4.3172	5	2.38
T449	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Aguilar Nieto	7	300	40	POLIET	80	4.1732	6	2.86
T433	Los Aztecas	Leandro Valle	Insurgentes	8	100	50	POLIET	30	4.1670	7	3.33
T463	16 de Septiembre	A. Arroyo Chico	M. de la Cruz	9	300	30	AC	40	4.1250	8	3.81
T396	Álvaro Obregón	5 de Mayo	Priv. Rioja	6	150	40	POLIET	70	4.1223	9	4.29
T434	Hermeregildo Galeana	Insurgentes	Hermanos Aldama	9	200	50	FOFO	150	4.1141	10	4.76
T25	Benito Juárez	Democracia	Av. López Mateos	6	75	40	POLIET	80	4.1098	11	5.24
T302	Río bravo	Acapulco	5 de Mayo	4	300	40	FOFO	100	4.0963	12	5.71
T451	Miguel Hidalgo	E. Valencia	Aguilar Nieto	9	300	40	POLIET	105	4.0787	13	6.19
T287	Río bravo	José Ma. Morelos	Priv. V. Carranza	8	300	40	POLIET	110	4.0616	14	6.67
T303	Tres Guerras	5 de Mayo	Priv. Rioja	2	100	40	FOGA	70	4.0616	14	6.67
T454	Benito Juárez	Colunga Guerrero	M. Doblado	4	200	40	FOFO	20	4.0616	14	6.67
T394	José Ma. Morelos	Cortazar	Tenochtitlan	8	300	40	FOGA	120	4.0453	15	7.14
T21	Río bravo	Fco. I. Madero	Acapulco	7	300	40	FOFO	128	4.0388	16	7.62
T52	Fco. I. Madero	Guadalupe Victoria	Riva Palacio	9	300	40	POLIET	160	4.0291	17	8.10
T234	Hermanos Aldama	1ro de Mayo	Fco. I Madero	8	150	50	FOFO	150	4.0043	18	8.57
T271	16 de Septiembre	Melitón Balderas	Tampico	7	300	30	POLIET	80	3.9148	19	9.05
T436	Río bravo	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	300	40	AC	74	3.8795	20	9.52
T116	Río bravo	5 de Mayo	Tampico	4	300	40	FOGA	110	3.8546	21	10.00
T288	Miguel Hidalgo	Concha Cuauhlemoc	Emeteria Valencia	7	300	40	POLIET	110	3.8538	22	10.48
T23	Colunga Guerrero	Benito Juárez	Álvaro Obregón	4	200	40	FOGA	86	3.8158	23	10.95
T392	Benito Juárez	5 de Mayo	Fco. I Madero	4	75	40	FOGA	170	3.8090	24	11.43
T397	Álvaro Obregón	Priv. Rioja	Fco. I Madero	3	150	40	POLIET	100	3.7632	25	11.90
T464	16 de Septiembre	Texcoco	Czada. Linan	4	300	30	FOGA	100	3.7548	26	12.38
T65	José Ma. Morelos	Chapala	Plan de Iguala	7	300	40	FOGA	290	3.6456	27	12.86
T119	16 de Septiembre	Texcoco	Melitón Balderas	4	300	30	POLIET	130	3.6295	28	13.33
T435	Insurgentes	Los Aztecas	Hermeregildo Galeana	5	100	50	FOGA	120	3.5873	29	13.81
T127A	Mina del Cubo	Alunta	Lajas	4	75	20	POLIET	100	3.5786	30	14.29
T126A	Lajas	Mina del Sto. Niño	Silao Nita	4	100	20	FOGA	194	3.5486	31	14.76
T432	Insurgentes	Mariano Jiménez	Los Aztecas	6	100	50	AC	130	3.5466	32	15.24
T395	Priv. Rioja	Tres Guerras	Álvaro Obregón	2	75	40	FOGA	118	3.5448	33	15.71
T2A4	Diamante	Negríta	Esmeralda	4	75	20	FOGA	108	3.5392	34	16.19
T439	5 de Mayo	Leandro Valle	Insurgentes	1	100	50	AC	30	3.4996	35	16.67
T19	Miguel Hidalgo	Benito Juárez	Zaragoza	1	300	40	POLIET	83	3.4901	36	17.14
T20	Benito Juárez	Miguel Hgo.	Colunga Guerrero	3	200	40	POLIET	100	3.4825	37	17.62
T85	16 de Septiembre	Campeche	Zacatecas	2	300	50	FOGA	40	3.4569	38	18.10
T457	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	Democracia	2	200	40	FOGA	75	3.4325	39	18.57
T469	Álvaro Obregón	Fco. I. Madero	José Ma. Morelos	3	150	40	FOGA	200	3.4154	40	19.05
T47A	Rubí	Antrasita	Turmalina	4	75	20	FOGA	142	3.3936	41	19.52
T456	Democracia	E. Valencia	Rayón Ignacio López	5	150	40	POLIET	110	3.3933	42	20.00
T438	Insurgentes	Hermeregildo Galeana	5 de Mayo	6	100	50	POLIET	175	3.3885	43	20.48
T60A	Jade	Pedernal	Negríta	4	75	20	FOFO	151	3.3597	44	20.95
T16	José Ma. Morelos	I. Allende	Czda Independencia	4	300	40	FOGA	110	3.3390	45	21.43
T64	José Ma. Morelos	Mitla	Chapala	1	300	40	FOGA	115	3.3121	46	21.90
T105A	Mina del Cubo	Lajas	Silao Nita	5	75	20	FOFO	165	3.3101	47	22.38
T437	1ro de Mayo	Insurgentes	Hermanos Aldama	4	75	50	FOGA	117	3.2758	48	22.86
T424	Mariano Jiménez	Insurgentes	Hermanos Aldama	5	100	50	FOGA	219	3.2626	49	23.33
T106	16 de Septiembre	Tampico	Campeche	1	300	50	AC	30	3.2605	50	23.81
T29A	Diamante	Pedernal	Espinela	4	75	20	POLIET	181	3.2574	51	24.29
T81	16 de Septiembre	José Ma. Morelos	Fco. I Madero	4	300	50	POLIET	150	3.2302	52	24.76
T78A	Calcedonia	Agata	Acerina	4	75	20	FOGA	192	3.2234	53	25.24
T26A	Brillante	Mina San Bernabé	Av. Torres Landa	4	100	20	AC	75	3.2180	54	25.71
T442	M. Doblado	E. Valencia	Aguilar Nieto	4	100	40	POLIET	65	3.2095	55	26.19
T48A	Antrasita	Titania	Circón	4	75	20	FOGA	221	3.1408	56	26.67
T28	Democracia	Rayón Ignacio López	Benito Juárez	2	150	40	FOFO	70	3.1283	57	27.14
T452	Emeteria Valencia	Miguel Hgo.	M. Doblado	2	200	40	AC	130	3.1193	58	27.62
T24	Benito Juárez	Democracia	Miguel Hidalgo	4	100	40	FOFO	80	3.0865	59	28.10
T51	José Ma. Morelos	Venustiano Carranza	Río Bravo	4	300	40	FOFO	170	3.0861	60	28.57
T75A	Calcedonia	Ámbar	Aguamarina	4	75	20	FOFO	249	3.0695	61	29.05
T84	16 de Septiembre	Fco. I. Madero	Zacatecas	2	300	50	FOGA	80	3.0606	62	29.52
T12A	Acerina	Guanajuato	Madre Perla	4	75	20	FOGA	256	3.0527	63	30.00
T56	Av. López Mateos	Agrarismo Norte	Priv. Revolución	5	100	40	FOGA	90	3.0152	64	30.48
T108A	Mármol	Circón	Rubí	4	150	20	FOGA	266	2.9693	65	30.95
T13	Czda Independencia	Miguel Hgo.	Fco. I Madero	4	300	40	POLIET	207	2.9662	66	31.43
T89A	Brillante	Mina de Mellado	Mina Valencia	5	150	20	FOGA	268	2.9647	67	31.90
T466	A. Arroyo Chico	16 de Septiembre	C. Tenochtitlan	4	75	40	POLIET	115	2.9521	68	32.38
T67A	Basalto	Ónix	Perla	4	75	20	FOGA	307	2.9414	69	32.86
T440	Fco. I. Madero	Hermanos Aldama	Benito Juárez	3	150	40	FOGA	140	2.9387	70	33.33

Tabla 7. 27 Estrato tuberías de polietileno y hierro galvanizado

---

## 10 Nicho de oportunidades en la recolección de datos

En base a la experiencia de gestionar un sistema de abastecimiento y del desarrollo de este trabajo. Con los inconvenientes de los que nos encontramos en la realización de este trabajo, respecto a los formatos o estructuras de la disposición de los datos, considero que se puede proponer algunas sugerencias, para el mejoramiento en la obtención de los mismos, ya sea en campo y del manejo en la oficina, para futuros desarrollos relacionados con el comportamiento y tendencia de las roturas.

Cada vez que se presenta un fallo en las tuberías, pueden ser recabados varios tipos de datos útiles, el primer tipo de datos son los datos de campo que incluye; la información inicial acerca de los fallos de la tubería y su entorno. Esto incluye la información básica de las características físicas tales como: el diámetro, material, profundidad, tipo y probable causa del fallo, temperatura del agua, condiciones del suelo, etcétera. El segundo tipo de datos básicos, se refiere a los que se llevan a cabo en la oficina. Esto incluye el respaldo de la información acerca de la tubería, con la cual no se cuenta en campo. Este tipo de datos incluye, la fecha de instalación de la tubería y los datos de roturas previas entre otros datos.

Un tercer tipo son los datos de laboratorio, pruebas de campo de las tuberías y del suelo del entorno. Ello no podrá ser muy practico, o asequible para probar todas las tuberías que fallen y el suelo del entorno que las rodea, pero una muestra representativa de la tubería y del suelo, puede permitir valorar la información para los programas de planeación en la renovación. Por ultimo el otro tipo de datos es referente al coste de los fallos y sus consecuencias, los datos de los costes incluyen tanto a los costes indirectos y costes directos, asociados con la reparación de las roturas y las consecuencias provocadas por la rotura. De los costes directos tales como: el trabajo realizado por las brigadas, los materiales y maquinaria empleados en la reparación, comúnmente son evaluados para todas las actividades de mantenimiento.

Otros costes asociados con las roturas de las tuberías tales como: las reclamaciones de los usuarios por los daños ocasionados por la rotura, son un poco más difíciles de evaluar, pero existen los medios para hacerlo si se traza ello como objetivo. Regularmente estos datos también incluirán los costes indirectos tales como: la inconformidad de los clientes, la interrupción del tráfico, pérdida de la fiabilidad del sistema, etcétera. Estos costes que no son tangibles, son difíciles de cuantificar, pero son importantes al momento de estructurar un proceso de toma de decisiones, en un programa de renovación de tuberías.

Por tal motivo, todos estos tipos de datos son imprescindibles para las empresas de agua, al momento de la planeación de datos de fallos en el futuro, y son los elementos necesarios para la alimentación de los programas de renovación.

Cada empresa de agua podrá diseñar su propio programa específico de recolección de datos, el diseño debe considerar como objetivo del programa, la recolección de datos (por ejemplo ¿Cuáles son los datos que van a ser utilizados y para que?) hay fuentes disponibles (por ejemplo, ¿las brigadas le dedicaran el tiempo necesario para el llenado de los formatos?, ¿el personal de oficina esta disponible para la investigación y respaldo de la información?), también deben ser consideradas las prácticas de recopilación de datos, además las bases de datos disponibles dentro de la empresa de agua.



---

Este último aspecto es importante, porque una gran cantidad de información necesaria para analizar eficazmente las causas y los efectos de los fallos, a menudo ya se realiza en algunas empresas de agua. El reto es identificar la ubicación de los datos, la forma de acceder a ella, y la forma de vincularlos específicamente a los eventos de los fallos de una manera adecuada.

Es importante definir que es lo que se debe considerar y que no, respecto a los datos de fallos, en varias empresas de agua un grupo es responsable para la investigación, y los incidentes de la reparación de las roturas en el sistema de distribución. Por lo tanto, la recolección y administración de la información, relacionada con estos incidentes son frecuentemente estructuradas recurrentemente para este estudio, una rotura o fallo es definido como un fallo estructural de la tubería.

Antes de discutir los datos específicos que deben recogerse, es ilustrativo considerar la típica secuencia de eventos que están asociados con la identificación, investigación, reparación y el seguimiento de un fallo de la tubería. Cada paso en este proceso genera información, o datos que deben ser guardados y clasificados para su uso posterior. La disponibilidad de la información y la viabilidad de la recopilación, deben ser examinadas por cada empresa de agua, al decidir qué parte de su organización es la más adecuada para recopilar los datos.

Las actividades específicas relacionadas con cada uno de estos, es probable que difieran entre las distintas empresas de agua. Los siguientes pasos básicos, son los típicos que se llevan a cabo para la respuesta a la atención en la reparación de una rotura.

**Reporte de una rotura.**- Los usuarios llaman al centro de atención reportando la localización de la rotura, por lo regular proporcionan el domicilio con el número identificador del domicilio, si es preciso las calles que interceptan al domicilio donde se presenta la rotura.

**Identificación del problema.**- Para identificar el problema, puede ser a través de una llamada de un usuario al sistema, o una observación ocular por los empleados de la empresa de agua, son ejemplos típicos de cómo se genera primero la identificación del problema, en un sistema de distribución. Se iniciará de inmediato una investigación del problema o será programado para el futuro, en función de la percepción de la gravedad del evento.

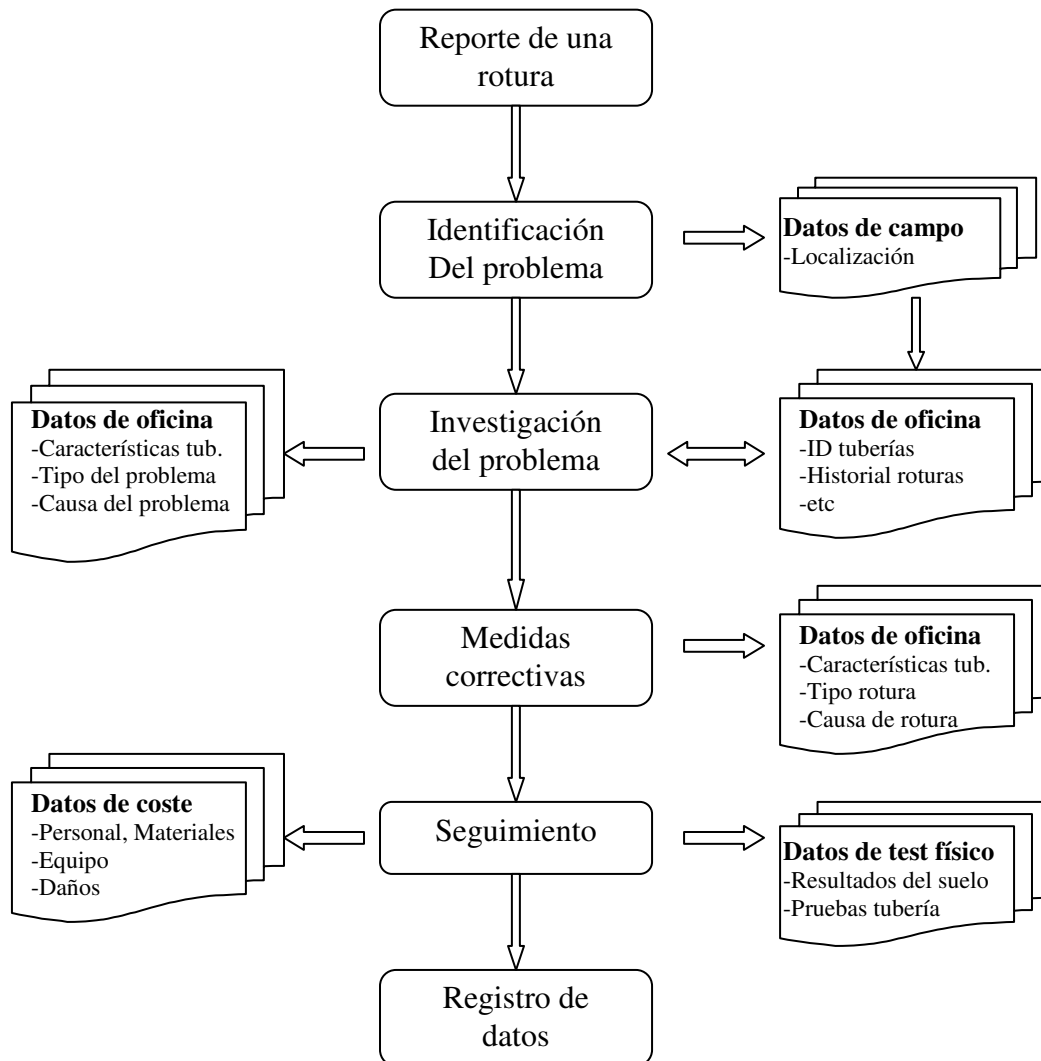
**Investigación del problema.**- Un experimentado empleado de la empresa de agua es enviado para investigar el problema. El empleado identifica la naturaleza del problema (es decir, la rotura de la tubería causo daños a la propiedad, avenida o no, etcétera), e inicia la adopción de medidas correctivas en base de la gravedad del incidente.

**La adopción de medidas correctivas.**- La solución del problema puede ser una reparación temporal, reparación permanente, el reemplazo, o la notificación a terceros, si fuese el caso que no correspondiera a la empresa de agua la reparación.

**Seguimiento.**- El seguimiento de las medidas pueden incluir el registro de los tiempos empleados en la reparación, y otra información relacionada con los costes asociados con el evento, la actualización de la historia del mantenimiento, informando a los usuarios del estado en que se encuentra la reparación, etcétera.

**Registro de los datos.**- Cada uno de estos pasos en el proceso, genera datos y ellos son registrados inicialmente en papel, basado en las formas previamente establecidas, seguidamente se transfieren a la base de datos.

La información de los fallos y las etapas del proceso de reparación, son ilustrados esquemáticamente en la figura 7.39. Este concepto indica los datos que pueden ser esperados.



*Figura 7. 39 Diagrama de flujo del proceso de la reparación de roturas y generación de datos*

### 10.1 Recomendaciones para la recolección de datos

La mayoría de las empresas de agua, disponen de procedimientos y formas en campo, para el registro básico de la información relativa a las roturas. En algunos casos, estas formas se utilizan exclusivamente por parte de los operarios, para compilar los datos de campo. En otros casos, las formas son más amplias y más detalladas, ambos los datos sobre el campo y la oficina se compilan en el mismo formulario. Las condiciones en las que las tuberías se han instalado, la mayoría de las veces son desconocidas y pueden

---

---

sólo ser inferidas de las prácticas en la instalación, y estimación de la tecnología disponible en ese momento.

Una cuestión relativa de los datos de fallo es que cuando las tuberías son sustituidas, los datos se descartan por parte de algunas empresas de aguas. Los datos de la tubería reemplazadas si se mantienen, podría utilizarse para predecir las condiciones de tuberías similares en la misma empresa de agua, o en una tubería similar en una empresa de agua diferente. Es decir servirán para realizar estudios respecto a la tendencia de fallos, las figuras 7.40 y 7.41 proporcionan una forma de capturar en campo y en la oficina los datos de las roturas, identificados como de mayor utilidad para los servicios de agua, para utilizar en la elaboración programas de renovación de tuberías.

Una descripción de cada dato solicitado se proporciona en la tabla 7.28. Debemos de considerar que algunos elementos, pueden no ser aplicables a todas las empresas de agua. El objetivo; es mejorar la captura en campo y oficina de los formatos ya establecidos, en las diversas empresas de agua para facilitar y realizar un mejor análisis en la tendencia de fallos.

## Formato para la colección de los datos en las roturas

1.- No de reporte \_\_\_\_\_ 4.- Brigada \_\_\_\_\_  
 2.- Dirección \_\_\_\_\_ 5.- Responsable \_\_\_\_\_  
 3.- Intersección \_\_\_\_\_ 6.- Fecha \_\_\_\_\_

### 7.- Material de la tubería

- PVC  
 A-C  
 Fo Fo  
 Fo Ga  
 Pol (H o MD)  
 PRFV

### 8.- Diámetro de la tubería

- 75 mm  
 100 mm  
 150 mm  
 200 mm  
 otro

### 9.- Protección de la tubería

- Catódica  
 Asfaltado  
 Otro

### 10. Tipo de unión

- Rígida  
 Flexible  
 Conector adhesivo  
 Conexión empaque  
 Termofusión  
 Electrococción

### 11. Condición externa de la tubería

- Extensión de la corrosión  
 Ninguna  
 Puntual (en distintos puntos)  
 Uniforme (en una área completa)  
 Grado de la corrosión  
 Incipiente (0%-20%)  
 Moderada (20% - 40%)  
 Severa (40% - 75%)  
 Crítica (75% o más)

### 12. Condición interior de la tubería

- Incrustación (espesor aprox.)  
 Roturas incipientes  
 Presenta corrosión  
 No se observa

### 13. Superficie y tráfico

- Peatonal  
 Acera  
 Servidumbre (sin tráfico)  
 Vialidad -tráfico ligero (residencial)  
 Vialidad -tráfico medio (mixto)  
 Vialidad -tráfico pesado (industrial)

### 14. Cama

- Tipo  
 Suelo nativo  
 Arena  
 Granular  
 Limo arenoso

### Condición

- Aparece uniforme  
 Huecos o lavado de material  
 Material orgánico  
 Humedad del medio ambiente (estrato superior)

### 15. Profundidad de la tubería (desde la superficie hasta el lomo del tubo)

\_\_\_\_\_ m

### 16. Tipo de fallo

- Rotura circunferencial  
 Rotura longitudinal  
 Agujero de corrosión  
 Rotura con varios cortes long.  
 Rotura en unión  
 Otro

### 17. Probable causa de fallo

- Relleno (material orgánico)  
 Contacto tubería-roca  
 Carga de tráfico  
 Corrosión  
 Supresión  
 Sobrepresión  
 Provocada por terceros  
 Empaque mal colocado  
 Fallo de la protección  
 Asentamiento  
 Desconocido  
 Existe canalizaciones próximas

Distancia:

Horizontal \_\_\_\_\_ Vertical \_\_\_\_\_

### 18. Mostrar la localización de la rotura

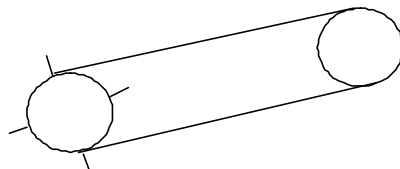


Figura 7. 40 Forma para la recolección de datos (pagina 1)

**19.- Categoría del suelo**

- Arena
- Limo
- Arcilla
- Roca
- Otro

**20.- Propiedades del suelo**

- Temperatura \_\_\_\_\_
- PH \_\_\_\_\_
- Contenido de humedad \_\_\_\_\_
- Resistividad \_\_\_\_\_
- Granulometría \_\_\_\_\_
- Plasticidad \_\_\_\_\_

21.- Espesor de la pared de la tubería \_\_\_\_\_

22.- Modulo de ruptura de la tubería \_\_\_\_\_

23.- Resistencia de la fractura de la tubería \_\_\_\_\_

Historial de roturas y el sistema de información

24 ID de la brigada \_\_\_\_\_

25 ID de la rotura \_\_\_\_\_

26 ID de la tubería \_\_\_\_\_

27 Longitud \_\_\_\_\_

28 Antigüedad \_\_\_\_\_

29 Presión de operación normal en la zona \_\_\_\_\_

*Nota: Cambio de la presión debido a maniobras de operación en la red antes de 24 hrs.*

**30 Tipo de servicio**

- Continuo
- Discontinuo

31 Temperatura del agua \_\_\_\_\_

32 Temperatura del ambiente \_\_\_\_\_

33 Presencia de lluvia antes de 24 hrs. \_\_\_\_\_

**Datos de los costes de la rotura**

34 Número de personal técnico \_\_\_\_\_

35 Coste de operación en la reparación \_\_\_\_\_

36 Tiempo de interrupción en el servicio \_\_\_\_\_

- 0 - 5 hr
- 5 - 10 hr
- 10 - 20 hr
- 20 o mas

**37 Número de usuarios afectados**

- Residencial \_\_\_\_\_
- Comercial \_\_\_\_\_
- Industrial \_\_\_\_\_
- Hospitales \_\_\_\_\_
- Escuelas \_\_\_\_\_
- Edificios Gob \_\_\_\_\_
- Otros \_\_\_\_\_

38 Propiedades dañadas

- Si
- No

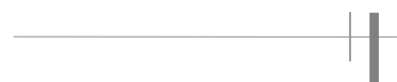
39 Tipo de propiedad dañada

- Puntos neuralgicos
- Edificios gubernamentales
- Edificios con mas de 5 plantas
- Monumentos historicos

40 Coste de la reparación \_\_\_\_\_

**Nota:** Puntos neuralgicos: Hospitales, centros educativos, parques publicos, centros de recreo

*Figura 7. 41 Forma para la recolección de datos (pagina 2)*



<b>Dato</b>	<b>Descripción</b>	<b>Objetivo</b>
1.-No. de reporte	Se refiere al numero consecutivo y de control para la identificación de la rotura	Seguimiento de los datos recabados
2.-Dirección	Domicilio del reporte de rotura, para su localización	Análisis espacial de la rotura
3.-Intersección	las calles que interceptan al domicilio	Precisión de la localización de la rotura, cuando el domicilio no aplica
4.-Brigada	Número de identificación de los empleados quienes proveen la información	Seguimiento de los datos recabados
5.-Responsable	Como su nombre lo indica el responsable de la confirmación de la información	Seguimiento de dudas mas específicamente
6.-Fecha	Fecha en la cual se repara la rotura	Análisis de tendencias de roturas
7.-Material de la tubería	Material de la tubería	Análisis de tendencias de roturas por el material de las tuberías
8.-Diámetro de la tubería	Diámetro nominal de la tubería	Análisis de tendencias de roturas por el diámetro de las tuberías
9.-Protección de la tubería	Este es un indicador de la protección contra la corrosión característica de las tub de hierro dúctil y que pueden estar recubiertas o no dependiendo de la fecha de inst., y de las condiciones del suelo. Se deben anotar si existen protecciones catódicas	Evaluación de los programas de corrosión
10.-Tipo de Unión	Tipo de unión para conectar las tuberías	Análisis de tendencias de roturas por el tipo de unión de las tuberías
11.-Condición externa de la tub.	Condiciones externas en gral. independiente del tipo de material con particularidades. La dimensión y el grado de corrosión externa de la tub., basado en una inspección visual, checar los cuadros que lo describen mejor La dimensión y el grado de corrosión externa de la tub., basado en una inspección visual checar los cuadros que lo describen mejor	Proveer una valoración cualitativa del estado general del exterior de la tubería, y si corresponde la corrosión Puede ser usado para valorar si es necesario un recubrimiento u otras medidas preventivas
12.-Condición Interna de la tub.	Condiciones externas en gral independiente del tipo de material con particularidades. La condición del recubrimiento interior basado en una inspección visual,	Proveer una valoración cualitativa del estado general del exterior de la tubería, y si corresponde la corrosión Puede ser usado para valorar si es necesario un recubrimiento u otras medidas preventivas
13.-Superficie y tráfico	Describe la superficie bajo la cual la tubería fue instalada, en orden de estimar la carga de traf. que experimenta la tubería, por ejemplo una avenida con trafico pesado (comercial), y que cuenta con dos aspectos un volumen alto de trafico así como un numero considerable de vehículos pesados (autobuses, volquetas, etc.)	Nos auxiliara a determinar la causa de las roturas. También puede ser usado para examinar las tendencias en las roturas. Para el diseño futuro de las redes de abastecimiento y además para aplicar modelos mecanicos para la predicción de roturas.
14.-Cama	El tipo y la condición de la cama, basada en una observación visual es reconocido que la fuga puede de destruir la cama, y así ello dificultad la observación sobre la condición de la cama, de tal manera q examinando la pared de la excavación en áreas que no son destruidas, se obtendrá valiosa información	Nos ayuda a determinar la causa de la rotura, y para el diseño de las red en un futuro.

15.-Profundidad de la tub.	La distancia desde la superficie hasta el lomo de la tubería	Nos auxiliara a determinar la causa de las roturas. También puede ser usado para examinar las tendencias en las roturas. Para el diseño futuro de las redes de abastecimiento y además para aplicar modelos mecánicos para la predicción de roturas.
16.-Tipo de fallo	El tipo de roturas, basado en una observación visual	Nos ayuda a determinar la causa de la rotura, y para el diseño de las red en un futuro.
17.-Probable causa de fallo	Probable causa de fallo, basado en una observación visual.	Nos ayuda a determinar la causa de la rotura, y para el diseño de las red en un futuro.
18.-Mostrar localización de la rotura	Ilustrar donde ocurre el fallo	Nos auxilia a determinar la causa de fallo
19.-Categoría del suelo	El tipo de suelo que rodea a la tubería	Útil para análisis de las tendencias de roturas, auxilia a definir las características del suelo del entorno de las tuberías, las cuales son necesarias para la modelación mecánica.
20.-Propiedades del suelo	Las propiedades mas importantes del suelo, las cuales lagunas se obtendrán en situ y el resto será necesario obtener muestras para obtenerlas en el labotario	Útil para análisis de las tendencias de roturas, auxilia a definir las características del suelo del entorno de las tuberías, las cuales son necesarias para la modelación mecánica.
21.-Espesor de la pared de la tubería	Espesor de la pared de la tubería, también puede ser medido en campo	Auxilia a determinar la causa de la rotura, usado en modelos mecánicos para calcular el esfuerzo de la tub.
22.-Modulo de ruptura de la tubería	Modulo de ruptura de una muestra de tub. tomado del sitio de la rotura, esto se realiza en el laboratorio	Usado en modelos mecánicos para calcular el esfuerzo de la tub.
23.-Resistencia de la rotura de la tubería	La resistencia de la rotura se determina en el laboratorio, tomado de una muestra de la rotura en situ.	Usado en modelos mecánicos para calcular el esfuerzo de la tub.
24.-ID de la brigada	El nombre de la brigada para la investigación del historial de la tub. Y el sistema de inf.	Seguimiento para ampliar la información.
25.-ID de la rotura	Un único identificador asignado por la empresa de agua, para monitorear los incidentes y los datos relacionados	Proporciona un identificador común para el análisis de los datos
26.-ID de la tubería	Un identificador único para el rastreo de la tub. en la cual ocurre la rotura, si la empresa cuenta con un inventario de las tub. Se le asigna de lo contrario se genera.	Proporciona un identificador común para el análisis de los datos
27.-Longitud	La longitud de la tubería que sufre el fallo, esta longitud se refiere a la longitud registrada en el inventario de la base de datos.	Necesario para el desarrollo de programas específicos de renovación
28.-Antigüedad	Año de instalación de la tubería que fallo	Necesario para el análisis de la tendencia de roturas

29.-Presión de operación	Describe la presión típica en la zona, Nota cualesquier fluctuación inusual de la presión que pudiera contribuir al fallo de la tub.	Útil para los análisis de la tendencia de roturas, también puede auxiliar en los modelos mecánicos para la estimación de la carga en la tub.
30.-Tipo de servicio	Si el servicio es continuo las 24 hrs. o si es discontinuo, anotando el horario en caso de que sea discontinuo	Útil para la tendencia de roturas
31.-Temperatura del agua	La temperatura del agua al momento del fallo puede ser un indicador para la contribución del fallo	Útil para el análisis de la tendencia de roturas
32.-Temperatura del aire	La temperatura del aire al momento del fallo puede ser un indicador para la contribución del fallo	Útil para el análisis de la tendencia de roturas
33.-Presencia de lluvia antes de 24 hrs	Recolectar información de las precipitaciones en la zona del fallo	Útil para los análisis de la tendencia de roturas, también puede auxiliar en los modelos mecánicos para la estimación de la carga en la tub.
34.-Número de personal técnico	Número de empleados que son necesarios para la reparación del fallo	Útil para estimar el coste de la reparación
35.-Coste de operación de la reparación	Incluye todos los costes de operación necesarios en la reparación del fallo	Útil para estimar el coste de la reparación
36.-Tiempo de interrupción en el servicio	La duración del tiempo necesario para la reparación de la rotura	Útil para estimar el coste de la reparación
37.-Número de usuarios afectados	Estimar el número de varios tipos de usuarios que ven afectados por la suspensión del servicio debido al fallo y la subsecuente reparación de la tubería	Usado para estimar el coste indirecto de la rotura hacia los usuarios
38.-Propiedades dañadas	Si/No responder e indicar el número de propiedades dañadas	Útil para estimar el coste total de la reparación
39.-Tipo de propiedad dañada	Especificar el tipo de propiedad dañada, según se muestra las opciones, y señalar la distancia de proximidad a la propiedad	Útil para la evaluación de las consecuencias y clasificación de riesgo
40.-Coste de reparación	Aquí incluye todos los costes necesarios para la reparación de la consecuencias de fallo	Útil para estimar el coste de las consecuencias de fallo y clasificación espacial del riesgo

*Tabla 7. 28 Recomendaciones para la recolección de datos*



---

---

## 10.2 Datos de Campo

Los datos de campo, se refieren a la información que solo puede ser coleccionada en el sitio, donde se ha presentado la rotura, que incluye todas las observaciones visuales de los fallos y de su entorno. Y los procedimientos realizados para la reparación de los mismos, como se puede pensar, alguna de la información es obvia y solo requiere que las brigadas en campo registren lo sucedido, en los formatos correspondientes, otra información requerida, necesitara el juicio de la parte subjetiva por parte de la brigada, que toma los datos en campo y por consiguiente la valoración de la tubería que ha sido dañada, para así de esta manera determinar la posible causa de fallo. Esto debe de ser considerado al momento de la capacitación al personal, que conforman las brigadas que reparan las roturas y toman los datos de campo, a través de los formatos de campo correspondientes, los cuales deben de ser explicados detalladamente al personal de las brigadas.

La capacitación deberá de hacer hincapié, en la descripción de los datos que requiere la aplicación, de la parte del juicio subjetivo por parte de la brigada. Por ejemplo en la figura 7.40, requiere una valoración de las condiciones exteriores de la tubería, cada empresa de agua podrá desarrollar sus propios criterios, para la valoración de las tuberías como sucede actualmente, así como el ejemplo del llenado de la sección de la tubería, cada criterio podrá ser mostrado en el proceso de la capacitación como ejemplo. De esta manera y a través de ejemplos, es como se puede auxiliar para asegurarse que los datos que se recogen en campo, son consistentes con los múltiples datos de campo que serán coleccionados.

Finalmente es necesario recalcar, que la parte de la capacitación es fundamental que se realice lo mas explícitamente posible, y se uniformicen criterios. Debido que los datos coleccionados serán el componente principal de donde partirán los planes de renovación de cualesquier empresa de agua.

## 10.3 Datos de Oficina

Los datos de oficina incluyen la información relacionada con las tuberías, que sufren un fallo y que no pueden ser observados en campo, esto incluye los parámetros operacionales (presión y caudal), condiciones del entorno (temperatura del aire y agua), así como la historia de las tuberías que sufren un fallo. Lo cual requiere datos que puedan estar o no disponibles en campo, para las brigadas que son las encargadas de completar los datos.

Un ejemplo importante de los datos de oficina, es la identificación de las tuberías específicas que sufren un fallo, pueden proveer a las brigadas en campo la localización precisa, donde se presenta la rotura en términos de la dirección de la calle y de las intersecciones, sin embargo, en orden de analizar a través de la tendencia de las roturas, es importante contar el historial del mantenimiento, y por supuesto la edad de la tubería. Una vez que los datos de campo se han recibido en la oficina, se asocian con el identificador de la tubería, para ser identificado y guardado, idealmente esto dará pauta, para iniciar la investigación y análisis de la tendencia de roturas.

---

---

Esto hace imprescindible la necesidad, de contar con un sistema para identificar la sección específica de una tubería. Algunas empresas de agua usan el registro de la instalación de una tubería como su identificador. Por ejemplo, todas las tuberías instaladas en un único número de contrato, que comparten el mismo número identificador de la tubería. Esto permite a la empresa de agua hacer referencia a la tubería, con la información de instalación, pero si la longitud de tubería representada por el identificador de la tubería es demasiada larga, puede ser difícil aislar los fallos de esa tubería en específico.

Otras empresas de agua asignan números de identificación, a las tuberías utilizando la combinación del número de la zona del mapa o plano, calle, e incluso el bloque (las intercepciones) a lo largo de una calle. Esto proporciona un identificador único para una razonable longitud de la tubería, pero será requerido un trabajo considerable para enlazar estas identificaciones, con el historial del mantenimiento realizado en las tuberías. Un sistema de información geográfico, proporciona el instrumento más poderoso de la gestión, recuperación y análisis de información específica de la tubería, para su futura aplicación en el programa de renovación de tuberías.

#### **10.4 Datos de pruebas físicas**

Además de la información de campo y oficina, que debe ser coleccionada cada vez que se presenta una rotura, estos son otros datos de detalles físicos que pueden proveer información valiosa. Las pruebas de las tuberías y el suelo del entorno, pueden proveer información crítica para una empresa de agua, en el desarrollo de un programa de renovación de tuberías. Por ejemplo, existen tuberías que experimentan la reducción de flujos y problemas de calidad de agua, relacionados con la tuberculación en las tuberías de hierro. Se considera como una solución la limpieza interior y el recubrimiento, sin embargo, si la estabilidad estructural de la tubería no es la adecuada, el reemplazo de la tubería será la solución mas adecuada. Las pruebas del suelo son críticas en el desarrollo de los programas de la protección de la corrosión, para prolongar la vida de las tuberías.

Un programa de renovación de tuberías, que no aborda adecuadamente la corrosividad del suelo, no podrá lograr los resultados deseados. La falta de datos relativos a las condiciones del suelo, puede dar lugar a envejecimiento prematuro de las tuberías instaladas y formara parte de los programas de renovación.

##### **10.4.1 Pruebas a las tuberías.**

Las pruebas físicas que pueden ser realizadas en las tuberías de hierro galvanizado, todas las pruebas estructurales de la tubería serán realizadas en base las normas y especificaciones vigentes, correspondientes en cada zona, por ejemplo de la American Society for Testing and Materials (ASTM), al igual que American Water Works Association (AWWA) para los requerimientos específicos de las tuberías de agua. Las normas que rigen las tuberías de hierro fundido son AWWA C106/ANSI A21.6, para la fabricación de moldes de metal y AWWA 46 C108/ANSI A21.8, para la fabricación de moldes de arena. Tubería de hierro dúctil es la norma AWWA C151/ANSI A21.51. Las siguientes pruebas pueden proporcionar información valiosa sobre el estado de una tubería:

---

Espesor de la pared de la tubería (perdida) - La pérdida del espesor de la pared es una medida de la pérdida de metal debido a la corrosión, y proporciona una indicación del resto de la resistencia estructural. La determinación del espesor de la pared es a través de un medidor ultrasónico de acuerdo con la Norma ASTM E-797. Alternativamente, un micrómetro puede utilizarse para tomar mediciones representativas, en torno a la circunferencia de la tubería.

Resistencia a la tensión - La metodología de ensayo general se especifica en la Norma ASTM E-8, para las tuberías de hierro fundido y hierro dúctil. La preparación de la muestra es diferente para las tuberías de hierro dúctil y hierro fundido, y deben ser seguidas las especificaciones referentes AWWA / ANSI.

Dureza – la prueba de la dureza se especifica sólo para el molde de metal de hierro fundido, la preparación de la muestra y la metodología de la prueba se presenta en la Norma ASTM E-18.

Módulo de Ruptura - El módulo de ruptura de prueba debe hacerse de conformidad con AWWA C106/108, que también especifica el número de muestras y preparación de la muestra.

Porcentaje de carbono - El porcentaje de carbono en la muestra es una medida del grado de grafitización de la tubería. Grafitización es esencialmente la filtración del hierro de la tubería, resultando en una reducción de las fuerzas de las tuberías. Determinación del porcentaje de carbono en la tubería que se puede hacer usando el analizador de carbono y de azufre.

Las pruebas realizadas a las tuberías de PVC, que después de estar en contacto con otros elementos pueden clasificarse:

Pruebas de Calificación.- Pruebas a las que son sometidos las tuberías y materiales de los cuales están fabricados, para asegurar que las tuberías de PVC puedan cumplir sin excepción los requerimientos de las especificaciones aplicables. Las pruebas de calificación comúnmente usados en la fabricación de tuberías de PVC, son aplicadas para evaluar las siguientes propiedades de diseño:

Prueba de Clasificación de la Celda del Compuesto de PVC para Extrusión.- Se realiza de acuerdo a la norma NMX-E-31-1993-SCFI, para determinar las propiedades mecánicas y químicas de la materia prima, con la cual se fabrican los productos finales de PVC.

Prueba de Esfuerzo de Diseño Hidrostático a largo plazo.-Se realiza para determinar el esfuerzo a la tensión máxima permisible, soportado por la pared del tubo en sentido radial (hoop stress), provocado por la presión interna aplicada continuamente, con un alto grado de certidumbre de que no se presentará un fallo.

Prueba de Reventamiento rápido ( NMX-E-16-1993 ).-Se prueba una muestra de tubería y se presuriza hasta su reventamiento, la presión a la cual se presenta la ruptura debe exceder la presión mínima de reventamiento, requerida por la especificación aplicable.

---

---

Prueba de Aplastamiento ( NMX-E-14-1990 ).-Consiste en aplastar una muestra de tubo entre dos placas paralelas móviles hasta un 60%, (debe quedar entre las placas una distancia igual a un 40% del diámetro original), bajo esta condición la muestra no debe presentar rompimiento, fracturas o rajaduras.

Prueba de Calidad de Extrusión ( NMX-E-131-1993 ).-Una muestra de tubo se sumerge en un solvente durante un tiempo determinado, al termino de este se extrae la muestra y esta no debe presentar escamas o desintegración.

Prueba de Impacto ( NMX-E-29-1993 ).-Se colocan muestras de Tubo de PVC en un soporte, se le aplica un impacto por un mazo de metal de geometría y peso definido, desde una altura específica.

Prueba de Rigidez del tubo ( NMX-E-208-1993 ).-Similar a la prueba de aplastamiento, pero la muestra se aplasta ahora hasta un 5%, y en ese momento se mide con precisión la fuerza requerida para lograr esa deformación. Esta fuerza, por unidad de longitud dividida entre la deflexión vertical, es expresada en las siguientes unidades kilogramos por metro lineal por metro ( kg/m x m ) (Kpa), y es denominada rigidez del tubo a un 5%.

#### **10.4.2 Prueba del suelo**

Las características del suelo pueden afectar la condición de las tuberías de hierro de fundición y de hierro dúctil. En particular, los suelos corrosivos pueden reducir la vida útil de estas tuberías, a menos que se adopten precauciones. Recubrir las tuberías de hierro dúctil de un recubrimiento de polietileno, se ha convertido en práctica habitual para muchas empresas de agua, con el fin de proteger las tuberías contra la corrosión del suelo. Las normas que se pueden aplicar, para el recubrimiento de polietileno en las tuberías de hierro dúctil ANSI / AWWA C105/A21.5-82. Esta misma norma también describe los procedimientos de ensayo de suelos, para determinar si es necesario el recubrimiento de polietileno para proteger la tubería, contra la corrosión del suelo. Por lo tanto, la norma ANSI / AWWA C105/A21.5-82 es una buena guía para ayudar a las empresas de agua, en el desarrollo de programas de pruebas de suelo.

### **11 Aplicación del modelo Integral en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías**

Como complemento de este trabajo y con el objetivo de proporcionar una herramienta práctica y sencilla, pero sobre todo sistematizar los diversos cálculos necesarios, para el análisis de la toma de decisiones en la rehabilitación de tuberías. Se desarrollo la aplicación que integra los modelos de vulnerabilidad, eficiencia y de evaluación de las condiciones físicas, por ultimo cuenta con la opción de presentar un resumen de los resultados obtenidos.

Primeramente para iniciar la aplicación para la evaluación de las tuberías, es necesario contar con una base de datos previamente preparada, con los datos adecuados. Es decir, con los factores de influencia determinados y evaluados.

El modelo de vulnerabilidad (ver figura 7.42), tiene como objetivo evaluar las tuberías o grupo de tuberías que son mas vulnerables, y por consecuencia que poseen un orden mas primordial para la rehabilitación, en base a los factores de influencia. Así mismo este modelo de vulnerabilidad cuenta con un apartado de criticidad, que esta integrado por los factores del índice de deficiencia en los nodos, del impacto del caudal fugado en el comportamiento de la red, comparado con un nivel de eficiencia optimo y el índice de impacto en los usuarios.

Figura 7. 42 Aplicación del modelo de vulnerabilidad

Se consideraron los índices anteriormente mencionados como críticos, desde el punto de vista de la fiabilidad y disponibilidad del suministro, el adjetivo de “critico” se refiere a las tuberías que poseen un valor total alto de criticidad, son mas proclives a afectar usuarios neurálgicos, así de esta manera el usuario de la aplicación, obtendrá una suma aritmética de los tres factores y del total de los mismos, lo cual proporciona la opción de comparar, la evaluación del total de los factores de influencia. También podrá contar con el valor de la criticidad de las tuberías o grupos de tuberías.

En base al objetivo del tomador de decisiones, este podrá decidir si el factor de criticidad puede incidir en la toma de decisiones, pero lo importante es que cuente con la opción de valorar la criticidad, de cada uno de los grupos de tuberías. Además de la valoración del grupo de tuberías, respecto al total de los factores de influencia, que nos pueden indicar según valor total, cuales tuberías son más vulnerables y por consecuencia más prioritaria, para la toma de decisiones en la rehabilitación de tuberías.

En lo que se refiere al modelo de vulnerabilidad, la aplicación valora uno a uno el grupo de tuberías respecto al número de factores de influencia, proporcionando un valor parcial de los factores de criticidad, así como un valor del total de los factores, donde se puede mostrar el rango con los diversos factores de influencia, y sus respectivos valores

de la evaluación, al igual que los correspondientes pesos y sumas aritméticas, como se muestra en la tabla 7.29.

ID	Edad		Historial fugas		Capacidad transporte		Tiempo renovación		Influencia rotura		IDN		IIQfuga		IICusuarios medio amb.		Criticidad	$\Sigma$
	Período Inst.		W = 20.0%		W = 15.0%		W = 5.0%		W = 5.0%		W = 10.0%		W = 15.0%		W = 5.0%			
	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi	V	Wi*Vi		
AC (A1)	10.00	2.50	10.00	2.00	3.98	0.60	7.19	0.36	3.26	0.16	4.10	0.41	0.00	0.00	6.00	0.30	0.71	6.33
AC (A2)	5.63	1.41	9.19	1.84	4.64	0.70	0.00	0.00	3.04	0.15	5.80	0.58	2.45	0.37	4.80	0.24	1.19	5.28
FoFo (C1)	6.94	1.74	8.36	1.67	5.02	0.75	6.33	0.32	4.46	0.22	5.20	0.52	0.55	0.08	4.80	0.24	0.84	5.54
Fo Ga (C1)	9.77	2.44	9.25	1.85	4.73	0.71	3.85	0.19	4.57	0.23	4.60	0.46	4.62	0.69	10.00	0.50	1.65	7.07
Fo Ga (C2)	9.38	2.34	9.92	1.98	4.10	0.62	10.00	0.50	4.10	0.21	5.50	0.55	3.72	0.56	4.20	0.21	1.32	6.97
PVC30	6.25	1.56	6.78	1.36	4.92	0.74	0.00	0.00	0.12	0.01	3.60	0.36	3.24	0.49	6.00	0.30	1.15	4.81
PVC20	4.17	1.04	7.26	1.45	4.27	0.64	0.00	0.00	2.27	0.11	5.50	0.55	10.00	1.50	0.00	0.00	2.05	5.30
Poliétileno	5.21	1.30	9.10	1.82	2.86	0.43	0.00	0.00	1.12	0.06	10.00	1.00	2.23	0.33	0.00	0.00	1.33	4.94

Tabla 7. 29 Rango mostrado con el modelo de evaluación

El modelo de eficiencia como se muestra en la figura 7.43, se planteo con el objetivo de evaluar el grupo de tuberías, desde el punto de vista de la eficiencia en la red (análisis de costes y beneficios respecto al volumen fugado y el coste de la energía), considerando la probabilidad de fallo de cada grupo de tuberías, así como la longitud optima de cada grupo de tuberías para rehabilitar. La evaluación de este modelo, inicia con la selección de un grupo de tuberías disponible en la base de datos, una vez que se selecciona el grupo de tuberías que se quiere analizar, se pueden consultar los valores de los factores de coste y beneficio, al igual que al consultar los valores, nos proporciona la restricción presupuestal, la cual se puede modificar para adecuarla a nuestros objetivos.

Al aceptar, vamos obteniendo los valores correspondientes a cada grupo de tuberías seleccionado, los cuales se asignan a la hoja de Excel correspondiente, al rango de la estructura para la optimización. Una vez que es integrado por completo el número total de tuberías, se activa la opción de obtener optimización, dicha opción nos lleva a activar la interfaz de optimización de la herramienta de Excel.

Figura 7. 43 Aplicación del modelo de vulnerabilidad

En este modelo de eficiencia, se tiene la opción de determinar la probabilidad de fallo para cada uno de los grupos de tuberías, recalando que es necesario contar con una base de datos previamente preparada, con las características necesarias, en este apartado se muestra el rango con los valores del grupo de tuberías, que previamente se selecciono. Contando con la oportunidad de modificar los pesos asignados a cada factor, así como es posible mostrar los valores de los factores considerados, para la evaluación de la probabilidad de riesgo mostrados en la tabla 7.30.

ID	tipo del material			presión hidrostática			edad de la tubería			historial de fugas			medio ambiente			tipo de unión			continuidad en la operación			Σ			
	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>	W	K	P=F <sub>i</sub> *W <sub>i</sub>				
AC (A1)	0.05	0.20	<b>0.02</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.15	0.20	<b>0.03</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.20	<b>0.02</b>	0.21	
AC (A2)	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.20	0.40	<b>0.08</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.15	0.20	<b>0.03</b>	0.15	0.20	<b>0.03</b>	0.29
FoFo(C1)	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.15	0.60	<b>0.09</b>	0.15	0.20	<b>0.03</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.30
Fo Ga(C1)	0.05	0.60	<b>0.18</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.05	0.20	<b>0.01</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.35
Fo Ga(C2)	0.30	0.40	<b>0.12</b>	0.20	0.40	<b>0.08</b>	0.05	0.20	<b>0.01</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.05	0.40	<b>0.02</b>	0.05	0.40	<b>0.02</b>	0.35
PVC30	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.10	0.60	<b>0.06</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.05	0.60	<b>0.03</b>	0.05	0.40	<b>0.02</b>	0.20	0.40	<b>0.08</b>	0.20	0.40	<b>0.08</b>	0.27
PVC20	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.20	0.40	<b>0.08</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.05	0.20	<b>0.01</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.20	0.20	<b>0.04</b>	0.23
Polietileno	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.10	0.20	<b>0.02</b>	0.10	0.40	<b>0.04</b>	0.20	0.60	<b>0.12</b>	0.10	0.60	<b>0.06</b>	0.10	0.60	<b>0.06</b>	0.36
	1		0.48	1		0.36	1		0.36	1		0.26	1		0.26	1		0.31	1		0.33				

Tabla 7. 30 Rango para la evaluación de los factores de riesgo

Para determinar el índice de evaluación de las condiciones físicas, se realizan un sin número de cálculos, debido a la cantidad considerable de datos (por ejemplo en este caso aproximadamente 1700 tuberías), por tal motivo; es necesario la creación de macros, que permitan agilizar y sistematizar los cálculos. De esta manera se integro dicha macro, a la aplicación como modelo de evaluación de las condiciones físicas (ver figura 7.44), donde se cuenta con la opción de calcular el índice de beneficio de

Weibull, al igual que la respectiva grafica de las tuberías reemplazadas versus las roturas evitadas.

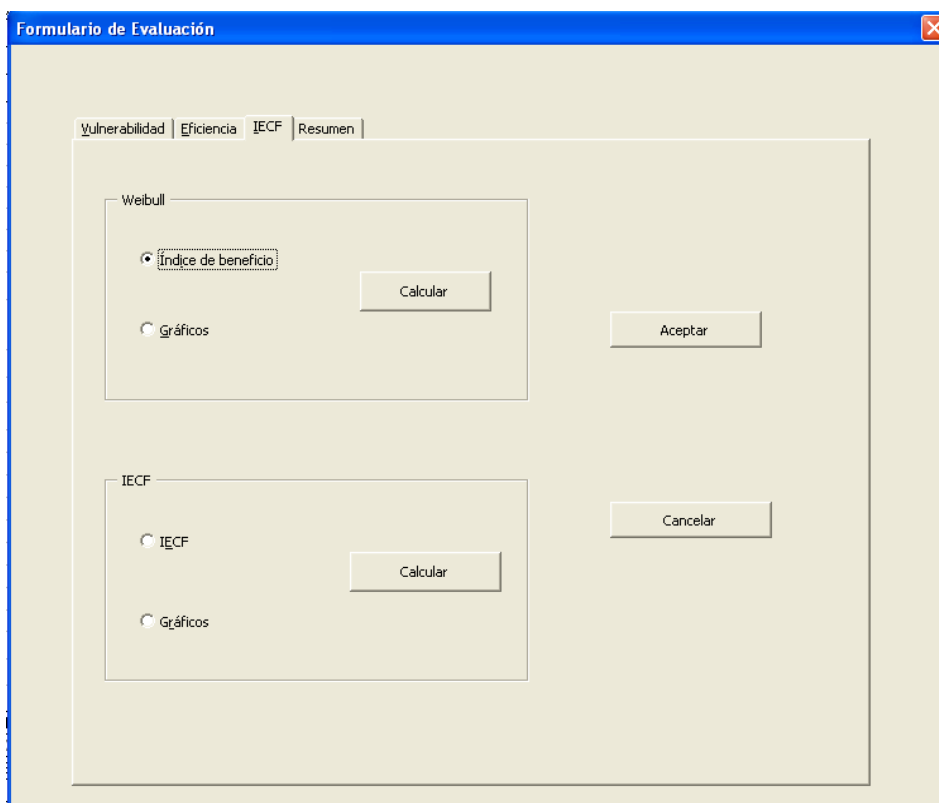


Figura 7. 44 Aplicación del modelo de IECF.

Así también se puede obtener el índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF), también con la obtención del respectivo grafico. En este modelo, al momento de calcular se puede observar el rango con el orden de priorización de las tuberías, y de los respectivos índices de evaluación. Como se muestra el extracto de la tabla 7.31.

ID Serie	ID	Número de fallos esperados	Número de fallos observados	Número de fallos acumulados observados	Priorización en base del número de fallos esperados	Porcentaje de fallos evitados si	Porcentaje de tub reemplazadas
T272	T463	4.1493	4	4	1	0.787	0.498
T391	T106	4.0144	2	6	2	1.181	0.995
T10	T85	3.9293	3	9	3	1.772	1.493
T398	T116	3.8721	4	13	4	2.559	1.990
T393	T21	3.7890	4	17	5	3.346	2.488
T449	T464	3.7828	4	21	6	4.134	2.710
T433	T10	3.7447	5	26	7	5.118	3.483
T463	T288	3.6833	0	26	8	5.118	3.980
T396	T119	3.6779	4	30	9	5.906	4.478
T434	T84	3.6521	1	31	10	6.102	4.975
T25	T398	3.6454	4	35	11	6.890	5.473
T302	T45	3.6221	0	35	12	6.890	5.970
T451	T19	3.6074	1	36	13	7.087	6.468
T287	T50	3.6050	3	39	14	7.677	6.965
T394	T272	3.5948	3	42	15	8.268	7.463
T21	T449	3.5221	6	48	16	9.449	7.960
T52	T64	3.4769	1	49	17	9.646	8.458
T234	T397	3.4689	2	51	18	10.039	8.955
T271	T302	3.4328	3	54	19	10.630	9.453
T436	T20	3.4152	3	57	20	11.220	9.950
T116	T451	3.4133	5	62	21	12.205	10.448

Tabla 7. 31 Priorización en base al número de fallos esperados



Finalmente existe la opción de obtener un resumen de los resultados, de cada uno de los modelos como se muestra en la figura 7.45, ya sea verlo en pantalla o imprimirlo, también se cuenta con la opción de guardar la sesión de trabajo.

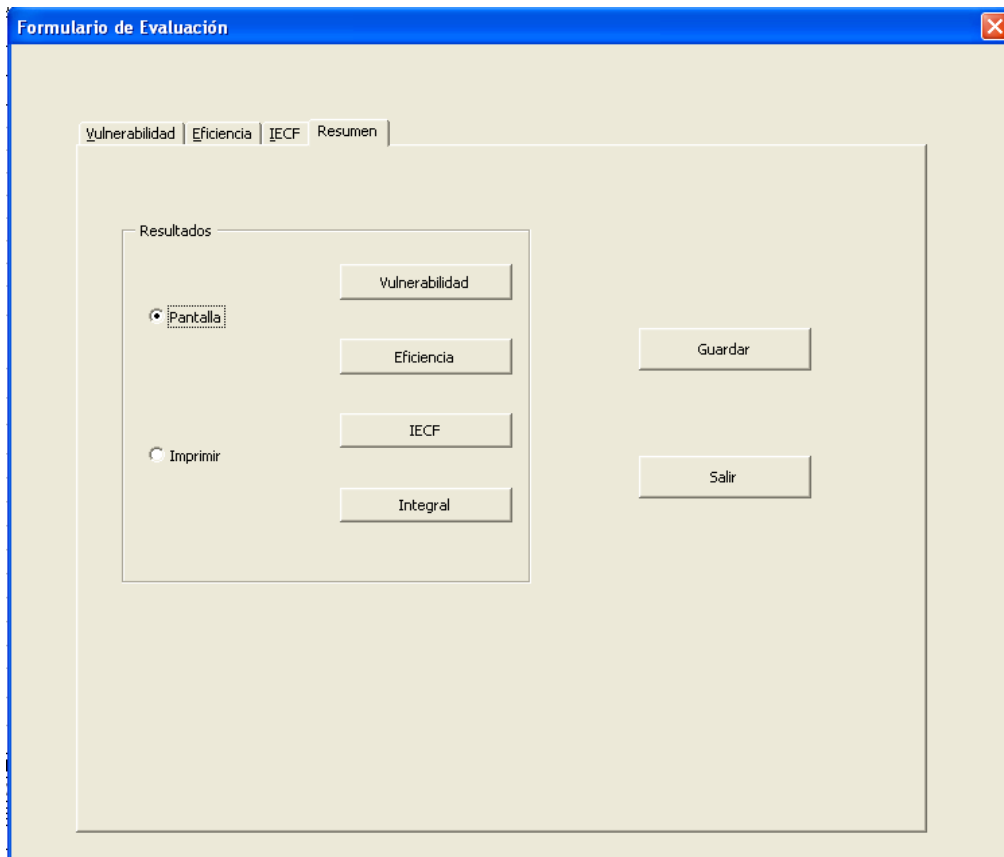


Figura 7. 45 Aplicación del modelo de IECF.

Respecto a los resultados de los modelos ya descritos, aparecen como se han detallado en párrafos anteriores, lo que respecta al resultado integral aparece como se muestra en la tabla 7.32.

ID	Criticidad	$\Sigma$	Orden de priorizacion	Longitud optima	Coste total
Fo Ga (C1)	1.884	7.07	1	1,198.00	\$627,294.00
Fo Ga (C2)	1.504	6.97	2	599.00	\$287,520.00
AC (A1)	0.71	6.33	3	897.00	\$427,869.00
FoFo (C1)	0.87	5.54	4	723.00	\$429,462.00
PVC20	2.55	5.30	5	674.00	\$317,454.00
AC (A2)	1.31	5.28	6	1,250.00	\$671,250.00
Polietileno	1.446	4.94	7	741.00	\$355,680.00
PVC30	1.308	4.81	8	781.00	\$383,471.00

Tabla 7. 32 Resultado del modelo integral, para la ayuda en la toma de decisiones

Como podemos observar, el sinóptico de los resultados obtenidos nos proporciona de una manera concisa pero clara, los elementos para realizar un análisis preliminar para la toma de decisiones, en la priorización para la rehabilitación de tuberías, que es el

---

---

objetivo principal de haber conjuntado los diversos modelos para elaboración de la aplicación, proporcionar una primer herramienta para los gestores de los sistemas de distribución. Es necesario mencionar que para realizar la aplicación del modelo integral con éxito, es importante contar con una base de datos bien estructurada, que cumpla con los requerimientos necesarios para poder llevar a cabo dicha aplicación.

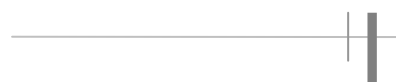


# Capítulo 8

---

## Conclusiones y desarrollos futuros





---

## 1 Conclusiones

El mantener en condiciones “funcionales” las redes de distribución de agua, resulta oneroso y en muchos de los casos, el recurso económico que se aplica no es para mejorar el sistema de distribución, sino para mantenerlo en condiciones no óptimas. Si además consideramos que los recursos disponibles para el mantenimiento y renovación de las tuberías resulta escaso, es imprescindible optimizar los recursos y para ello, es necesario contar con el mayor número de variables que intervienen en el comportamiento de las tuberías que conforman el sistema de distribución, es decir, los factores que influyen en el deterioro de las mismas.

Las redes de distribución de agua se deterioran tanto estructural como funcionalmente, por lo que los índices de rotura se incrementan, disminuyendo la capacidad hidráulica y afectando la calidad del agua. Como mencionamos, la restricción de los recursos hace que para los planificadores y quienes adoptan decisiones, sea primordial buscar un adecuado balance de costes- beneficios en la aplicación de estrategias de renovación y rehabilitación.

Se considera que el trabajo aquí presentado aborda las principales líneas en cuanto a las consideraciones en el análisis de fallo de las tuberías desde el punto de vista de los factores que interactúan con la tubería, y los factores que hacen a una tubería más vulnerable que otra a la probabilidad de fallo. El aspecto económico está patente en los volúmenes de caudal fugado y el coste de la energía perdida, así como también en la energía necesaria para suministrar los consumos y para mantener la presión mínima requerida, y por supuesto, en el deterioro estructural.

Conjuntar los diversos aspectos que intervienen en el proceso de la toma de decisiones para la renovación de tuberías, requiere de un arduo trabajo de campo para la recolección de la información, y de un amplio procesamiento y análisis de dicha información recabada.

Cabe mencionar que en las empresas de agua existe una gran variedad respecto a la estructura de la base de datos de las tuberías, que va desde los datos más elementales inherentes a la tubería tales como el diámetro, longitud, tipo de material, etcétera, hasta los datos que requieren una recolección más especializada, como son el historial de fallos y de su entorno, y otros factores que intervienen en los fallos de las tuberías, como el nivel de tráfico, el tipo de cama de la zanja, instalaciones próximas de otros servicios urbanos. Lo ideal sería explotar al máximo la vida útil de las tuberías sin afectar la seguridad, fiabilidad, calidad del agua y la eficiencia económica.

La planificación eficaz para la renovación de los sistemas de distribución de agua, requiere una cuantificación precisa del deterioro estructural de todas las tuberías. Para ello, la inspección directa de todas las tuberías es excesivamente costosa y laboriosa. La aplicación de modelos físicos para evaluar el estado estructural de cada tubería resulta también complicada por varias razones; una de ellas es porque los datos que se requieren, rara vez están disponibles y son costosos de obtener. Por ello, los métodos estadísticos para determinar los patrones de fallo a través del tiempo, constituyen una alternativa eficaz y económicamente viable para determinar el deterioro estructural de la tubería.

---

Debemos de considerar que uno de los mayores beneficios en la aplicación del modelo para la toma de decisiones, es evitar las consecuencias causadas por el fallo de una tubería. En este trabajo se introduce un nuevo individuo estadístico, cada vez que una de las variables seleccionadas cambia, específicamente, cuando cambia la variable del número de fallos previos.

Además, como se esperaba y como ya fue señalado, la longitud de la tubería juega un papel importante en los modelos: las tuberías de mayor longitud tienen mayor probabilidad de sufrir roturas, y en consecuencia, la clasificación de la población de tuberías dada con sus direcciones, muestra que dos segmentos localizados a lo largo de la misma calle, pero separados por una intersección, pueden aparecer en primer lugar en el riesgo de las tuberías, mientras la intersección entre estas dos segmentos de tuberías no, probablemente debido a su longitud y su posterior “Nfpo”.

La base de datos se obtiene a partir de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de la JUMAPA, lo que permite delimitar físicamente cada individuo estadístico, asociado a un vector de variables. El propio SIG permite la visualización física del segmento en función de sus características, así como la visualización del agrupamiento de las roturas, tales características también permiten la visualización física del agrupamiento de las roturas, lo que podrá ser útil para, eventualmente, sugerir nuevas variables aun no consideradas.

Ya se ha mencionado que el surgimiento de los SIG en los servicios de agua proporciona una herramienta accesible y rápida para el análisis estadístico, y si consideramos que la tendencia es que mejoren aun más, junto con la disponibilidad de una herramienta de gestión de datos, esencial para el mejoramiento del análisis estadístico, todo ello redundará en la amplitud y precisión de los alcances del análisis estadístico.

El modelo desarrollado se basa en los eventos de fallos en las tuberías. Uno puede imaginarse fácilmente que una fuga podría ser igualmente el evento de fallo. La continua aparición de sistemas de detección de fugas, como los utilizados actualmente en París, New York, etcétera, y en diversos países del mundo, debe de auxiliar también a generar los datos necesarios, para mejorar y hacer más eficiente el análisis estadístico. La combinación de los modelos de deterioro y los datos de fugas, permitirán vislumbrar un verdadero programa de prevención de fugas.

La degradación estructural es considerada y abordada de manera amplia. El Índice de Evaluación de las Condiciones Físicas (IECF), debería ser el primer paso hacia la creación de un índice global de la condición física de la tubería, que incorpora el funcionamiento hidráulico y el deterioro estructural.

Es importante analizar los resultados para el pronóstico de roturas, del que puede obtenerse un número de tuberías que deben ser reemplazadas. Sin embargo, en la práctica habitual de las empresas de agua, resulta casi imposible satisfacer todos los reemplazos previstos, debido a las limitaciones de recursos financieros. Así, observamos, por ejemplo, que si se reemplazase el 33.67% de las tuberías, serían evitadas el 50% de las roturas.

---

Una estrategia que también se encuentra en el nivel de gestión de la bases de datos, de modo que sea posible redefinir fácilmente la población estadística completa, es demostrado que algunos factores de riesgo asumidos, fueron significativos o para probar las posibles mejoras, una opción no ofrecida en este trabajo. Las mejoras en el nivel de la gestión de la bases de datos, debería incluir también la posibilidad de que los valores de la “NFPO” y del “time”, se recalculen cada vez que se considere un nuevo horizonte de datos de rotura.

En el caso que se ha presentado tenemos que el 90.07% de las roturas (en los próximos 2 años) son evitadas si el 81.71% (con un IECF) de todas las tuberías son reemplazadas (la base de datos con todos los individuos es la población de referencia). Cuando se consideran las tuberías que no son de acero, el 90.47% de las roturas son evitadas, si el 89.05% (con un IECF) de las tuberías son reemplazadas. Con las tuberías de acero, el índice de roturas evitadas alcanza el 90.47% para sólo el 78.74% (con un IECF) de las tuberías.

Si los objetivos del índice de reemplazo son bajos (menos del 2%) los resultados alcanzados son naturalmente bajos; 20.03% de las roturas pueden ser evitadas, si el 11.56% (con un modelo de Weibull) de todas las tuberías son reemplazadas; 20.47% de las roturas pueden ser evitadas, si el 14.06% (con un modelo de Weibull) de las tuberías que no son de acero son reemplazadas; 20.14% de las roturas pueden ser evitadas, si el 11.52% (con un modelo de Weibull) de las tuberías de acero son reemplazadas.

Los modelos muestran que los factores del entorno de las tubería (la proximidad a las canalizaciones, trafico, etcétera) juegan un papel modesto comparado con la aplastante importancia de los factores tales como el material (un sustituto para el periodo de manufactura en algunas bases de datos) o en menor medida, el historial de roturas, la longitud, etcétera.

Todos los modelos explorados muestran claramente que una de las conclusiones a la que podemos llegar, es que el tiempo de instalación no es realmente un factor determinante para ser considerado en exclusividad en los trabajos de priorización de la rehabilitación de tuberías; como observamos en los diferentes resultados obtenidos a través de los diferentes métodos, la edad no es un factor de peso mayor en el momento de tomar una decisión.

Cuando se utiliza una forma paramétrica de Weibull, el presente trabajo nos indica que la estratificación en el historial de roturas no mejora los resultados, y que la estratificación en el material los mejora pero marginalmente, no en una medida que la base de datos sin estratificar no puede ser considerada. Por esta razón, fue propuesto un índice de evaluación de las condiciones físicas (IECF). Dicho índice nos proporciona resultados similares, con la mejor conformación de los modelos de riesgo proporcional de Weibull, y por lo tanto, aparece como una sencilla pero muy eficiente herramienta cuando el objetivo es la priorización del orden de las tuberías a rehabilitar.

Si se quiere realizar una extensión del trabajo de optimización, son necesarias las formas paramétricas de Weibull de las funciones de riesgo y supervivencia, para generar la probabilidad de fallos o el número de fallos que se espera en cualquier momento de un horizonte de planificación.

---

Los resultados se obtuvieron con una historia de fallos relativamente corta (siete años), y la validación se realizó para un historial de dos años. Con este trabajo se confirma que una importante censura izquierda, no pone en riesgo el uso de modelos de predicción. Esto puede ser debido al hecho que las políticas de mantenimiento y construcción del departamento de la JUMAPA ha cambiado sobre los años. También, este trabajo confirma que un importante dato de censura, no pone en peligro la utilización de modelos de predicción. Además, cualquiera que sea el reagrupamiento de datos, aunque muy importante, los datos del historial de las roturas constituyen, en este caso, una variable dominante del modelo.

Es necesario mencionar que, aunque los modelos de riesgo proporcional arrojan resultados válidos satisfactorios, con una base de datos del historial de roturas cortas, lo ideal es seguir conformando un historial de roturas, para poder contar con un base de datos de un periodo mas largo, al objeto de realizar un análisis estadístico. Además, la calidad de la información se podrá mejorar aun más, permitiendo un análisis más rápido y más sencillo, al momento del tratamiento de los datos. Con una base de datos para un periodo mas largo, la gran ventaja será contar con mejores elementos en la variable del número de fallos previos.

En este trabajo, el índice de evaluación de las condiciones físicas fue utilizado para identificación de las tuberías de mayor riesgo, dentro de un grupo de tuberías de la ciudad de Celaya, Gto. México, específicamente para el extenso sector Centro y del sector San Juanico Poniente. A partir de la modelación de siete años de los datos de fallos para la población completa de tuberías, para un estrato de tuberías de acero galvanizado, para otro estrato de tuberías de asbesto-cemento y polietileno.

En párrafos anteriores se hace énfasis en la necesidad de una mayor investigación sobre la identificación de factores de riesgo adicionales, el formato más apropiado para documentar algunos factores de riesgo conocidos, así como la introducción de herramientas en la gestión y manejo de los datos para la identificación de nuevas variables. Se puede pensar en adecuar un sistema de información geográfica, enfocado a la identificación de nuevas variables como factores de riesgo. También resulta de importancia la utilización de los datos que se recabaron en primer lugar para otro propósito, utilizados ahora para los modelos de priorización u optimización de tareas de rehabilitación.

Este trabajo muestra que la información útil es un valioso apoyo para la planificación de la rehabilitación de tuberías, y puede ser generada por el análisis de los datos (que originalmente no habían sido coleccionados para este tipo de análisis), incluso en un entorno complejo, donde no se pueden tomar en consideración varias causas de fallo. Con una mejor selección y preparación de datos, los resultados podrían ser incluso mejorados. Cuando se combina el análisis de datos con las tecnologías disponibles hoy en el mercado, tales como los sistemas de información geográfica, sistemas de detección de fugas o de modelación hidráulica, el potencial de una sofisticada herramienta de toma de decisiones, encaminadas a facilitar la planificación de la rehabilitación de un sistema de tuberías, puede convertirse en una característica estándar de las empresas de agua, lo que cada vez se hace más presente.

Es necesario reiterar que uno de los principales activos de estos enfoques es que requieren poca inversión, además de hacer uso de los datos con los que se cuenta para



---

---

facilitar la operación de los sistemas de distribución. Por lo tanto, hoy en día las empresas de agua se enfrentan con enormes perspectivas en el terreno del reemplazo de las tuberías, y la valoración económica de sustitución. Por tal motivo, debe de ser explorada la aplicación de métodos innovadores relacionados con este objetivo, lo que provocará importantes ahorros al aplicar estos enfoques sistemáticos.

La conclusión general que resulta de este trabajo es que un modelo de riesgo proporcional, que implica el uso de variables específicas del entorno y de las tuberías dentro de un modelo estructural de la degradación del sistema, pueden utilizarse para determinar la priorización en el proceso de reemplazo, incluso en un medio ambiente complejo urbano como el proporcionado por la Ciudad de Celaya, Gto.

## **2 Desarrollos futuros**

La incorporación del modelo desarrollado en este trabajo dentro de un sistema de información geográfico (SIG) es una de las prioridades futuras, y para ello es recomendable que la base de datos del historial de fallos se plantee y se diseñe para que permita realizar el análisis estadístico de manera sencilla y rápida.

También se propone como un trabajo a medio plazo, realizar un análisis estadístico de la base de datos, con un periodo de tiempo mayor al analizado en este trabajo, y contrastar los resultados. Asimismo, integrar otras variables predictoras relacionadas con el entorno, tales como la temperatura y la precipitación en el área de estudio, debido al tipo de suelo de la ciudad de Celaya.

Una vez que se ha realizado este trabajo, destaca la necesidad de nuevas investigaciones sobre la identificación de factores de riesgo adicionales, con el formato adecuado de los factores de riesgo conocido, pero introduciendo la herramienta de gestión de los datos tales como un SIG más específico, con el objetivo de identificar más fácilmente las nuevas variables. Por otra parte, una herramienta de este tipo podría mejorar sustancialmente la capacidad analítica de un modelo estadístico, así como la calidad de la información que se obtiene.

También se observó en este proceso de investigación que los datos de las empresas de agua y los esfuerzos dedicados para el establecimiento de prioridades en la optimización de los planes de rehabilitación, han provocado que los datos que se recabaron para otro propósito, se apliquen para el análisis de fallos. Por ello resulta necesario trabajar conjuntamente en la investigación por parte de la comunidad académica, en la identificación de los factores de riesgo adicionales, y por parte de las empresas del agua, en las formas de integrar mejor la base de datos, estando ambas líneas dirigidas a auxiliar la planificación de la rehabilitación en los sistemas de distribución. También existe la necesidad de desarrollar una nueva metodología que controla la influencia de la longitud de la tubería.

Los modelos de Weibull generan funciones de riesgo y supervivencia, y permiten el cálculo de las probabilidades de fallo. A su vez pueden ser utilizados en análisis de coste-beneficio. Este es un ambicioso tema que a menudo capta el interés de los investigadores, pero que pocas empresas de servicios públicos están en condiciones de

---

---

realizar, puesto que sólo tiene ventajas si todos los costes son identificables, una posibilidad que requiere una investigación exhaustiva.

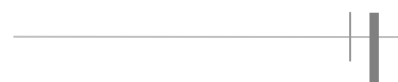
Por otro lado y en base a la investigación detallada en el estado del arte que se realizó en este trabajo, respecto los modelos existentes y metodologías empleadas para la programación óptima en la renovación de las tuberías podemos decir que es necesario establecer una programación plurianual, que aporte una jerarquización de los trabajos que hay que realizar y una consideración de las necesidades financieras, sobre el horizonte de planificación. El instrumento desarrollado podrá aportar un sistema de soporte a la decisión multiobjetivo, más robusto y completo, tal vez acudiendo ya a un algoritmo genético más robusto no paretado para la búsqueda de políticas aceptables, y proponiendo una gestión para la determinación de un conjunto de soluciones viables, entre las cuales el gestor de la red distribución de agua, pueda seleccionar una política de renovación, que se traduzca en una programación plurianual de trabajos de renovación.

Por último, consideramos que se puede particularizar más en la priorización para la renovación de tuberías, en el aspecto económico con las consideraciones técnicas necesarias de las redes de abastecimiento, agregar el factor de la reparación, como opción en la aplicación de los recursos, con los beneficios o penalizaciones que se generen.



# **Bibliografía**





- 
- Abraham, D.M. and Wirahadikusumah, R. (1999). Development of prediction models for sewer deterioration, Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Vancouver, National Research Council. pp 1257-1267.
- Achard, P. Chantre, P. and Madiec, H. (1994). Gestion patrimoniale des réseaux: le point de vue de l'exploitant . Colloque Mieux gérer l'eau, Proceedings from Hydrotop, Marseille, 1994, pp 185-189.
- Alonso, C., Pérez-García, R., Izquierdo, J. y Delgado X. (2007). Mecanismos de Análisis y Metodología para la Planeación en la Rehabilitación de Tuberías, Proceedings 7ª Edición SEREA. Seminario Iberoamericano, Morelia, México, pp 72-84.
- Alonso, C., Pérez, R., Izquierdo, J. y Montalvo, I. (2008). Influencing Factors for Scheduling Optimal Pipeline Replacement with Budgetary Constraints. Proceedings of 7th International Conference Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, pp 130-138.
- Alonso, C., Pérez, R., Izquierdo, J. y Montalvo, I. (2009). Factores de fiabilidad y eficiencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de tuberías, Proceedings IX Seminario Iberoamericano – SEREA, Valencia, España, pp 26-32.
- Andersen, P. Borgan, O. Gill, R. and Keiding, N. (1993). Statistical Models Based on Counting Processes, Springer-Verlag, N.Y.
- Andreou, S. A. (1986). Predictive models for pipe failures and their implications on maintenance planning strategies for deteriorating water distribution systems. Phd Thesis, Department of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, USA. 191p.
- Andreou, S. Marks, D.H. and Clark, R.M. (1987b). A New Methodology for modelling Break failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems: Applications. Journal of Advanced Water Resources, 10, March, pp 11-20.
- Arnoux, P. (1998). Modélisation du vieillissement d'un réseau d'eau potable en fonte et application aux stratégie du renouvellement, Thèse de doctorat; ENGEES, 138 p.
- Arrow, K.J. and Fischer, A.C. (1974). Environmental preservation, uncertainty and irreversibility, Quarterly Journal of Economics, Vol. n°98. pp 85-106.
- Bancel, F. and Richard, A. (1995). Les choix d'investissement, Méthodes traditionnelles, flexibilité et analyse stratégique. Ed Economica. Paris.
- Basseur, M. (2005). Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif : Application aux problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR D'I.E.E.A. Lille, France.

- 
- Berro, A. (2001). Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique. Thèse de Doctorat. Université Toulouse I, Toulouse, France.
- Bertin, S. (1994). Indices de fiabilité d'un système de distribution d'eau potable. Strasbourg, Ecole Nationale du Génie en Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Boxall, J. B. O'Hagan, A. Pooladsaz, S. Saul, A. J. and Unwin, D. M. (2007). Estimation of burst rates in water distribution mains. *Water Management*, Vol. 160, Issue: 2, pp 73-82.
- Brothers, K. J. (2001). Water leakage and sustainable supply-truth or consequences? *J. Am. Water Works Assoc.*, 93(4), pp 150–152.
- Burn, L.S. Tucker, S.N. Rahilly, M. Davis, P. Jarrett, R. and Po, M. (2003). Asset planning for water reticulation Systems - the PARMS model. *Water Science & Technology: Water Supply*, Vol. 3. pp 55-62.
- Burn, S. Ambrose, M. Moglia, M. Tjandraatmadja, G. and Buckland, P. (2004). Management strategies for urban water infrastructure. IWA World Water Congress & Exhibition, Marrakech.
- Camarinopoulos, L. Pampoukis, G. and Preston, N. (1996b). Reliability of a Water Supply Network. In: *Proceedings of ESREL'96, Probabilistic Safety Assessment and Management*.
- Chakib, K-Z. Alfred, Z. K. and Fleming, P. V. (1992). A smart failure mode and effect analysis package. In *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Las Vegas, NV. pp 414–421.
- Chowdhury, M. A. Ahmed, M. F. and Gaffar, M. A. (1999). Water system leak detection in secondary towns of Bangladesh. *Water Supply*, 17(3,4), pp 343–349.
- Clarke, L. V. Bainbridge, H. Beck, S. B. M. and Yates, J. R. (1997). Measurement of fluid flow rates through cracks. *Int. J. Pressur Vessels Piping*, pp 71–75.
- Clark, M. Stafford, C. and Goodrich, J. (1982). Water Distribution Systems: a Spatial and Cost Evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, October, 108, pp 243-256.
- Clark, R. M. and Goodrich, J. A. (1989). Developing a data base on infrastructure needs. *J. Am. Water Works Assn.*, pp 81-87.
- Coittoni, A. S. (1985). Updating the New York City water system. *Proceedings of the Specialty Conference on Infrastructure for Urban Growth*. . New York, pp 69-77.
- Cole, E. S. (1912). The cost of leaks: Does it pay to stop them? *Proc.*, 32nd Annual Convention of the American Water Works Association, Louisville, Ky., American Water Works Association, Denver.

- 
- Colombo, A. and Karney, B. (2001). The energetics of leaky pipes in distribution systems. Proc., CCWI 2001 6th Int. Conf. on Computing and Control in the Water Industry, Research Studies Press, Hertfordshire, U.K.
- Colombo, A. and Karney, B. (2002). Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture (ASCE). Vol. 128, n° 6. pp 441-450.
- Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. Journal of the Royal Statistical Society. Series B, pp 187-220.
- Cox, D. R. and Oakes, D. (1984). Analysis of Survival Data. Published by Chapman and Hall, New York, NY. 215p.
- Dafflon, B. (1998). La gestion des finances publiques locales. Ed Economica. ISBN :2-7178-3513.Paris. 284p.
- D'Agata, S. (2003). The go with what you know approach to forecasting future asset replacement expenditure. Water supply 3, pp 51–54.
- Dandy, G. C. and Engelhardt, M. (2001). Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 127, n°4. pp 214-223.
- Davis, P. and Burn, L.S. (2001). CSIRO BCE Doc. 01/299. Classifying failures in water pipelines, CSIRO BCE, Melbourne, Australia.
- Davis, P. Moglia, M. Gould, S. and Burn, L.S. (2004). Physical based probabilistic models to estimate failure rates in PVC pipe networks. 6th Annual Symposium of Water Distribution Systems Analysis, Environmental & Water Resources Institute of American Society of Civil Engineers (EWRI/ASCE), Salt Lake City, USA.
- Deb, A.K. Hasit, Y.J. Grablutz, F.M. and Herz, R.K. (1998). Quantifying Future Rehabilitation and Replacement Needs of Water Mains. Denver, Colorado: AWWARF and AWWA.
- Deb, A.K. Momberger, K.A. Hasit, Y.J. and Grablutz, F.M. (2000). Guidance for Management of Distribution System Operation and Maintenance. Denver, Colo.: AWWARF and AWWA, forthcoming.
- Dempster, A. (1968). A generalization of Bayesian inference. Journal of Royal Statistical Society, Series B, 30, pp 205–247.
- Devi-Prasad, T. and Park, N-S. (2004). Multiobjective Genetic Algorithm for Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 130, n°1. pp 73-82.
- Dridi, L. Mialhot, A. Parizeau, M. and Villeneuve J. P. (2005). A strategy for optimal replacement of water pipes integrating structural and hydraulic indicators based on a statistical water pipe break model. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International

---

conference on Computing and control for the Water Industry, U. of Exeter, UK, September, pp 65-70.

Dubois, F. and Parade, H. (1988). *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Plenum Press.

Eisenbeis, P. (1994). *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Eisenbeis, P. (1997). Estimating the aging of a water mains network with the aid of a record of past failures. In: *Proceedings of the 10th EJSW at Tautra*, Norwegian University of Science and Technology, IVB-report B2-1997-2, ISBN 82-7598-040-2, pp125-133.

Eisenbeis, P. Rostum, J. and Le Gat, Y. (1999). *Statistical Models for Assessing the Technical State of Water Networks - Some European Experiences*. In: *Proceedings of annual conference of AWWA*, Chicago, Illinois, 20 – 24 June 1999. pp 32-40.

Eisenbeis, P. Le Gat, Y. Laffréchine, K. Le Gauffre, P. Konig, A. Rostum, J. Tuhovcak, L. and Valkovic, P. (2002). *CARE-W: WP2 – description And validation of technical tools D3 – report on models description*. Care-w, EU project Under the 5th framework programme, contract n°EVK1-CT-2000-00053.

Environmental Protection Agency, US-EPA. (2002). *Decision-Support tools for Predicting the Performance of Water Distribution and Wastewater Collection Systems*, EPA/600/R- 02/029. [www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs](http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs). pp 7-46.

Environmental Protection Agency, US-EPA. (2003). *Asset Management: A Handbook for Small Water Systems One of the Simple Tools for Effective Performance (STEP) Guide Series*. EPA /816/R-03/016.

Fleming, T. R. and Harrington, D. P. (1991). *Counting Processes and Survival Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y.

Fonseca, C.M and Fleming, P.J. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimisation: Formulation, discussion and generalization. In *Genetic Algorithms: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference*, pp 416-423.

Fullwood, R. R., and Hall, R. E. (1988). *Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry*, 1st ed. New York: Pergamon Press.

Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civ. Eng. Syst.*, 2, pp 171–179.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Ed. Addison Wesley, Reading, MA.

Goodwin, S. J. (1980). *The results of the experimental program on leakage and leakage control*. Tech. Rep. TR 154, Water Research Centre, Swindon, U.K.



- 
- Goulter, I.C. and A. Kazemi. (1988). Analysis of Water Distribution Pipe Failure Types in Winnipeg, Canada. *Jour. Transportation Engineering*. 15. pp 91-97.
- Grablutz, F. and Hanneken, S. (2000). Economic Modelling for Prioritizing Pipe Replacement Programs. AWWA Infrastructure Conference and Exhibition. Baltimore, MD, 14 March 2000.
- Gustafson, J. M. and Clancy, D. V. (1999). Modeling the occurrence of breaks in cast-iron water pipelines using methods of survival analysis. Proc., AWWA Annual Conf., Denver.
- Hadzilacos, T. Kalles, D. Preston, N. Melbourne, P. Camarinopoulos, L. Eimermacher, M. Kallidromitis, V. Frondistou-Yannas, S. and Saegrov, S. (2000). UtilNets: A water mains rehabilitation decision-support system. *Computers, Environment and Urban systems* n° 24, pp 215-232.
- Halhal, D. Walters, G.A. Ouazar, D. and Savic, D.A. (1997). Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, n°3, pp 137-146.
- Hansen, G.K. and Vatn, J. (2000). Combining hydrostatic and reliability models for water distribution networks. To appear in: Proceedings of Foresight and Precaution Conference, 15<sup>th</sup> - 17<sup>th</sup> May 2000, Edinburgh, Scotland, UK.
- Harrouz, O. (1996). Conséquences de la squelettisation des réseaux d'alimentation en eau potable sur le diagnostic, modèle de simplification. Thèse de doctorat en génie de l'environnement. Université Louis Pasteur. Strasbourg. France.
- Herbert, H. (1994). Technical and economic criteria determining the rehabilitation and/or renewal of drinking water pipelines. *Water Supply*, 12(Zurich), pp 105-118.
- Herz, R.K. (1996). Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution works Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. *Journal of Water SRT - Aqua*, Vol. 47, pp 275-283.
- Herz, R.K. and Lipkow, A. (2002). Life Cycle Assessment of Water Mains and Sewers, *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 2, núm. 4, pp 51-72.
- Hirner, W. (1997). Maintenance and rehabilitation policies for urban water systems. *Water Management International*.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation of Natural and Artificial System*. Univ. of Mich. Press, Ann Arbor, USA.
- Horn, J. Nafpliotis, N. and Goldberg, D. (1994). A niched Pareto Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization. In Proceedings of the first IEEE conference on

---

Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Toronto, Canada. pp 82-87.

Hoskins, R.P. Brint, A.T. and Strbac, G. (1998). A structured approach to asset management within the electricity industry, *Utilities Policy*, n° 7. pp 221-232.

Hoyland, A. and Rausand, M. (1994). *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Hunaidi, O. Chu, W. Wang, A. and Guan, W. (2000). Leak detection for plastic water distribution pipes. *J. Am. Water Works Assoc.*, 92 (2), pp 82–94.

Iglesias, R. P. Izquierdo, S. J. López, P. G. and Martínez, S. F. (1999). Geographical Information Systems (GIS) applied to Water Distribution Systems (WSS). In *Drought Management Planning in Water Supply Systems*. Kluwer Academic Publishers. Holanda, pp 22-51.

Insightful Corporation, I. (2001). *S-PLUS 6 for Windows Guide to Statistics, Volume 2*, WA: Insightful Corporation, Inc., Seattle.

Ivaltemir, B. Reis, L. Walters, G. and Dragan S. (2004). Operational Optimization of WDS Based on Multiobjective Genetic Algorithms and Operational Extraction Rules Using Data Mining, *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. Vol. 446, n°. 3. pp 1-8.

Kaara, A. F. (1984). A decision support model for the investment planning of the reconstruction and rehabilitation of mature water distribution systems. PhD Thesis, MIT, Cambridge, MA.

Kalbfleisch, J. and Prentice, R. (1980). *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. John Wiley and Sons, New York.

Kelly, D. and O'Day, D. (1982). Organizing and analyzing leak and break data for making replacement decisions. *Journal AWWA*, November, 74(11), pp 589-594.

Kettler, A. J. and Goulter, I. C. (1985). An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution Network, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12, pp 286-293.

Kim, J.H. and Mays, L.W. (1994). Optimal Rehabilitation Model for Water-Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. September/October .Vol. 120. No. 5, pp 674-692.

Klein, J. and Moeschberger, M. (1997). *Survival analysis: Techniques for Censored and Truncated data*. Springer, New York.

Kleinbaum, D.G. (1998). *Applied regression analysis and other multivariable methods*”, Duxbury.

Kleiner, Y. (1997). *Water Distribution Network rehabilitation, Selection and Scheduling of Pipe rehabilitation Alternatives*. PhD thesis, University of Toronto.

- 
- Kleiner, Y and Adams, R. (1998a). Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 8.
- Kleiner, Y. and Adams, R. (1998b). Selection and scheduling of rehabilitation alternatives for water distribution systems. *Water Resources Research*, Vol. 34 No. 8.
- Kleiner, Y. and Rajani, B. (1999). Using limited data to assess future need. *J. AWWA*, 91 (7), pp 47–62.
- Kleiner, Y. and Adams, R. (2001). Water Network Renewal Planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 15, No. 1.
- Kleiner, Y. and Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban water* 3, pp 131-150.
- Klir, J. G. (1995). Principles of uncertainty: What are they? Why do we need them? *Fuzzy Sets and Systems*, 74, pp 15–31.
- Klir, J. G. (1999). On fuzzy set interpretation of possibility theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 108, pp 263–273.
- Klir, G. J., and Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic— Theory and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Knowles, J. and Corne, D. (1999). The Pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for multiobjective optimisation. In *Proceedings of the Congress on Evolutionary computation*, pp 98-105, IEEE Service Center.
- Koehl, J. (2003). *Les choix d'investissement*. Ed Dunod. ISBN : 2100069268. Paris.
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24, pp 65–75.
- Kumar, D. and Klefsjo, B. (1994). Proportional hazards model – a review. *Reliability Engineering & System Safety*, 44, pp 177-188.
- Lai, C. C. (1991). Unaccounted for water and the economics of leak detection. *Water Supply*, 9 (3,4), IR1-1–IR1-8.
- Lansley, K. and Basnet, E. (1991). Parameter Estimation for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, N. 1.
- Lansley, K. Basnet, E. Mays, E. and Woodburn, J. (1992). Optimal maintenance scheduling for water distribution systems. *Civil Engineering Systems*. Vol. 9, pp 211-226.
- Le Gatt, Y. and Eisenbeis, P. (2000). Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban Water* 2, pp 173-181.

- 
- Le Gatt, Y. (2002). Personal communication.
- Le Gauffre, P. Baur, R. Laffr chine, K. Schiatti, M. and Cintoli, S. (2003). Survey of multicriteriatechniques and selection of relevant procedures. D7 report. CARE-W (ComputerAided Rehabilitation of Water networks), EU project under the 5<sup>th</sup> Framework Program, contract n EVK1-CT-2000-00053, 31 p.
- Le Gauffre, P. Baur, R. Laffr chine, K. Wery, C. Torterotot, J. and Eisenbeis, P. (2002a). Elaboration de critères pour l'aide   la construction des programmes annuels de r habilitation des réseaux d'eua potable. Toulouse, Fr.
- Le Gauffre, P. Baur, R. Laffr chine, K. and Miramond, M. (2002b). Multicriteria decision support for the annual rehabilitation programmes of water networks. Proceedings Int. Conf. Decision Making in Urban and Civil Eng. London (UK). ISBN 09043544 74. pp 655-660.
- Lee, H. M. (1996). Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development. Fuzzy Sets and Systems, 79, pp 323–336.
- Lei, J. (1997). Statistical approach for describing lifetimes of water mains - Case Trondheim Municipality. STF22 A97320, SINTEF, Trondheim.
- Li, D. and Haines, Y. (1992). Optimal maintenance-related decision making for deteriorating water distribution systems. Semi-Markovian model for a water main. Water Resources Research, Vol. 28. No. 4, 1053-1061.
- Li, D. and Haines, Y. (1992). Optimal maintenance-related decision making for deteriorating water distribution systems. Multilevel decomposition approach. Water Resources Research, Vol. 28. No. 4, 1063-1070.
- Lounis, Z. and Vanier, D. (1998). Optimization of bridge maintenance management using markovian models. Proceedings of the International Conference on Short and Medium SpanBridges, Proceedings CALGARY, Canda. pp 311-320.
- MacGillivray, B.H. Hamilton, P.D. Strutt, J.E. and Pollard, S.J. (2006). Risk analysis strategies in the water utility sector: An inventory of applications for better and more credible decision making. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36(2), pp 85–139.
- Machine, D. Cheung, Y. and Palmar, M. (2006). Survival Analysis: A Practical Approach, 2nd ed. 278 pp. Wiley .
- Mailhot, A. Poulin, A. and Villeneuve, J. (2003). Optimal Replacement of Water Pipes, Water Resources Research, vol. 39, n m. 5, may., pp 1-13, 37
- Maino, M. (1993). Programación multicriterio: Un instrumento para el diseño de sistemas de producción. Informe Tecnico para la FAO, Santiago de Chile. pp 59.

- 
- Makar, J.M. and Kleiner, Y. (2000). Maintaining Water Pipeline Integrity, AWWA Infrastructure Conference and Exhibition, Baltimore, Maryland, pp 78-93.
- Malandain, J. Le Gauffre, P. and Miramond, M. (1998). Organising a Decision Support System for Infrastructure Maintenance: Application to Water Supply Systems. In: Proceedings of 1st International Conference on new Information technologies for decision Making in Civil Engineering, Oct 11-1998, Montreal, pp 1013-1025.
- Malandain, J. (1999). Modélisation de l'état de santé des réseaux de distribution d'eau pour l'organisation de la maintenance. Doctoral thesis – INSA Lyon, May 1999, pp 206.
- Marks, D. Andreou, S. Jeffrey, L. Park, C. and Zaslavsky, T. (2003). A. Statistical Models for Water Main Failures. EPA/600/S5-87/003. January 1988.
- Mays, L. W. (2000). Water distribution systems handbook, McGraw-Hill.
- Meneghin, M. (1999). Fabbisogno, consumi, portate e perdite nella pratica di esercizio delle reti di distribuzione d'acqua potabile a sollevamento meccanico. L'Acqua, N°4, Abril 1999, pp 55-65.
- Mogolia, M. Burn, S. and Meddings, S. (2006). Decision support system for water pipeline renewal Prioritisation. *CSIRO BCE*, Melbourne, Australia. ITcon Vol. 11, pp 237-256.
- Morgan Kaufmann. Frondistou-Yannas S and Saegrov S (2000). UtilNets: A water mains rehabilitation decision support.
- Morris, R.E. (1967). Principal Causes and Remedies of Water Main Breaks. *Journal AWWA*, pp 782-798.
- Mosevoll, G. (1994). Vedlikehold og fornyelse av VA- ledninger: Modeller for tilstands-prognose / Funksjonskrav til informasjon systemer. Dr. Ing avhandling, Institutt for Vassbygging, Norges Tekniske Hogskole, Universitetet i Trondheim.
- Mousseau, V. F. and Naux, J.Ph. (2001). Using assignment examples to infer weights for ELECTRETRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research* N° 130: pp 263-275.
- Nafi, A. (2006). La programmation pluriannuelle du renouvellement des reseaux d'eau potable. Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France.
- O'Day, K. (1984). Againg water supply systems: repair or replace? Infrastructure maintenance and repair of public works, *Annals of the New York Academy of Sciencies*. 431, pp 241-258.
- O'Day, K. (1984). Water main evaluation for rehabilitation /replacement, *AWWARF and the U.S. EPA Guidance Manual*. Subject Area: Distribution Systems.

- 
- O'Day, K. Weiss, R. Chiavari, S. and Blair, D. (1989). Water main evaluation for rehabilitation/replacement. Guidance manual of AWWARF.
- Ormsbee, L. and Kessler, A. (1990). Optimal Upgrading of Hydraulic-Network Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. Vol. 116, n°. 6. pp. 784-802.
- Parmar, M. and Machin D. (1995). *Survival Analysis: A Practical Approach*. Wiley, Johns & Sons, Inc. September.
- Parra, J. (2006) Renovación de redes de abastecimiento de agua mediante sistemas soporte a la toma de decisión multicriterio. Diploma de estudios avanzados. Universidad Politecnica de Valencia.
- Parsons, D. P. (1997). Management benefits of mains rehabilitation through structures surveys. Workshop on performance indicators and distribution systems. LNEC Lisboa 5-7.
- Pascal, O. and Revol, D. (1994). Renovation of water supply system. Water supply Congress, International Water Supply Association, (Budapest) pp 6-12.
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic Reasoning in Expert Systems*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Price, M. and Reed, D. (1989). The influence of mains leakage and urban drainage on groundwater levels beneath conurbations in the UK. *Proc., Inst. Civ. Eng., Part 1*, 86, pp 31-39.
- Quimpo, R.G. and Shamsi, U.M. (1991). Reliability-Based Distribution-System Maintenance. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 117, No. 3, May-June, pp 321-339.
- Quimpo, R.G. (1996). Measures of Water Distribution System Reliability. In: *Proceedings of Risk Based Decision Making in Water Resources*, Santa Barbara, California. October 8-13. pp 167-174.
- Raestad, C. (1995). Nordic Experiences with water pipeline systems. 3rd International Conference, Sector C- Pipe materials and handling, CEOCOR Praha '95. pp 82-96.
- Rajani, B. and Kleiner, Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban water* n° 3. pp 177-190.
- Rajani, B. and Kleiner, Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban water* Vol n°3, pp177-190.
- Ricci, P. F. Sagen, L. A., and Whipple, C. G. (1981). *Technological Risk Assessment Series E: Applied Series No. 81*, NATO Asi Series, Erice (Italy).

- 
- Romero, C. (1993). *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones*. Alianza Universidad-Textos, Madrid.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las Decisiones Multicriterio*, Serie de Monografías de Ingeniería de Sistemas, ISDEFE, 1996, Madrid.
- Ross, T. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 2<sup>nd</sup> ed. New York:Wiley.
- Rossman, L.A. (2000). *Epanet2 User Manual*. Water Supply and Water Resource Division of the U.S. Environmental Protection Agency, EPA. USA.
- Rostum, J. Doren, L. and Schilling, W. (1997). *Proceedings of the 10th EJSW at Tautra. Deterioration of Built Environment: Buildings, Roads and Water Systems*, Norwegian University of Science and Technology, IVB-report B2-1997-2, ISBN 82-7598-040-2.
- Rostum, J. (2000). *Statistical modelling of pipe failures in water networks*. PhD thesis, 2000:12, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. ISBN 82-7984-033-8.
- Roy, B. Present, M. and Silhol, D. (1996). A programming method for determining which Paris metro stations should be renovated. *European Journal of Operational Research*, pp 318-334.
- Sadiq, R. Kleiner, Y. and Rajani, B. (2004). Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks. *AQUA – Journal of Water Supply: Research & Technology*, 53(4), pp 241– 261.
- Saegrov, S. Melo Baptista, J. Conroy, P. Herz, R.K. LeGauffre, P. Moss, G. Oddevald, J.E. Rajani, B. and Schiatti, M. (1999). *Rehabilitation of water networks: Survey of research needs and on-going efforts*. *Journal of Urban Water*
- Savic, D. and Walters, G. (1997). Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol.123, n°2. pp 67-77.
- Schneider, C. Haines, Y. Li, D. and Lambert, J. (1996). *Capacity Reliability of Water Distribution Networks and Optimum Rehabilitation Decision Making*, *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp 2271-2278.
- Shamir U. and Howard, C. (1979). An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement, *Journal of AWWA*, Vol. 71, No 5, May, pp 248-258.
- Sharp, W. and Walski, W. (1988). Predicting Internal roughness in water mains. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 80, No. 11.
- Skipworth, P. Engelhardt, M. Cashman, A. Savic, D. Saul, A. and Walters, G. (2002). *Whole life costing water distribution network management*. Thomas Telford Publishing Edition. ISBN 072773032 0. London 203 p.

- 
- States, S. Scheuring, M. Kuchta, J. Newberry, J. and Casson, L. (2003). Utility-Based Analytical Methods to Ensure Public Water Supply Security, *Journal of American Water Works Association*, vol. 95, núm. 4, abr., pp 103- 115, 17.
- Stephens, K. Earth Tech. and Jackson, J. OWASA. (2003). Water Main Rehabilitation Prioritization - Getting the Data together for OWASA. Twenty-Third Annual ESRI User Conference, San Diego, California, USA July 7-11.
- Stone, S. Dzuray, D. Meisegeier, A. Dahlborg, S. and Erickson, M. (2002). Decision-Support Tools for Predicting the Performance of Water Distribution and Wastewater Collection Systems. Logistics Management Institute for WSWRD, NRMRL, U.S. EPA. EPA/600/R-02/029.
- Sundahl, A.C. (1997). Geographical analysis of water main breaks in the city of Malmo, Sweden. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 46(1), pp 40-47.
- Suokas, J. and Rouhiainen, V. (1993). *Quality Management of Safety and Risk Analysis*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Therneau, T. and Grambsch, P. (2000). *Modeling Survival Data: Extending the Cox Model*, Springer-Verlag, N.Y.
- Therneau, T. Grambsch, P. and Fleming, T. (1990). Martingale-based residuals for survival models, *Biometrika* (77), pp 147–160.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution network design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water* n°2. pp 115-122.
- Torterotot, J.P. Rebelo, M. Wery, C. Craveiro, J. and Guerra, R. (2003). Rehabilitation of water networks: decision-making processes and socio-economic issues. CARE-W Project (Computer Aided Rehabilitation of Water Networks) - Projet du 5ème Programme Communautaire de Recherche et Développement - contrat n°EVK1-CT-2000-00053 - 77p.
- Tuhovcak, L. and Rucka, J. (2007). Risk Analysis of Water Supply Project Water Republic, Meeting Water Risk. *Risk Czech*, pp 67-99.
- UtilNets. (1997). *Reliability-Based Decision Support System for the Maintenance Management of the Underground Network of Utilities*. (Final technical report), Computer Technology Institute.
- Vairavamoorthy, K. and Lumbers, J. (1998). Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control. *J. Hydrologic Eng.*, 124 (11), pp 146–154.
- Vanreenterghem, A. (2003). *Modeling of the Structural degradation of an Urban Water Distribution System*. PhD. Thesis. Polytechnic University, Brooklyn, NY.
- Vatn, J. (1993). *OREDA Data Analysis Guidelines*. report STF75 F93024, SINTEF Sikkerhet og palitelighet, Trondheim.

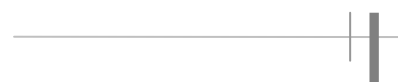


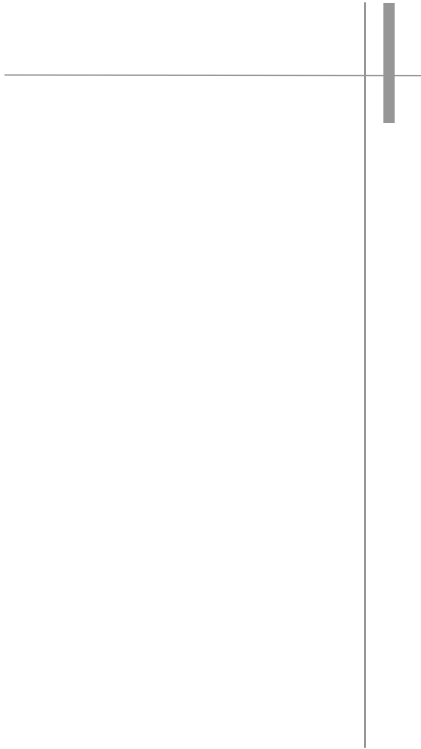
- 
- Vatn, J. and Tveit, O. (1997). Modeling and reliability of a water distribution network STF38 A96446, ISBN 82-595-9638-5, SINTEF Sikkerhet og palitelighet, Trondheim.
- Vincoli, J.W. (1994). Basic Guide to Accident Investigation and Loss Control. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Vitkovsky, J. P. Simpson, A. R. and Lambert, M. F. (2000). Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. J. Water Resour. Plan. Manage., 126 (4), pp 262–265.
- Wagner, J.M., Shamir, U. and Marks, D.H. (1988a). Water Distribution Reliability: Analytical Methods. Journal of Water Resources Planning and Management, May, 114, pp 253-275.
- Wagner, J.M. Shamir, U. and Marks, D.H. (1988b). Water Distribution Reliability: Simulation Method. Journal of Water Resources Planning and Management, May, 114, pp 276-294.
- Walski, T.M. and Pellicia, A. (1982). Economic analysis of water main breaks, Journal AWWA, Vol n° 74,n°3. pp 140-147.
- Walski, T. M. (1987). Battle of networks models: Epilogue. J. Water Resour. Plan. Manage., 113(2), pp 191–203.
- Walski, T. M. (1993). Tips for saving energy in pumping operations. J. Am. Water Works Assoc., 85(7), pp 49–53.
- Walski, T. M. and Gessler, J. (1999). Discussion of Improved design of Anytown Distribution network using structured messy genetic algorithms, by G. A. Walters, D. Halhal, D. A. Savic, and D. Ouzar. Urban Water, Vol 1 n°2, pp 265–268.
- Wengstrom, T.R. (1993a). Comparative analysis of pipe break rates: a literature review. Institutionen for Vattenforsorjnings- och avloppsteknik, Chalmers tekniska hogskola.
- Werey, C. (2000). Politiques de renouvellement des réseaux d'eau potable. Thèse en génie del'environnement. Université Louis Pasteur. Strasbourg. France. 162p.
- Woodburn, J. Lansley, K. and Mays, L. W. (1987). Model for the optimal rehabilitation and replacement of water distribution system components. Hydraulic Engineering, pp 606-611.
- Wu, S.J. Yoon, J.H. and Quimpo, R.G. (1993). Capacity-Weighted Water Distribution-System Reliability. Reliability Engineering & System Safety, 42, pp 39-46.
- Xu, C. and Goulter, I. (1999). Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 125, n° 6. pp 352-362.

---

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, pp 338– 353.

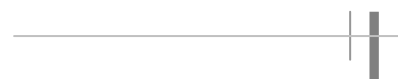
Zitzler, E. Deb, K. and Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation Journal*, 8(2), pp 125-148.





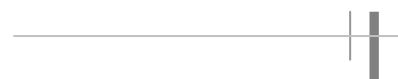
# Anexo 1





---

**Informe de Recuperación de Agua  
Distrito Hidrométrico 18  
“Col. San Juanico 1 y 2”**



---

---

### **A.1. 1 Definición y descripción del Distrito Hidrométrico**

Existen diferentes técnicas para la detección y localización de fugas, una de ellas es mediante la medición en Distritos Hidrométricos (DH). Los distritos hidrométricos son sectores que pueden aislarse hidráulicamente de la red de distribución con movimientos de válvulas y que pueden utilizarse para precisar el diagnóstico, detectar fugas, facilitar la eliminación y optimizar el control de pérdidas. Para aplicar efectivamente este método, se deben disponer de mapas de la red suficientemente actualizados, tener válvulas ubicadas en los puntos de control y tener una estación de medición. La técnica de DH consiste básicamente en aislar sectores de la red, donde se realizan mediciones de los volúmenes abastecido y consumido por los usuarios en cada sector, durante un período de 24 horas como mínimo.

El DH 18 esta integrado por la colonia San Juanico 1ra y 2da sección y se desarrolla en un área de 18.23 hectáreas aproximadamente, este comprende un total de 1683 tomas domiciliarias contratadas en ½" de diámetro. La topografía del lugar en donde se desarrolla el Distrito Hidrométrico es relativamente plana, el total de la zona en estudio cuenta con calles pavimentadas a base de concreto hidráulico, asfáltico y empedrado. Las características de la población son las de una clase media.

El DH 18 se ubica en la parte NorPoniente de la mancha urbana de la ciudad de Celaya, Gto., colindando al norte con la colonia San Juanico 3ra Sección, al sur con la colonia Nuevo Celaya, al este con la colonia Laureles y al oeste con la Col. Pinos. La planeación del DH surgió de la necesidad de realizar el diagnóstico de pérdidas de agua y tomar las medidas pertinentes para lograr la mayor cantidad de recuperación posible.

Para la conformación de este DH se requirió verificar el catastro de redes de agua potable con el que se contaba, por este motivo se realizaron recorridos para la ubicación de las redes así como de las cajas de operación de válvulas. Se realizaron levantamientos en formatos tipo para tener la descripción de cada crucero en cada una de las cajas de operación de válvulas, se utilizó el equipo detector de metales para la localización de tapas de cajas ocultas en cada crucero de calles; asimismo fue necesaria la realización de sondeos en puntos estratégicos para la ubicación de codos, tapones, profundidades y distancias; para poder referenciar cada línea e identificar el material que las componen.

Lo anterior, también fue corroborado en las cajas de válvulas encontrándose que actualmente existen 29 válvulas de seccionamiento y dos estaciones de medición, las cuales se encuentran a la salida de la fuente de abastecimiento Pozo San Juanico 2.

En la siguiente tabla se muestra las cantidades de tuberías que comprende este distrito hidrométrico.

<b>TUBERÍAS EXISTENTES EN EL DH 18</b>			
<b>DH 18</b>	<b>Longitud</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Material</b>
Sub-Total	2836.20	3"	PVC
Sub-Total	1024.63	4"	PVC
Sub-Total	1106.33	6"	PVC
<b>Total</b>	<b>4967.16</b>	<b>m</b>	

Tabla A.1 tuberías existentes

En el Distrito Hidrométrico se tiene una longitud de 4967.16 m de tubería de PVC de 3", 4" y 6" de diámetro.

Se pueden apreciar mayores detalles sobre la disposición y distribución de las tuberías en el plano del Distrito Hidrométrico (Anexo 1).

### **A.1. 2 Trabajos necesarios para la adecuada sectorización**

Derivado de la verificación del catastro de redes de agua potable, se actualizó el plano de redes del DH y con dicha información se revisó si existían interconexiones con alguna otra zona. Posteriormente se realizó la prueba de aislamiento del DH, la cual consiste en realizar una campaña de medición de presiones al interior y exterior del DH con las fuentes de abastecimiento operando. Posteriormente se deja de suministrar el servicio de agua potable al DH y se realiza una nueva campaña de mediciones de presión. Si el DH está aislado entonces las presiones al interior del DH deben tender a cero y las presiones fuera del DH deben de mantenerse.

Al realizar la prueba se considero que se había logrado el aislamiento del DH, por lo que se programo la prueba de aforo.

Cabe mencionar que cuando se realizó la inspección física de las cajas de válvulas existentes, así como de las válvulas que alojan en su interior, se verifico el estado de operación, y si se encontraron con fuga se canalizaban al departamento de redes para su reparación. En este DH se trataron de definir subsectores, pero muchas de las válvulas no funcionan adecuadamente

### **A.1. 3 Análisis del Padrón de Usuarios**

Una de las tareas principales dentro del Programa de Recuperación de Agua, es el análisis del padrón de usuarios, donde se hace una revisión principalmente del comportamiento de los consumos de los usuarios, volúmenes consumidos por tipo de usuario, etc. A continuación se presenta un análisis por rango de consumo, número de cuentas dentro de cada rango y el porcentaje correspondiente, referido al total de cuentas con medidor dentro del Distrito Hidrométrico.



<b>ANÁLISIS DE CONSUMOS</b>			
<b>COLONIA SAN JUANICO 1RA Y 2DA SECCIÓN</b>			
<b>ENERO A DICIEMBRE DEL 2004</b>			
<b>Rango Consumo Promedio</b>	<b>Rango</b>	<b>No. Cuentas</b>	<b>%</b>
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$> 0 m^3$	337	98%
<i>Cuentas con consumo promedio;</i>	$< 0 m^3$	0	0%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$= 0 m^3$	7	2%
<b>Total de Cuentas</b>		<b>344</b>	<b>100.0%</b>
<i>Cuentas con consumo promedio;</i>	$1 a 15 m^3$	138	40.1%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$15 a 25 m^3$	128	37.2%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$25 a 30 m^3$	27	7.8%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$30 a 40 m^3$	31	9.0%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$40 a 50 m^3$	3	0.9%
<i>Cuentas con consumo promedio ;</i>	$=> 50 m^3$	10	2.9%
<b>Total de Cuentas</b>		<b>337</b>	<b>98%</b>

Tabla A.2 Analisis de los consumos del sector

En total se tienen 344 cuentas con medidor. Como se puede apreciar la mayor parte del patrón tiene un consumo mayor a cero con un 98 % en donde los consumos de 1 a 15 m<sup>3</sup> ocupa el 40.1% y consumos de 15 a 25 m<sup>3</sup> el 37.2%.

#### **A.1. 4 Aforos (interpretación, análisis y cálculo de índices)**

Con el propósito de determinar los índices de pérdidas físicas en el Distrito Hidrométrico 18 de la ciudad de Celaya, se instaló un medidor electromagnético de inserción en la estación de medición para medir los caudales que ingresan al DH. Cabe mencionar que se tuvieron que cerrar varias válvulas que interconectan la zona en estudio con las colonias Pinos y San Juanico 3ra sección para poder realizar una medición adecuada.

En la figura 1 se muestra el aforo realizado en el DH en el período del 3 al 5 de diciembre del 2005.

A continuación se presentan los consumos y el índice de consumo mínimo nocturno que se tiene en la zona en estudio.



---

---

El consumo horario promedio,  $CHP = 22.452 \text{ l/s}$

El consumo mínimo nocturno,  $CMN = 14.691 \text{ l/s}$

Con estos datos obtenemos Índice de consumo mínimo nocturno,

$$ICMN = \frac{CMN}{CHP} = \frac{14.691}{22.452} = 0.654$$

Al ver el valor que toma el índice, se tiene que el valor del índice de consumo mínimo nocturno es un mucho mayor al ideal de 0.20, o bien 20% lo cual indica que se tienen problemas de fugas o pérdidas en el DH.

Por otro lado vale la pena destacar que no se tienen grandes consumidores en la zona, que pudiesen tener grandes consumos nocturnos, razón por la cual se toma el valor del ICMN como válido.

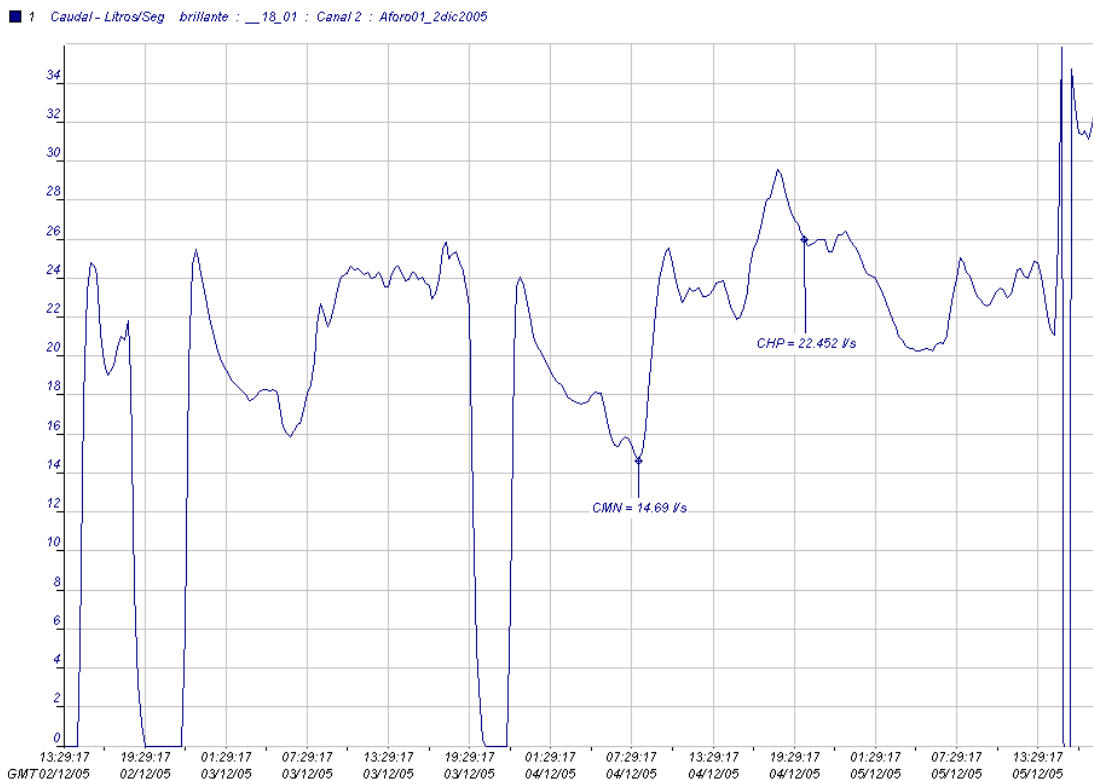


Figura A.1 Curva de aforo distrito “San Juanico”

---

---

### A.1. 5 Detección de fugas y usos no autorizados

Estas actividades fueron ejecutadas por personal del departamento de Sectorización y Recuperación de Agua del organismo Operador de Celaya. Se revisaron todas las tomas domiciliarias cotejando el estado que guardaban dentro del padrón de usuarios y revisando también el giro de cada usuario, encontrándose 21 tomas con usos no autorizados.

Estas anomalías fueron canalizadas a los departamentos: Medición y Catastro, y Cartera Vencida para que revisarán la información y procedieran a tomar las acciones que fueran necesarias. De esta forma el depto. de Cartera Vencida una vez revisados los listados, dio instrucciones al departamento de medidores para cancelar el servicio en los domicilios que se habían reconectado; por otra parte el departamento de medición y catastro una vez hecha su revisión giró instrucciones de igual forma al departamento de medidores para que cancelaran el servicio a todos los usuarios irregulares.

También se realizó la detección de fugas revisando todas las tomas y la red de distribución con los aparatos acústicos con los que cuenta el departamento, detectándose 7 fugas. Lo cual no concuerda con la cantidad de pérdidas determinadas a través del índice de consumo nocturno por lo que se infiere que el DH no se encuentra aislado realmente y se requiere realizar una revisión minuciosa para determinar las posibles salidas de agua.

### A.1. 6 Diagnóstico de micromedición

Con el objeto de obtener un panorama general del estado que guarda la micromedición en el Distrito Hidrométrico 18 (col. San Juanico 1 y 2da sección), se obtuvo el padrón de usuarios con el Sistema de Información Geográfica (MapInfo); analizándolo se obtuvieron los siguientes resultados:

<i>COBERTURA EN MICROMEDICION DE LA COLONIA SAN JUANICO 1ra Y 2da SECCION</i>		
	<i>No</i>	<i>%</i>
<i>cuentas con medidor</i>	<i>344</i>	<i>32</i>
<i>cuentas sin medidor</i>	<i>742</i>	<i>68</i>
<i>total de cuentas</i>	<i>1086</i>	<i>100</i>

Tabla A.3 Cobertura de la micromedición en el sector



<b>COBERTURA DE TARIFAS DE LA COLONIA SAN JUANICO 1ra Y 2da SECCION</b>			
<i>Clave de Servicio</i>	<i>Tipo de Servicio</i>	<i>No de cuentas</i>	<i>%</i>
11C	DOMESTICO JUBILADO INSEN C	92	8
12C	DOMESTICO JUBILADO INSEN C	24	2
13C	DEPARTAMENTO C	216	20
10C	DOMESTICO C	695	64
15C	CASA ABANDONADA, DESTRUIDA O DESHABITADA C	5	0
17C	SERVICIO PUBLICO C	1	0
21B	COMERCIAL BASICO B	1	0
21C	COMERCIAL BASICO C	41	4
23C	COMERCIAL MEDIO C	3	0
29C	TARIFA PREFERENCIAL C	1	0
35C	INST. EDUCATIVAS PREESCOLAR C	1	0
36C	INST. EDUCATIVAS PRIMARIA C	1	0
39C	INST. EDUCATIVAS PREESCOLAR PRIVADO C	1	0
40A	CANC. DE TOMA PROVISIONAL	4	0
		1086	100

Tabla A.4. Clasificación de las tarifas

A continuación se muestra mediante una gráfica de tipo pastel la cobertura que se tiene en micromedición en el Distrito Hidrométrico en estudio.

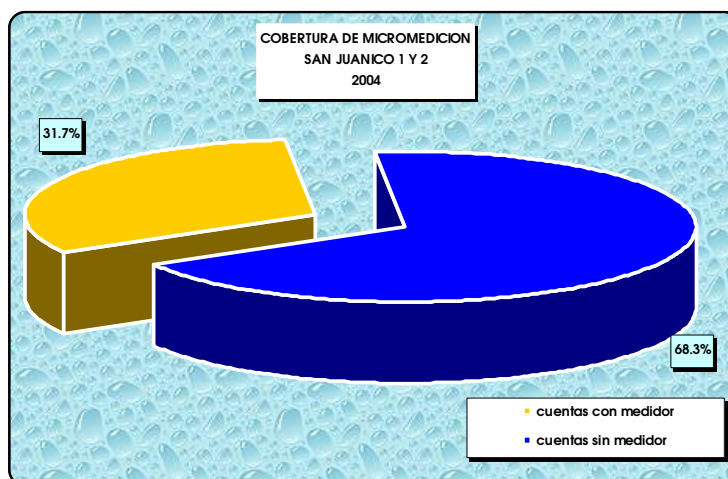


Figura A.2. Grafica porcentual de la cobertura de micromedición

Como es lógico pensar, de los micromedidores existentes en el Distrito Hidrométrico se tiene un cierto porcentaje con algún tipo de falla, se decidió elaborar la siguiente gráfica para mostrar la tendencia que se ha presentado en cuanto a fallas en micromedidor en la zona.

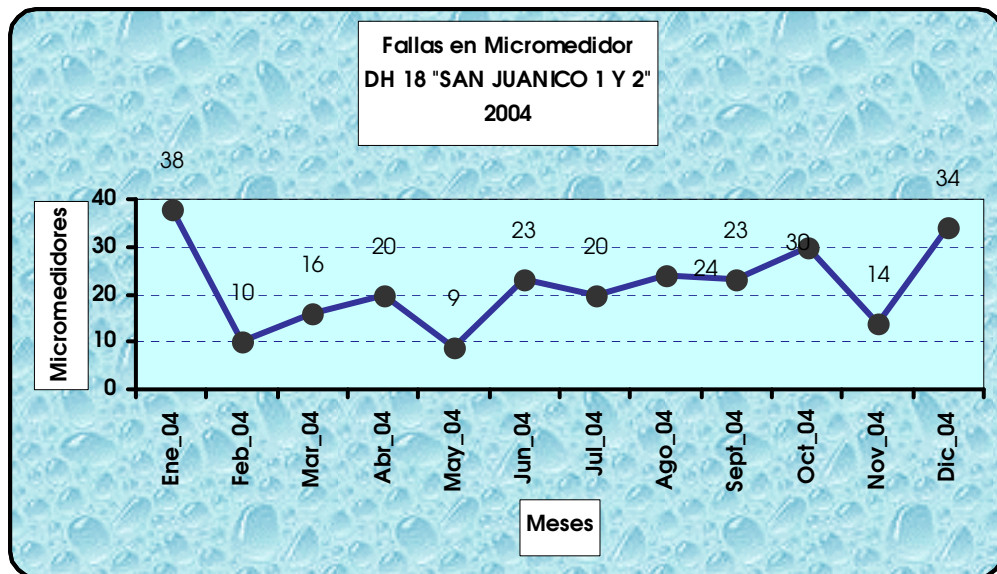


Figura A.3. Grafica de las fallas en micromedición

El hecho de que estos estén contemplados como falla es debido a diversas causas; agotamiento de la vida útil, desgaste acelerado de las partes movibles debido a instalación inadecuada (posición del micromedidor), presencia de sustancias que impidan que el mecanismo primario de medición trabaje, y que por lo tanto no registre la cantidad de agua que pasa, deterioro por vandalismo, carátula opaca, medidor al interior, etc.

#### A.1. 7 Pruebas de micromedidores en campo

Del padrón de usuarios se obtuvo una muestra aleatoria de 61 medidores (5% del padrón) para realizarles pruebas de exactitud a éstos en el lugar. Se tomó esta opción en vez de realizar las pruebas en banco para asegurar que los resultados se obtuvieran en las condiciones reales de trabajo de estas unidades.

Aquí se presenta un resumen de los resultados con conclusiones, los detalles de cada prueba se desglosan en el Anexo 2 “Pruebas de micromedición”.

Las pruebas se realizaron para caudal alto (válvula completamente abierta) y caudal bajo (1 l/min). Las presiones que se presentan en la zona oscilan entre 0.7 a 1.6 kg/cm<sup>2</sup> lo cual permitió realizar todas las pruebas y verificar que estos funcionen dentro del margen de error permisible de  $\pm 2\%$ . En la gráfica que se muestra a continuación, se indica cual es la distribución de este error.

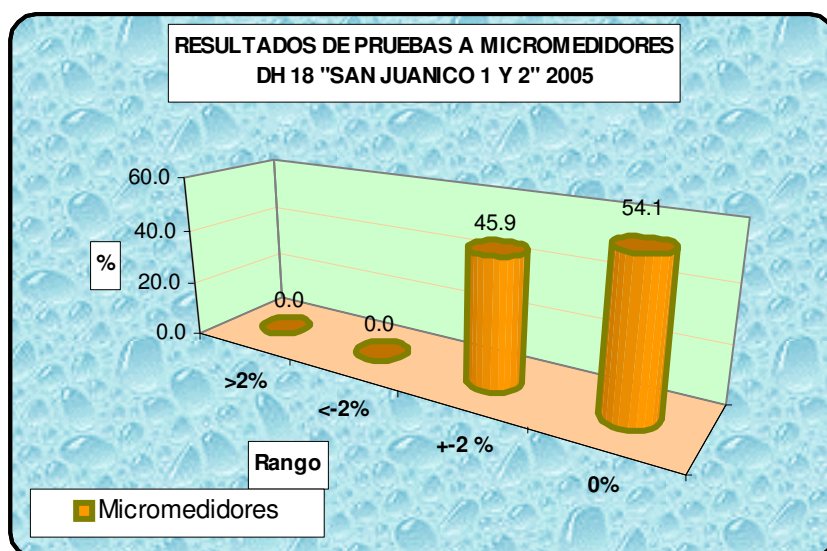


Figura A.4. Resultados de las pruebas de micromedición

Como puede observarse el 100% de los micromedidores probados se encuentran dentro del rango permisible de precisión de  $\pm 2\%$ .

También se elaboro un gráfico para mostrar la distribución de las cuentas de acuerdo al tipo de tarifa en el cual se encuentran contratadas, como podrá verse prácticamente el 100% de las tomas se encuentra contratada en tarifa 10C, lo cual nos indica que es un Distrito Hidrométrico donde el uso del agua es eminentemente para uso doméstico. Los usuarios en tarifa 10C (Doméstico C) tienen derecho a un consumo mensual de 0 a 25 m<sup>3</sup>.

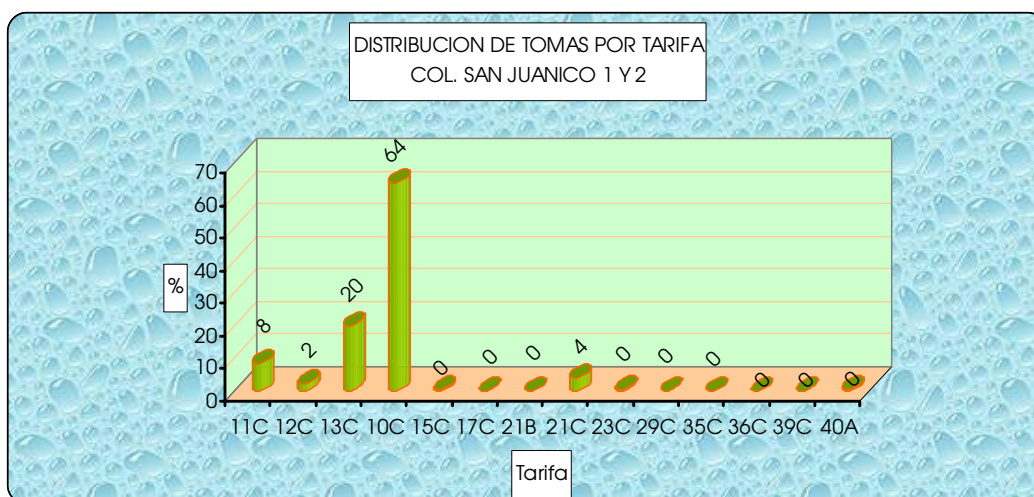


Figura A.5. Distribución de tomas por tarifa del distrito de análisis

### A.1. 8 Diagnóstico de macromedición

Con el propósito de determinar la cantidad real de agua que se entrega al DH se realizó una prueba al macromedidor instalado a la salida del pozo San Juanico 2 para obtener el grado de precisión con que éste mide se muestra la prueba realizada y el error obtenido,

con este dato se corrigen los datos de producción del pozo para poder realizar el balance global corregido.

### A.1. 9 Balance Global de Agua

El agua que entra al Distrito Hidrométrico proviene del pozo San Juanico 2 que tiene un horario de operación de 04:00 - 17:45 / 22:15 - 00:00 hrs. pero existe una línea de 10 pulgadas de la cual sale agua del DH hacia la colonia Pinos y varias conexiones en 6 pulgadas hacia la colonia San Juanico 3ra. sección. Por lo anterior se realizó un balance tomando como base los datos de producción de los pozos que abastecen al DH así como a las colonias mencionadas y los datos de consumo promedio de los usuarios, proporcionados el Sistema de Información Geográfica (MapInfo). En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos del análisis realizado en el período de febrero a diciembre de 2004.

<b>Balance Global de Agua</b> <i>Distrito Hidrométrico 18</i> <i>“Col. San Juanico 1 y 2”</i>		
<i>Volumen Suministrado al Distrito (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Volumen Facturado (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Volumen Perdido (m<sup>3</sup>)</i>
1,236,397.0	1,084,276.28	152,120.72
100%	87.70%	12.30%

Tabla A.5. Balance global

Como puede verse existe poca diferencia entre el volumen suministrado y el volumen consumido, teniéndose un porcentaje de **pérdidas comerciales** de 12.30 %.

### A.1. 10 Acciones a ejecutar

Como resultado de las diferentes actividades realizadas, en el Distrito Hidrométrico, y de los diagnósticos efectuados, se determina la ejecución de diferentes acciones encaminadas hacia la mejora del sistema de distribución, estas se desglosan en siete acciones principales.

1. **Actualización del padrón de usuarios de manera continua**, este se deberá efectuar por medio de encuestas y verificaciones de campo y descargar la información recabada a la base de datos de usuarios del sistema de agua potable (actualización). Es necesario actualizar la base de datos en los campos de marca y modelo de medidor ya que actualmente no se tienen los datos, y esto es de suma importancia para realizar el diagnóstico de micromedición. También es necesario que se actualicen constantemente en el Sistema Geográfico (MapInfo) los usuarios, ya que facilitarán los análisis a realizar y nos permitirá evaluar de manera continua la eficiencia comercial.
2. **Anexar un campo en el sistema comercial para identificar los Distritos Hidrométricos**. Consiste en la introducción de una clave o identificador para

---

cada Distrito Hidrométrico para que de esta manera se faciliten los balances hidráulicos que se tengan que efectuar. Esto también nos permitirá verificar la información generada obtenida del Sistema Geográfico.

3. **Micromedición**, establecer un programa de verificación y mantenimiento, del tal manera que garantice una medición adecuada y confiable de los volúmenes de agua entregada a los usuarios, incluyendo el reemplazo de los dispositivos que midan mal o que simplemente ya no funcionen por diversas causas (termino de vida útil, deterioro por vandalismo, defecto de fabricación, etc.) así como sacar los micromedidores que se encuentren al interior de los domicilios para garantizar la toma de lecturas y lograr la cobertura del 100% de micromedición en los Distritos Hidrométricos.

Los estudios de verificación deberán realizarse tomando una muestra aleatoria, esto en virtud de que sería un estudio demasiado caro si se efectuara al total de micromedidores instalados.

Cabe mencionar que se requieren realizar algún plan o medida para poder instalar medidor a los condominios que se ubican en este D.H. ya que no existe otra forma de obtener un dato real de consumo si no se miden los consumos de estos usuarios.

4. **Macromedición**, esta acción es muy similar a lo que sería la micromedición, con la ventaja de que por lo regular son equipos que se instalan en menor cantidad, característica que propicia la verificación y mantenimiento por ser un número mucho menor en comparación con la micromedición que se debe analizar desde un punto de vista estadístico. Aquí cabe mencionar que se genero un expediente técnico para la corrección de 11 trenes de descarga en el cual se incluye a el pozo “San Juanico 2”.
5. **Reparación de fugas en tomas domiciliarias**, cuando la fuga detectada no es en el ramal, sino en algún otro sitio tal como unión del bastón con el ramal, o bien es fuga en las piezas que conforman el cuadro de medición, se deberá efectuar la reparación, podrá ser desde apretado y ajuste de las piezas, hasta sustitución de las mismas.
6. **Reparación de fugas en red de distribución**, no todas las fugas que se presentan en las líneas de distribución demandan una sustitución o rehabilitación de las mismas, en algunos casos se presentan fallas debido a deficiencias en la mano de obra durante la instalación, o bien maltrato de las tuberías ocasionándoles rajaduras o pinchaduras no visibles y que resultan una vez que se pone en funcionamiento, problema que se resolverá reparando la porción de tubería afectada.
7. **Lograr el aislamiento del DH**, para poder realizar el aforo y el diagnóstico de pérdidas.



**Comisión Estatal del Agua de  
Guanajuato  
Dirección General de Desarrollo  
Hidráulico**

**Dirección de Agua Potable**

Departamento de Recuperación de Agua

**SAN JUANICO**

Domicilio		Marca del Medidor	Numero del Medidor	Caudal Alto		Caudal Bajo		PRESION
				RMP	RVR	RMP	RVR	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M. DE STA. ROSA	210	CICASA	4162733	1,00	1,00	10,53	5,00	1,500
M. DE STA. ROSA	217	CICASA	4102941	-1,00	-1,00	0,00	0,00	1,400
LOZAS	509	CICASA	5100425	1,01	0,00	5,26	0,00	1,500
LOZAS	701	CICASA	425509	1,00	1,00	0,00	0,00	1,400
LOZAS	705	CICASA	618994	1,00	1,00	0,00	-5,00	1,400
LOZAS	601	CICASA	5068201	2,02	1,00	0,00	0,00	1,100
CAOLIN	105	CICASA	5083146	1,01	0,00	-4,76	0,00	1,300
CAOLIN	101	CICASA	5083174	0,00	0,00	-4,55	5,00	1,300
CAOLIN	504	CICASA	4265271	-1,94	1,00	5,00	5,00	1,300
M DE ROCA	106	CICASA	4260538	0,99	2,00	0,00	5,00	1,300
M DE CUBO	300	CICASA	4265286	0,00	1,00	-5,00	-5,00	1,300
M DE CUBO	104	CICASA	3017850	-3,88	-1,00	5,26	0,00	1,300
M DE CUBO	105	CICASA	339827	1,00	1,00	-4,76	0,00	1,300
M DE SAN BERNABE	218	CICASA	3009745	0,00	0,00	-5,00	-5,00	1,400
M DE SAN BERNABE	112	CICASA	4259490	1,01	0,00	0,00	0,00	1,600
BRILLANTE	253	CICASA	5067957	0,00	0,00	0,00	0,00	1,600
BRILLANTE	240	CICASA	4260929	0,00	0,00	0,00	0,00	1,500
BRILLANTE	216	CICASA	4199060	3,03	2,00	0,00	0,00	1,500
SINALOITA	105	CICASA	118407	0,00	0,00	0,00	5,00	1,300
SIRENIA	131	CICASA	3006722	-0,99	0,00	-9,52	-5,00	1,300
SIRENIA	132	CICASA	5065288	1,00	1,00	0,00	0,00	1,300
M MELLADO	213	CICASA	3047983	2,00	2,00	-9,09	0,00	1,300
MARMOL	65	CICASA	5129712	0,00	0,00	-4,76	0,00	1,300
MARMOL	101	CICASA	3057965	-0,99	0,00	5,26	0,00	0,800
MARMOL	41	CICASA	2886207	0,00	1,00	0,00	0,00	1,200
PIRITA	98	CICASA	2882511	-0,98	1,00	-4,76	0,00	0,800
PIRITA	95	CICASA	?	-0,99	0,00	5,00	5,00	0,800
PIRITA	90	CICASA	3026095	-0,97	2,00	-4,76	0,00	0,800
M DE LA LUZ	124	CICASA	3074581	0,00	0,00	0,00	0,00	0,800
M DE LA LUZ	100	CICASA	4265004	-1,00	-1,00	-4,55	5,00	0,800
M DE LA LUZ	102	CICASA	5151333	3,06	1,00	0,00	5,00	0,800
M VILLALPANDO	107	CICASA	5082946	1,01	0,00	-5,00	-5,00	1,200
M VILLALPANDO	108	CICASA	3024588	0,00	1,00	15,79	10,00	1,200



M VILLALPANDO	214	CICASA	3058773	0,00	1,00	0,00	0,00	1,200
M VILLALPANDO	218	CICASA	3015370	1,01	0,00	0,00	0,00	1,200
M SAN NICOLAS	102	CICASA	3025585	1,01	0,00	0,00	0,00	1,200
M SAN NICOLAS	300	CICASA	4260536	0,00	0,00	0,00	0,00	1,200
JUAN MANUEL CONTRERAS	106	CICASA	4259483	1,01	0,00	5,26	0,00	1,300
JUAN MANUEL CONTRERAS	104	CICASA	4259484	2,04	0,00	0,00	0,00	1,300
ALUNITA	104	CICASA	4264542	-0,99	0,00	10,00	10,00	1,300
ALUNITA	100	CICASA	4264847	-0,96	0,00	10,53	5,00	1,300
M DE TORRES	209	CICASA	4259733	0,00	0,00	5,26	0,00	1,300
M DE TORRES	110	CICASA	619007	-0,99	0,00	-5,00	-5,00	1,300
M VALENCIANA	?	CICASA	3023327	0,00	0,00	-10,00	-10,00	1,300
M VALENCIANA	?	CICASA	4265273	0,00	0,00	-5,00	-5,00	1,300
TORRES LANDA	652	CICASA	4265012	2,02	1,00	0,00	0,00	0,800
TORRES LANDA	648	CICASA	5082944	-0,98	1,00	-5,00	-5,00	0,800
TORRES LANDA	602-A	CICASA	5083142	1,00	1,00	-4,76	0,00	0,800
JASPE	100	CICASA	3021247	0,00	1,00	0,00	5,00	0,800
JASPE	109	CICASA	2871381	-0,99	0,00	5,00	5,00	0,800
JACINTO	105	CICASA	508346	-0,99	0,00	-9,09	0,00	0,900
JACINTO	107	CICASA	3047383	-2,94	-1,00	10,53	5,00	0,900
TURQUEZA	105	CICASA	5068115	1,00	1,00	0,00	0,00	0,800
CRISOBERITO	110	CICASA	2908438	0,00	1,00	0,00	0,00	0,800
ALUMBRE	100	CICASA	4265020	0,00	0,00	0,00	0,00	1,300
CRISOLITA	152	CICASA	1711	-1,96	0,00	-4,76	0,00	0,700
VICENTE FERNANDEZ	100	CICASA	5101374	0,00	0,00	0,00	0,00	1,200
M SAN PEDRO	103	CICASA	5082947	0,00	0,00	0,00	0,00	1,100
M DE RAYAS	417	CICASA	3047388	-0,99	0,00	-9,52	-5,00	0,800
M DE CEDROS	206	CICASA	4260250	-1,96	0,00	0,00	0,00	1,100
M DE CATA	107	CICASA	5082995	1,00	1,00	-50,00	-50,00	1,200

Tabla A.6 Relación de la pruebas de los micromedidores

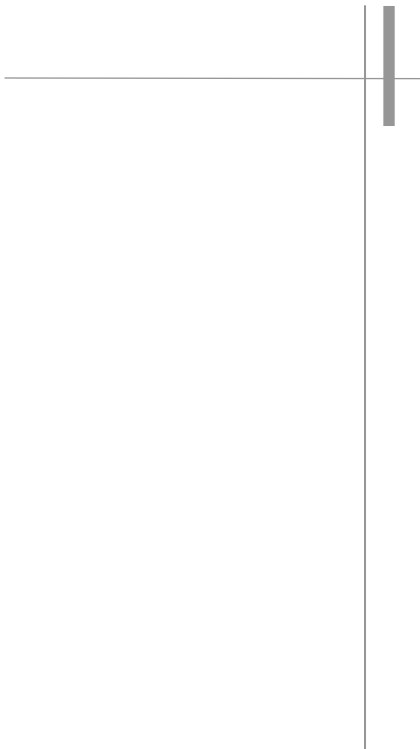
Coordinación de Consolidación de Sistemas											
Departamento de Recuperación de Agua											
MUNICIPIO:	CELAYA	LOCALIDAD:		POZO No.	SAN JUANICO 2	FECHA:	11	03	2005		
DIAM. NOMINAL (DN en pulg.):	6"	CIRCUNFERENCIA (mm):	531	OD(mm) (DIAM. EXT.):	169,2	ID MEDIDO (mm):					
MATERIAL TUBERIA:	Acero *	Fo. Fo.	P.V.C.	A.C.	Otro:						
ESPESOR MEDIDO (mm):	6,5	ESPESOR ESPEC. (mm):			ESPACIO (mm)	157,565	NÚMERO DE TRAVERSAS:	2			
MARCA MEDIDOR:		MODELO MEDIDOR:			MATRIC. MEDIDOR:	94-7923-6	FECHA ULT. CALIBR.:				
PRUEBA #	Lectura Inicial (m <sup>3</sup> )	Lectura Final (m <sup>3</sup> )	Yolumen m <sup>3</sup>	% de error	Tiempo de Prueba (mins.)	Q (lps) INST. #1	Vel. INST. #1	Q (lps) INST. #2	Vel. INST. #2	Q (lps) INST. #3	Vel. INST. #3
1 (medidor)	222869	222900	31	0,86%	15	5 min	10 min	15 min			
1 (Transport)	0	30,735	30,735			34,1	1,78	34,60	1,8	34,10	1,78
2 (medidor)											
2 (Transport)											
3 (medidor)											
3 (Transport)											
Parametros Diagnosticos											
SIGNAL UP:	46,7	SIGNAL DOWN:	46,6	SNDSP:	1554,3	SQ DN:	3384	Presión:	1	Kglcm <sup>2</sup>	
AMPUP:	26,3	AMPDN:	26,3	SQ UP:	3124			Temp:	-	C	
GOLPE DE ARIETE POR LA FORMULA DE ALIEVI	$h_a = \frac{1.45V}{\sqrt{1 + \frac{EaD}{Ee}}}$		Sobrec presión =		Kglcm <sup>2</sup>		Per. Bombeo:		hrs.		
DATOS DE EXTRACCION											
OBSERVACIONES:							Q <sub>min</sub> =		34,10	l/s	
							Q <sub>max</sub> =		34,60	l/s	
							Q <sub>prom</sub> =		34,27	l/s	
							Vel med =		1,787	m/s	

Figura A.6. Formato de campo prueba de macromedidores

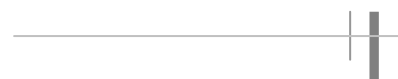
En la figura A.7 se muestra el formato utilizado en campo para las pruebas de los microcontadores

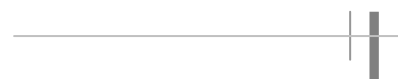
Dirección de Agua Potable													
Departamento de Recuperación de Agua													
PRUEBA DE MICROMEDICIÓN													
Hoja de campo													
Municipio:	CELAYA							Sector Hidrométrico					
Organismo Operador:	JUMAPA							18					
Usuario:		Ubicación:	TURQUESA # 105										
Fecha:	09-dic-05	No. Cuenta:											
Hora I:	Hora F:							Diámetro de toma:					
						1/2"							
Información del medidor													
Marca:	CICASA			Tipo:	Velocidad	Modelo:	Diámetro: 1/2"						
No. Medidor	5068115			No. de Serie:			Estado de Careaca: no tiene						
Filtro				Vál. a la entrada:	SI	Vál. a la salida: no tiene							
Desarrollo de Prueba													
Rango de Caudal	Tiempo de la Prueba	Micromedidor					Micromedidor patrón						
		Caudal	lts/min	Min	Seg	Lec. Inicial	Lec. Final	Yolumen	Lec. Inicial	Lec. Final	Yolumen	% e RMP	% e RVR
Bajo	0,32	2	10	157,1728	157,1748	2,0	9,3799	9,3819	2,0	0,00	0,00	2,0	0,800
Medio													
Alto	14,23		42	157,1748	157,1843	10,1	9,3819	9,3919	10,0	1,00	1,00	10,0	0,800
Observaciones Generales						Croquis de toma							
El micromedidor esta dentro del rango permisible del ± 2%													

Figura A.7. Formato de campo prueba de micromedidores



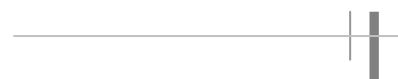
# Anexo 2

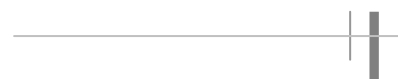




---

# Algoritmos Genéticos





---

### A.3.1 Introducción

El Algoritmo Genético es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin, que ha cobrado tremenda popularidad alrededor del mundo durante los últimos años. La forma de trabajo de los algoritmos genéticos es idéntica a la evolución de una población de individuos que es sometida a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinación genética), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuales son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuales los menos aptos que son descartados.

John Holland se planteaba desde niño cómo la naturaleza conseguía crear seres cada vez más perfectos. Lo curioso del caso era que todo se lleva a cabo a base de interacciones locales entre individuos, y entre estos y lo que les rodea. No sabía la respuesta, pero tenía cierta idea acerca de como hallarla. La idea era realizar pequeños modelos de la naturaleza que tuvieran alguna de sus características, ver como funcionaban y finalmente extrapolar sus conclusiones a la totalidad. De esta manera, el objetivo de Holland era lograr que los ordenadores aprendieran por sí mismos. A la técnica que inventó Holland se le llamó originalmente "planes reproductivos", pero no se hizo popular hasta 1975.

Así, en los años 50 entró en contacto con los primeros ordenadores, donde consiguió llevar a cabo alguna de sus ideas, pese a que no encontró un ambiente intelectual adecuado para propagarlas. Fue a principios de los años 60, en la Universidad de Michigan en Ann Arbor donde, dentro del grupo Logic of Computers, sus ideas comenzaron a desarrollarse y a adquirir cierta importancia. Y fue, además, por la lectura de un libro escrito por un biólogo evolucionista, R.A. Fisher, titulado —“La teoría genética de la selección natural”, como comenzó a descubrir los medios de llevar a cabo sus propósitos de comprensión de la naturaleza. De ese libro aprendió que la evolución era una forma de adaptación más potente que el simple aprendizaje, y tomó la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar programas bien adaptados para un fin determinado.

En esa universidad, Holland impartía un curso titulado —“Teoría de sistemas adaptativos”. Dentro de este curso, y con una participación activa por parte de sus estudiantes, fue donde se crearon las ideas de lo que más tarde se convertirían en los algoritmos genéticos.

Por tanto, cuando Holland se enfrentó a los algoritmos genéticos, los objetivos de su investigación fueron dos:

- Imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales.
- Diseñar sistemas artificiales (normalmente programas) que retuvieran los mecanismos importantes de los sistemas naturales.

Unos 15 años más adelante, David Goldberg, actual delfín de los algoritmos genéticos, conoció a Holland, y se convirtió en su estudiante. Goldberg era un ingeniero industrial que trabajaba en el diseño de tuberías, y fue uno de los primeros que trató de aplicar los

---

algoritmos genéticos a problemas industriales. Aunque Holland trató de disuadirle, porque pensaba que el problema era excesivamente complicado como para aplicarle algoritmos genéticos, Goldberg consiguió lo que quería, escribió un algoritmo genético en un ordenador personal Apple II. Estas y otras aplicaciones creadas por estudiantes de Holland convirtieron a los algoritmos genéticos en un campo con la base suficiente como para celebrar la primera conferencia en 1985, ICGA'85. Tal conferencia se sigue celebrando cada dos años.

Desde la ciencia informática se contemplaron los algoritmos genéticos un claro proceso de optimización. Se toman los individuos mejor adaptados -mejores soluciones temporales-, se cruzan -se mezclan-, y generan nuevos individuos -nuevas soluciones- que contendrán parte del código genético - información- de sus dos antecesores, y por lo tanto, aunque el nuevo individuo no tenga que estar forzosamente mejor adaptado, el promedio de adaptación de toda la población sí mejora, ya que tienden a perpetuarse y extenderse las mejores características, y a extinguirse las poco beneficiosas o perjudiciales. Aquí se ve que, a diferencia de los métodos anteriormente citados, no se tiene que desarrollar un individuo mejor. En los algoritmos genéticos se crea una nueva abstracción -la población- cuya función de coste mejorará globalmente, por lo que puede que se encuentre algún individuo con mejores características.

En el campo de la ingeniería hidráulica, la obra de Savic y Walters (1997) hace patente la importancia que estos algoritmos tienen en este tipo de aplicaciones, encuentran soluciones a problemas como los reemplazamientos de tuberías principales en sistemas de distribución de agua, optimización de sistemas de distribución, rehabilitación en sistemas de distribución, e incluso ubicación en cuencas receptoras de plantas de depuración de aguas (Wang, 1991).

Los algoritmos genéticos forman parte de una familia denominada algoritmos evolutivos, que incluye las estrategias de evolución, la programación evolutiva y la programación genética.

Como anécdota, hay que decir que en 1999 se concedió por primera vez en la historia una patente a un invento no realizado directamente por un ser humano, y fue a un algoritmo genético. Dicha patente se concedió a una antena de forma extraña, pero que funcionaba perfectamente en las condiciones a las que estaba destinada.

No hay, sin embargo, nada injusto en el hecho de que el autor del algoritmo genético del que salió la forma de la antena se haya atribuido la autoría de la patente, pues él escribió el programa e ideó el criterio de selección que condujo al diseño patentado.

No es posible sin embargo el aplicar los algoritmos genéticos para la resolución de cualquier problema, la optimización es la aplicación más común hasta la fecha, puesto que se han mostrado eficientes y confiables. Se recomienda en general tomar en cuenta las siguientes características antes de utilizar la técnica:

- Su espacio de búsqueda (i.e., sus posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Debe poderse definir una función de aptitud que indique que tan buena o mala es una cierta respuesta.





- 
- 
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en el ordenador.

### **A.3.2 La optimización en la ingeniería**

La optimización de un proceso es el acto de obtener el mejor resultado posible dadas ciertas circunstancias. Esta búsqueda de la mejor opción es de gran utilidad en los distintos campos de la ciencia, pero se hace especialmente importante en el campo de la ingeniería.

No existe ningún método de optimización que pueda resolver eficientemente todo tipo de problemas. Esta es la razón de que se hayan desarrollado diversas técnicas de búsqueda de óptimos que aprovechan diferentes técnicas matemáticas, con el objetivo de encontrar máximos y mínimos en las funciones que representan el comportamiento de los sistemas.

Existen muchas aplicaciones en lo que a métodos de optimización en ingeniería se refiere, puesto que la búsqueda de mínimos es el objetivo de muchos problemas de diseño. Así, es posible encontrar métodos de optimización en diseños de redes eléctricas ó hidráulicas, en la búsqueda de soluciones más económicas, en diseños aerodinámicos ó en el análisis de organización funcional.

En un problema de optimización siempre se encuentra con la situación matemática de buscar un vector de variables que minimice una cierta función sujeta a restricciones. Estas restricciones en la mayoría de los problemas de ingeniería se refieren a restricciones de diseño que deben ser consideradas cuidadosamente. Éstas representarán limitaciones al comportamiento del sistema (funcionales) o físicas (geométricas).

Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización numérica muy capaz en ciertas aplicaciones. Dicha optimización numérica permite resolver problemas complejos y con muchas variables de forma estructurada, aunque rara vez puede asegurarse un único método para una optimización global. Asimismo, pocos métodos numéricos pueden lidiar con funciones discontinuas o funciones altamente no lineales.

Los algoritmos genéticos presentan ventajas sobre otros tipos de algoritmo en lo que a optimización se refiere, que los hacen más robustos y preferibles para determinado tipo de aplicaciones. Algunas de las principales características de los algoritmos genéticos son:

Son algoritmos estocásticos. Dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones distintas. Esto es útil por el hecho de que hay gran cantidad de isómeros que corresponden a soluciones válidas, por lo que es interesante que distintas ejecuciones nos puedan dar isómeros distintos.

Son algoritmos de búsqueda múltiple, luego dan varias soluciones. Aunque habitualmente la energía de los individuos de la población final es similar, los individuos suelen ser distintos entre sí. Por ello, será posible la elección de la solución que más convenga según la naturaleza del problema.



---

Son los algoritmos que hacen una barrida mayor al subespacio de posibles soluciones válidas. De hecho, se considera que, de todos los algoritmos de optimización estocásticos, los algoritmos genéticos son de los más exploratorios disponibles.

La convergencia del algoritmo es poco sensible a la población inicial si ésta se escoge de forma aleatoria y es lo suficientemente grande, salvo que la población inicial esté realmente degenerada. En ese caso, el operador de mutación tendrá mucho trabajo.

Presentan una convergencia excepcionalmente rápida al principio, que casi enseguida se bloquea. Esto se debe a que el algoritmo genético es excelente descartando subespacios realmente malos. Cada cierto tiempo, la población vuelve a dar el salto evolutivo, y se produce un incremento en la velocidad de convergencia excepcional. La razón de esto es que algunas veces aparece una mutación altamente beneficiosa, o un individuo excepcional, que propaga algún conjunto de cromosomas excepcional al resto de la población. Todo esto es consecuencia del grado de penetración casi nulo que presentan los algoritmos genéticos.

La optimización es función de la representación de los datos. Este es un concepto clave dentro de los algoritmos genéticos, ya que una buena codificación puede hacer la programación y la resolución muy sencillas, mientras que una codificación errada obliga a estudiar que el nuevo genoma cumpla las restricciones del problema, y en muchos problemas se tendrá que abortar los que no cumplan las restricciones, por ser éstas demasiado complejas. Además, la velocidad de convergencia va a estar fuertemente influenciada por la representación.

Es una búsqueda paramétricamente robusta. Esto quiere decir que para que no converja la elección de los parámetros debería ser realmente mala. Con tasas razonables, va a converger -mejor o peor- en una solución razonablemente buena si la representación es la adecuada.

Los algoritmos genéticos son intrínsecamente paralelos. Esto significa que, independientemente de que se haya implementado de forma paralela o no, buscan en distintos puntos del espacio de soluciones de forma paralela. Ese paralelismo intrínseco permite que sean fácilmente paralelizables, es decir, que sea fácil modificar el código para que se ejecute simultáneamente en varios procesadores.

### **A.3.3 ¿Qué es un algoritmo genético?**

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a éstos los mismos métodos de la evolución biológica, es decir, selección basada en la población, reproducción sexual y mutación. La idea básica es generar un conjunto con algunas de las posibles soluciones. Cada una va a ser llamada individuo, y a dicho conjunto se le denominará población.

Tradicionalmente, los AG han sido métodos adecuados para problemas formulados en variables binarias y en los que otros métodos de búsqueda no resultan convenientes. No obstante, se puede introducir una formulación del problema basándose en una codificación numérica, no binaria, de la solución.



---

La mayoría de las técnicas de búsqueda convencionales parten de una solución factible que se intenta mejorar desplazándose en la dirección que implica una mejora en la función objetivo. El diseño de redes de distribución de agua dificulta notablemente la exploración completa del espacio de soluciones mediante las técnicas de optimización clásicas. Por ello los AG, basados en la exploración aleatoria de dicho espacio, resultan adecuados. Para ello es necesario definir unas reglas sencillas de exploración y cambio entre cada conjunto de soluciones y el siguiente. El carácter aleatorio del método no garantiza una exploración completa del espacio de soluciones, ni supone garantía alguna de alcanzar un mínimo de la función objetivo. No obstante el método ofrece un conjunto de “buenas” soluciones que intentan mejorarse poco a poco.

Cada individuo tiene una información asociada a él. En un problema de optimización corresponde a las variables libres, es decir, aquellas a las que el algoritmo tiene que asignar un valor para que una función sea mínima o máxima para esos valores, es decir, hallar  $(x_1, \dots, x_n)$  tales que  $f(x_1, \dots, x_n)$  sea mínima o máxima. En un algoritmo genético, tras parametrizar el problema en una serie de variables  $(x_1, \dots, x_n)$ , éstas se codifican en un cromosoma. Todos los operadores utilizados por un algoritmo genético se aplicarán sobre estos cromosomas, o sobre poblaciones de ellos. Hay que tener en cuenta que un algoritmo genético es independiente del problema, lo cual lo hace un algoritmo robusto, por ser útil para cualquier problema, pero a la vez débil, pues no está especializado en ninguno.

Suponer que se tiene una función (Figuras A.8 y A.9) de la cual no se conoce su derivada y hasta es posible que no sea derivable, ni siquiera continua, o que sea muy difícil de derivar, y se quiere calcular su mínimo o su máximo en un intervalo dado (en este caso se va a suponer que se quiere calcular el mínimo).

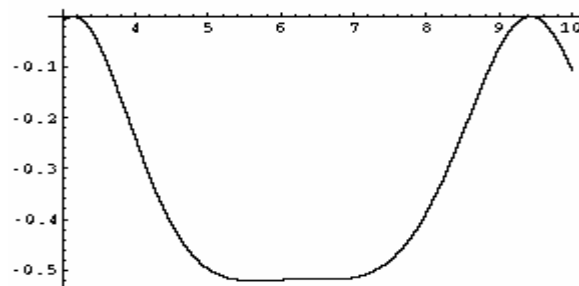


Figura A.8 Función que se quiere derivar

A la función que se está minimizando se le denominará función de adaptación; y determinará el grado con algunas de las posibles soluciones, cada una de las cuales va a ser llamada individuo, y a dicho conjunto de posibles soluciones se le denominará población de adaptación de un individuo. A dicha información se la va a denominar código genético.

Una forma de realizar la derivada es el utilizar el algoritmo genético que se basa en la adaptación de los individuos al medio en el que viven. Es posible hacer una analogía de este algoritmo con la evolución de una especie en un ecosistema.

---

Las características de los individuos, sean beneficiosas o no, se van a denominar fenotipos. La información asociada a un individuo se compone de partes indivisibles denominados cromosomas. Un fenotipo puede estar en más de un cromosoma, en cuyo caso puede ser que el hijo herede un fenotipo que no tenía ni el padre ni la madre, sino una combinación de ambos.

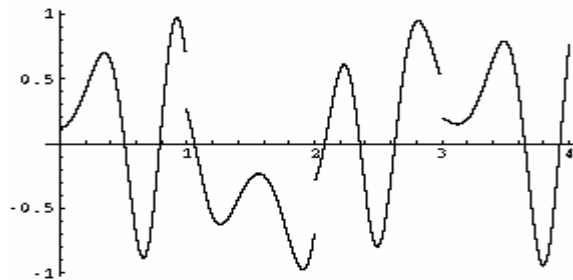


Figura A.9. Función no continua

Después de algunas iteraciones se ve como la población tiende a un mínimo, se puede decir que la especie se especializa en ese ecosistema pero puede que esa adaptación esté en un mínimo local de la función y que la especie se estanque en él y no sea capaz de tomar valores más bajos, por eso se incorporan mutaciones para que la población salte a otro mínimo (quizás de menor valor) y que se produzcan individuos mejor adaptados. Este proceso termina cuando la población alcanza el mínimo global en el intervalo dado pues por muchas mutaciones que produzcan después morirán al no estar tan bien adaptadas como la población general que ya se ha adaptado muy bien al medio.

El algoritmo se muestra especialmente útil cuando la función no es "suave" desde el punto de vista analítico, es decir, que no es derivable o es complicada de derivar, incluso puede no ser continua. En esta situación las técnicas del análisis no se pueden aplicar y se necesita otro método para calcular los óptimos, es en este caso cuando el algoritmo genético entra en juego, aunque está claro que también se puede usar en los otros casos.

Cuanto menos mínimos locales tenga la función más rápido alcanza el mínimo global, lo que es lógico, puesto que los individuos tienen tendencia a tomar un valor mínimo, con lo que si hay pocos mínimos habrán muchas más posibilidades de tomar el valor mínimo global.

El algoritmo tiene problemas cuando se trabaja con una función que tenga muchos mínimos locales, Figura A.10, pues suele aproximarse a cada mínimo local antes de cambiar a otro entorno de un mínimo de valor menor y si hay muchos mínimos tarda más en encontrar el mínimo global.



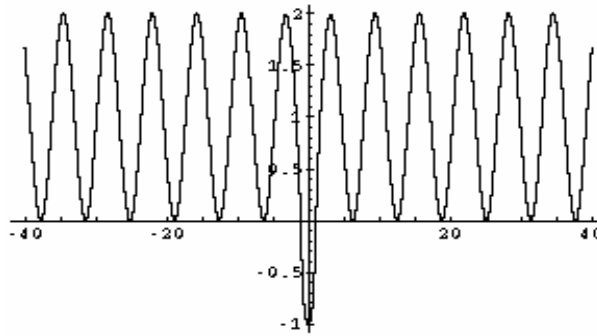


Figura A.10. Función con muchos mínimos

El algoritmo está diseñado para que tienda a valores menores, por lo que después de un tiempo ejecutándose el valor que da, es un mínimo, probablemente un mínimo local, y no hay garantías de que sea un mínimo global. Esta es una de las principales dificultades de esta técnica.

Por otra parte, en funciones discontinuas en el mínimo global, por ejemplo: una función que por la derecha tienda a un valor muy alto y por la izquierda tienda al mínimo global, es decir, una función que presente una discontinuidad con salto en el mínimo global, como en las funciones diente de sierra; el algoritmo no es capaz de llegar al mínimo global, tiende a él pero no lo alcanza nunca, a menos que una mutación tome exactamente ese valor. Figura A.11.

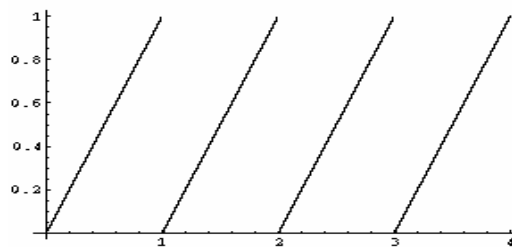


Figura A.11 Función discontinua en el mínimo

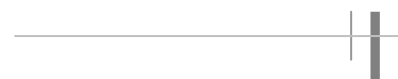
La conclusión fundamental de todo esto es que un AG modela muy bien la evolución de las especies en un medio dado, pero no es la piedra filosofal de la optimización.

### A.3.4 Funcionamiento del algoritmo

Para comenzar la competición, se generan aleatoriamente una serie de cromosomas. El algoritmo genético procede de la forma siguiente:

1. Evalúa la puntuación (fitness) de cada uno de los genes;
2. Permite que cada individuo se reproduzca, de acuerdo con su puntuación; y,
3. Empareja los individuos de la nueva población, al hacer que intercambien material genético, y que alguno de los bits de un gen se vea alterado debido a una mutación espontánea.

Cada uno de estos pasos consiste en una actuación sobre las cadenas de bits, es decir, la aplicación de un operador a una cadena binaria. A estos operadores se les llama



operadores genéticos, y fundamentalmente son tres: selección, crossover o recombinación y mutación. Además de estos, que son los más habituales, existen otros operadores genéticos que no son tan comunes y que se comentaran un poco más adelante. El esquema de funcionamiento presentado en la Figura A.12 es el más habitual descrito en la bibliografía (Goldberg, 1989).

La inicialización aparece sólo en la primera generación; en este caso se dispone de dos posibilidades de inicialización: con parámetros conocidos o con un conjunto aleatorio de parámetros.

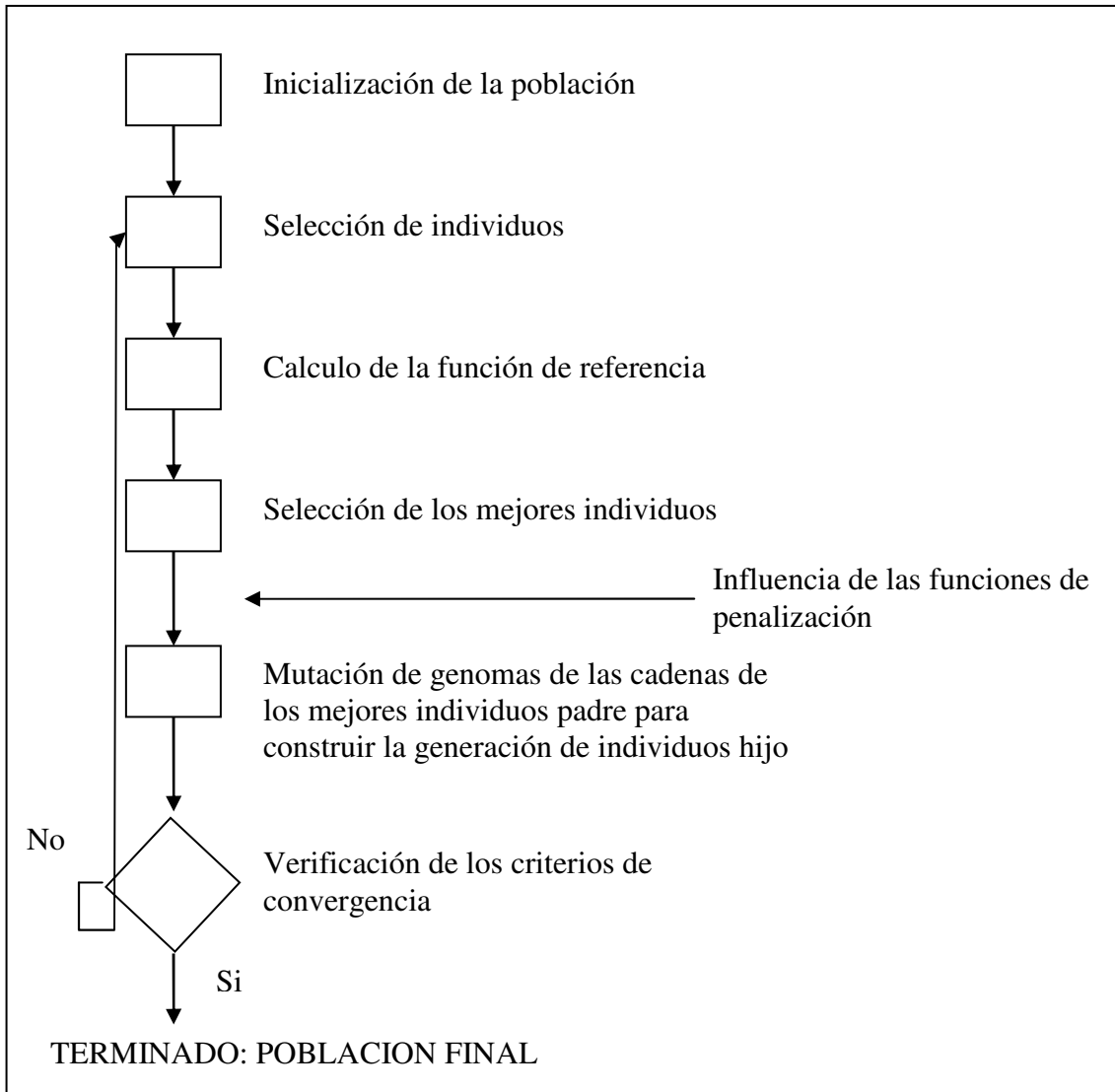


Figura A.12 Diagrama de flujo de funcionamiento del algoritmo genético

Existen también una serie de parámetros que se tienen que fijar para cada ejecución, como son:

- **Tamaño de la población:** debe de ser suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones, y, además, tiene que crecer más o menos con el número de bits del cromosoma, aunque nadie ha aclarado cómo tiene que hacerlo.

---

Por supuesto, depende también del ordenador en el que se ejecutará, puesto que a mayor tamaño de la población, el proceso sería más lento.

- Condición de terminación: lo más habitual es que la condición de terminación sea la convergencia del algoritmo genético a un valor dado o un número prefijado de generaciones.

#### **A.3.4. 1 Inicialización**

El proceso comienza con la inicialización de la primera población de individuos padre ( $G = 0$ ), desde un archivo con valores conocidos, o de manera aleatoria.

El tamaño de la población es una variable de decisión puesto que una población pequeña es posible que no cubra todo el espacio de búsqueda y una población grande puede multiplicar el tiempo de cálculo innecesariamente. Por ello entre 50 y 100 individuos es el intervalo que propone la bibliografía ya que proporciona buenos resultados en el proceso de optimización.

Normalmente, la población inicial se consigue si se utiliza un método aleatorio. Sin embargo, se puede fijar un cierto número de individuos de la población inicial, por ejemplo dándoles los valores centrados en los intervalos que proporciona la bibliografía para los parámetros  $\lambda_i$ . De esta manera, si estos individuos son buenos, serán conservados en subsiguientes generaciones y harán que se converga con rapidez. El número de individuos que se quieren incluir en la población inicial y el genoma de los mismos, puede ser definido por el modelador.

#### **A.3.4. 2 Evaluación y selección**

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema. A partir de estos parámetros se halla la solución del problema y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución. A esta puntuación se le llama fitness.

El fitness determina siempre los cromosomas que se van a reproducir, y aquellos que se van a eliminar, pero hay varias formas de considerarlo para seleccionar la población de la siguiente generación:

- Usar el orden, o rango, y hacer depender la probabilidad de permanencia o evaluación de la posición en el orden.
- Aplicar alguna operación al fitness para escalarlo, como puede ser el escalado sigma.
- En ocasiones, el fitness no es una sola cantidad, sino diversos números, que tienen distinta consideración. Es suficiente el que se forme un orden parcial, es decir, que se puedan comparar dos fitness de manera que uno sea mejor que otro. Esto es habitual cuando se quieren optimizar varios objetivos.

Una vez se ha evaluado el fitness, hay que crear la nueva población y tener en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a ésta. Para ello, se seleccionan una

---

serie de individuos encargados de realizar la reproducción, la cual se puede hacer de dos formas principales:

1. Selección directa: toma elementos de acuerdo a un criterio objetivo, como son «los x mejores», «los x peores», etc. Otra opción es elegir con instrucciones del tipo «el cuarto individuo a partir del último escogido», método que es empleado con mucha frecuencia cuando se quieren seleccionar dos individuos distintos, y se selecciona el primero por un método aleatorio o estocástico.
2. Selección aleatoria: puede ser realizado por selección equiprobable o selección estocástica.

2.1.-Selección equiprobable: todos tienen la misma probabilidad de ser escogidos.

2.2.-Selección estocástica: la probabilidad de que un individuo sea escogido depende de una heurística. Se distinguen así distintos tipos de procedimientos estocásticos, como son:

*Rueda de ruleta:* se crea un pool genético formado por cromosomas de la generación actual, en una cantidad proporcional a su fitness. Si la proporción hace que un individuo domine la población, se le aplica alguna operación de escalado. Dentro de este pool, se cogen parejas aleatorias de cromosomas y se emparejan, sin importar incluso que sean del mismo progenitor (para eso están otros operadores, como la mutación). Hay otras variantes: por ejemplo, en la nueva generación se puede incluir el mejor representante de la generación actual. En este caso, se denomina método elitista.

*Basado en el rango:* en este esquema se mantiene un porcentaje de la población, generalmente la mayoría, para la siguiente generación. Se coloca toda la población por orden de fitness, y los 'M' menos dignos son eliminados y sustituidos por la descendencia de alguno de los 'M' mejores con algún otro individuo de la población. A este esquema se le pueden aplicar otros criterios; por ejemplo, se crea la descendencia de uno de los paladines/amazonas, y esta sustituye al más parecido entre los perdedores. Esto se denomina crowding, y fue introducido por DeJong.

*Por torneo:* escoge un subconjunto de individuos de acuerdo con una de las técnicas anteriores, y de entre ellos selecciona el más adecuado por otra técnica - habitualmente, determinista de tipo «el mejor» o «el peor»-. Esta técnica tiene la ventaja de que permite un cierto grado de elitismo, puesto que el mejor nunca va a morir, y los mejores tienen más probabilidad de reproducirse y de emigrar que los peores.

### **A.3.4. 3 La reproducción**

El objetivo de la reproducción es crear nuevos individuos mediante el uso de los operadores genéticos. En este caso, se usan los operadores de cruce y mutación.



---

---

#### A.3.4. 4 El operador de cruce (crossover)

Se denomina crossover o entrecruzamiento a la forma de calcular el genoma del nuevo individuo en función del genoma del padre y de la madre. El operador de cruce tiene un alto grado de responsabilidad en las propiedades del algoritmo genético, determinando en gran medida la evolución de la población. El crossover es el principal operador genético, hasta el punto que se puede decir que no es un algoritmo genético si no tiene crossover, y, sin embargo, puede serlo perfectamente sin mutación, según descubrió Holland. El teorema de los esquemas confía en él para hallar la mejor solución a un problema, al combinar soluciones parciales.

Para aplicar el entrecruzamiento se escogen aleatoriamente dos miembros de la población. No tiene importancia si se emparejan dos descendientes de los mismos padres; ello garantiza la perpetuación de un individuo con buena puntuación. Sin embargo, si esto sucede demasiado a menudo, podría crear problemas, puesto que toda la población podría aparecer dominada por los descendientes de algún gen, que, además, puede tener caracteres no deseados. Esto se suele denominar en otros métodos de optimización atranque en un mínimo local, y es uno de los principales problemas con los que se enfrentan los que aplican algoritmos genéticos.

En cuanto al teorema de los esquemas, se basa en la noción de bloques de construcción. Una buena solución a un problema está constituida por unos buenos bloques, igual que una buena máquina está hecha por buenas piezas. El crossover es el encargado de mezclar bloques buenos que se encuentren en los diversos progenitores, y que serán los que den a los mismos una buena puntuación. La presión selectiva se encarga de que sólo los buenos bloques se perpetúen, y poco a poco se conforme una buena solución. El teorema de los esquemas viene a decir que la cantidad de buenos bloques aumenta con el tiempo de ejecución de un algoritmo genético, y es el resultado teórico más importante en algoritmos genéticos.

Existe una gran cantidad de técnicas de cruce, pero en este texto tan solo se va a tratar con las principales, que son:

- **Crossover n-puntos:** Los dos cromosomas se cortan por ' n ' puntos, de modo que el material genético situado entre ellos se intercambia. Lo más habitual es un cruce de un punto o de dos puntos. En la Figura A.12 se observa esquemáticamente como se produce un cruce en un punto.
- *Crossover uniforme:* Se genera un patrón aleatorio de 1s y 0s, intercambiándose los bits de los dos cromosomas que coincidan donde hay un 1 en el patrón. O bien se genera un número aleatorio para cada bit, y si supera una determinada probabilidad se intercambia ese bit entre los dos cromosomas.



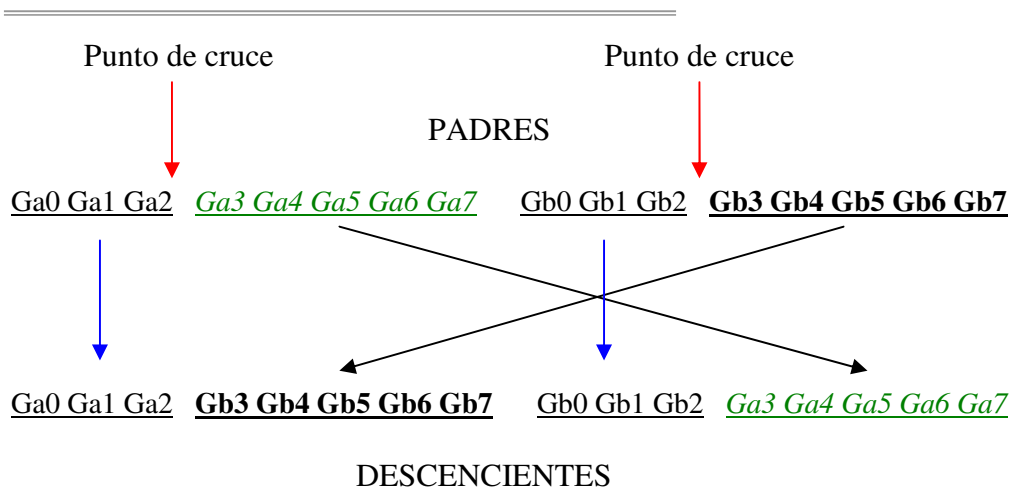


Figura A.12 El operador de cruce

### A.3.4. 5 El operador mutación

Se define mutación como una variación de las informaciones contenidas en el código genético -habitualmente, un cambio de un gen a otro producido por algún factor exterior al algoritmo genético-. En la vida real, las mutaciones se dan en un porcentaje muy bajo, la misma baja frecuencia será aplicable a los algoritmos genéticos.

Una vez establecida la frecuencia de mutación, por ejemplo, uno por mil, se examina cada bit de cada cadena cuando se crea un individuo a partir de sus padres. Esta operación ocurre normalmente de manera simultánea con el crossover. Si un número generado aleatoriamente está por debajo de esa probabilidad, se cambiará el bit (es decir, de 0 a 1 o de 1 a 0). Si no, se dejará como está. Depende del número de individuos que haya y del número de bits por individuo, puede resultar que las mutaciones sean extremadamente raras en una sola generación. En la Figura A.13 se observa todo esto de manera más clara.

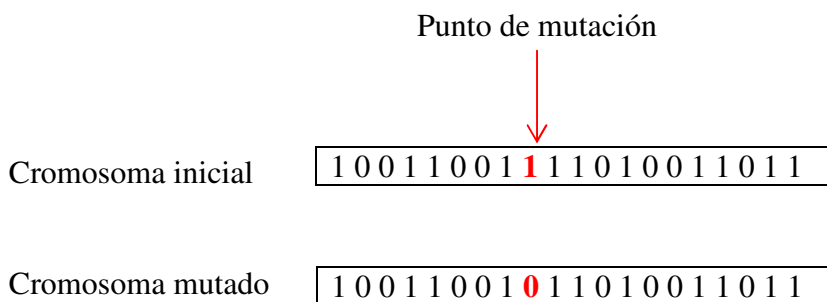


Figura A.13 Operador de mutación en un punto, con alfabeto binario

Algunas de las ventajas que aporta la mutación al algoritmo son:

- Desbloqueo del algoritmo. Si el algoritmo se bloquea en un mínimo parcial, una mutación puede sacarlo al incorporar nuevos fenotipos de otras zonas del espacio.
- Acabar con poblaciones degeneradas. Puede ocurrir que, bien por haber un cuasi- mínimo, bien porque en pasos iniciales apareció un individuo demasiado

---

bueno que acabó con la diversidad genética, la población tenga los mismos fenotipos. La mutación permite introducir nuevos genomas.

- Incrementar el número de saltos evolutivos. Los saltos evolutivos -aparición de un fenotipo especialmente valioso, o, dicho de otra forma, salida de un mínimo local- son muy poco probables en un genético puro para un problema genérico. La mutación permite explorar nuevos subespacios de soluciones, por lo que, si el subespacio es bueno en términos de adaptación, se producirá un salto evolutivo después de la mutación que se expandirá de forma exponencial por la población.
- Enriquecer la diversidad genética. Es un caso más suave que el de una población degenerada -por ejemplo, que la población tenga una diversidad genética pobre-, la mutación es un mecanismo de prevención de las poblaciones degeneradas.

Es necesario evitar tasas de mutación excesivamente altas, puesto que se podría caer en la deriva genética. Una estrategia muy empleada es una tasa de mutación alta al inicio del algoritmo, para aumentar la diversidad genética, y una tasa de mutación baja al final del algoritmo, para conseguir que converja.

La mutación es un parámetro del que no conviene abusar, puesto que si bien es un mecanismo generador de diversidad, también es cierto que reduce el algoritmo genético a una búsqueda aleatoria. Siempre es más conveniente usar otros mecanismos de generación de diversidad, como aumentar el tamaño de la población, o garantizar la aleatoriedad de la población inicial.

#### **A.3.4.6 Evaluación**

Después de la reproducción, el siguiente paso en la evolución es la evaluación. Ésta consiste en la asignación de la “puntuación” que procede de la función objetivo evaluada con cada individuo.

En este caso, se realiza el cálculo de la función objetivo para el cromosoma del individuo correspondiente. Esta es la valoración de la bondad de cada individuo que se almacena en la variable “puntuación” definida.

#### **A.3.4.7 Penalización**

Una vez que la función objetivo ha sido evaluada para cada descendiente, el algoritmo verifica que se cumplan las restricciones que se habían impuesto, y penaliza a los individuos que no cumplen las restricciones.

La función de penalización asigna al individuo que no cumple las restricciones el peor de los resultados de la “puntuación” de todos sus hermanos, de manera que la probabilidad de que se reproduzca en base a su bondad se ve disminuida.

Se suelen definir unas funciones para penalizar la “puntuación” de los individuos peores de manera que estos no sean escogidos para siguientes iteraciones. Estas funciones introducen penalizaciones referidas al peor individuo de la generación actual. Esta

---

---

función se suma a la “puntuación” de los individuos peores de manera que se altera el valor inicial y hace, a los individuos poco adecuados, peores todavía.

Varios autores sugieren que esta penalización no debe ser constante sino que en las primeras generaciones se debe ser mucho más permisivo que en las últimas con objeto de recorrer todo el espacio de posibles individuos. Así, el algoritmo integra unas funciones que determinan la penalización en cada generación con objeto de buscar individuos en todo el espacio, pero dirigiéndose siempre hacia los mejores.

Incluso puede darse el caso de tener individuos que proporcionen un sentido físico pero su conjugación no proporcione un elemento matemáticamente compatible con el proceso de búsqueda (por ejemplo elementos que proporcionan ceros en la solución de la función objetivo, indeterminaciones o infinitos matemáticos que no tienen sentido). En estos casos, deberán definirse funciones de penalización adicionales que eviten la consideración de estos individuos para próximas reproducciones que consigan eliminarlos del espacio de búsqueda.

#### **A.3.4. 8 Escalado**

Una vez que ha sido asignada su “puntuación” a cada uno de los individuos, se tiene una población de tamaño “popsize”+ “nrepl” y se procede al escalado de los individuos.

Este proceso persigue evitar dos problemas: El primero de ellos es lo que ocurre si aparece en una población un individuo excepcionalmente bueno en generaciones muy tempranas, llamados “superdotados” entre otros mediocres. Esto puede hacer que sean solo ellos los que se reproduzcan, por lo que se obliga a una convergencia prematura y evita que puedan encontrarse buenos individuos de otras familias.

El otro problema que puede darse es que todos los individuos sean igual de mediocres, de manera que, diametralmente opuesto al caso anterior, las generaciones no mejoran sensiblemente puesto que todos los progenitores son iguales. En este caso será interesante ampliar las diferencias entre las “puntuaciones” de los individuos con objeto de que la selección sea mejor.

El escalado amortigua las diferencias de “puntuaciones” de los individuos en las primeras generaciones y los acentúa en las últimas. Se definen unas funciones de escala, que pueden ser de varias maneras, pero en este caso se implementa una función lineal, adecuada a cada generación. Estas funciones pueden a su vez, ser seleccionadas por el modelador.

#### **A.3.4. 9 Terminación**

El algoritmo contiene las estadísticas, las estrategias de generación de hijos, las funciones objetivo de la población, las funciones de referencia con las que se debe comparar, y los factores de selección de los individuos hijo. Un algoritmo típico estaría en funcionamiento hasta el infinito, por ello hay que definir dentro del mismo los criterios de terminación.

El ciclo de la evolución se repetirá hasta un número indeterminado de generaciones mientras los criterios de terminación no se vean satisfechos. Dichos



---

criterios deben determinar las condiciones que se deben satisfacer para que se considere que se ha encontrado la mejor solución, o que se ha llegado al máximo número de generaciones que el modelador y los recursos disponibles están dispuestos a destinar.

La bibliografía presenta diferentes criterios para determinar el final de la evolución. El más simple e igualmente el más utilizado es el criterio de limitar el número de generaciones totales (  $G$  ), donde se asume que terminado este estudio, el algoritmo habrá encontrado un buen individuo.

Existen otros criterios más complejos basados en el estudio de las características de la población. Así, se distingue entre dos tipos de convergencia:

- ➔ Terminar cuando se haya producido una convergencia aceptable en los resultados de la “puntuación” proporcionada por todos los individuos de cada generación, para lo cual hay que definir el error permitido.
- ➔ Terminar cuando se cumple el criterio de convergencia y además un criterio de diversidad de la población: casi todos los individuos tienen el mismo genoma (Martorell et al., 2000).

### **A.3.5 Programas con algoritmos genéticos**

A través de la red se pueden encontrar multitud de programas basados en algoritmos genéticos, tanto gratuitos como de pago, que permiten apreciar la potencia de este método de optimización. Algunos de estos programas permiten manipularlos, de modo que se puedan adaptar a la aplicación particular de cada uno. A título informativo, en las siguientes líneas se comentarán algunos de estos programas, que en determinadas ocasiones pueden ser útiles.

#### **A.3.5.1 *Gwin 2***

Se le conoce más como WinGA. Es un programa que permite ejecutar algoritmos genéticos simples, así como cambiar sus parámetros. Además, tiene la ventaja de admitir ampliaciones mediante la programación de nuevas funciones en lenguaje Pascal. Fue realizado por I.R. Munro, de la Universidad de Hertfordshire. Está disponible en la página web Zooland, y en el sitio ftp del autor.

#### **A.3.5.2 *Algoritmos genéticos programados en Java***

Dicho algoritmo se encuentra en el sitio denominado Evolvica, al cual se accede desde la página de aplicaciones evolutivas en Java. Este algoritmo está programado para evolucionar formas bajo control del usuario. El usuario elige primero la forma hacia la que tenderá la evolución, y luego, en cada generación elige las formas que mutarán para dar finalmente, con un poco de suerte, la que se ha elegido inicialmente. Se pueden modificar los parámetros, como por ejemplo, la tasa de mutación y la relación de mutación, y ver como varían las formas generadas.

---

---

Otro ejemplo de algoritmo genético programado en Java es el realizado por Ramsey, de la Universidad de Arizona, es este un algoritmo genético simple que trata de hallar el máximo global de una función con muchos máximos y una sola variable. El valor de esa variable para los diferentes elementos de la población aparece como líneas verticales de color. Se puede variar, por ejemplo, la tasa de mutación; en problemas tan pequeños el crossover no tiene tanta importancia.

### **A.3.5.3 *OptiGA***

OptiGA es un programa basado en Visual Basic para la implementación de algoritmos genéticos. Independientemente de la naturaleza del problema, el programa permitirá adaptar el algoritmo a éste. Además, el programa permite variar entre distintas formas los parámetros estándar, como son el método de selección, el entrecruzamiento o la mutación.

