

# Tesis Doctoral



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

**MODELACIÓN DE LA INTRUSIÓN PATÓGENA  
A TRAVÉS DE FALLOS Y SU IMPLICACIÓN  
EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

**JOSÉ DE JESÚS MORA RODRÍGUEZ**

DIRECTORA

**PETRA AMPARO LÓPEZ JIMÉNEZ**

INGENIERÍA HIDRÁULICA  
Y MEDIO AMBIENTE  
Valencia, 2011



A Xitlali



## **Agradecimientos**

El presente trabajo ha sido logrado por la orientación y apoyo incondicional de Amparo. Por su motivación y energía puesta en este proyecto. Un agradecimiento especial por su entrega.

Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, a los Grupos de investigación de la ETSCCyP y ETSII por su apoyo y prestación de servicios en el trabajo diario. Al equipo del laboratorio de hidráulica: a Manolo y a Paco. A los amigos de doctorado con los que he compartido momentos importantes, por sus consejos y ayuda durante el proceso de este proyecto.

A Los Miembros del Tribunal y Evaluadores de la tesis por su valiosa colaboración en la definición de la versión final del presente documento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por su apoyo para el desarrollo del doctorado en su Programa de Posgrados en el Extranjero.

Al Centro de Estudios de Hidrosistemas de la Universidad Técnica de Lisboa, a la Profesora Helena y a su equipo de trabajo por su colaboración y prestación de instalaciones para las aportaciones precisas a este proyecto.

A la Generalitat Valenciana por su apoyo con el Programa de Formación de Personal Investigador de Carácter Predoctoral.

A la familia y amigos en Valencia y México, a mis padres Jesús y Lupita, y en especial a Vicky por su apoyo constante durante este camino.



## II RESUMEN

El presente trabajo se enmarca en una de las líneas de investigación que se han venido desarrollando en las décadas recientes. La calidad del agua para el consumo humano es uno de los temas vigentes por parte de los gestores de los sistemas de abastecimiento y de centros de investigación en el entorno de la hidráulica urbana. Este aspecto es abordado desde distintos puntos de vista, motivado de manera primordial por las consecuencias que implica el consumo de agua contaminada. En este sentido y por tratarse de la protección de la salud pública, es indispensable tener mayor conocimiento en todas las formas en las que se ha visto vulnerable el agua potable.

Las redes de distribución de agua, como toda obra de ingeniería presentan una vida útil, en la mayoría de las poblaciones urbanas se tienen instalaciones que han cumplido con ella y como consecuencia de circunstancias adversas se pueden ir incrementando los problemas físicos en las conducciones con el paso del tiempo. En las décadas recientes, en las zonas de producción y tratamiento el problema de la calidad del agua cada vez está más controlado. En cambio en las redes de distribución se ha venido incrementando la degradación de la calidad por problemas de contaminación, hecho que ha sido documentado principalmente por eventos epidemiológicos. Entre otros factores identificados en esta problemática se encuentra el fenómeno de la intrusión patógena.

En el presente trabajo se analiza la intrusión patógena como un evento relacionado directamente con las fugas de agua en las conducciones de la red. Este tipo de intrusión se produce con entrada de flujo circundante a las tuberías

a través de los defectos en las mismas cuando las condiciones de presión son adversas en la instalación.

Así pues, la situación de las fugas físicas en la red se considera un factor determinante en el rendimiento hidráulico de la misma, y además puede representar un riesgo para la calidad del agua en el suministro y por ende para la salud pública cuando la fiabilidad en la operación no es del todo segura.

La metodología planteada se ha basado en reproducir los eventos adversos en las conducciones para la generación de la intrusión. El interés de realizar estos trabajos es debido a que en la mayoría de las investigaciones consultadas en este aspecto, se considera que la cuantificación de las intrusiones en la red es un factor fundamental para tener mayor control en la gestión de este tipo de adversidades. En este sentido se realizó experimentación controlada, para después reproducir de forma numérica el evento hidrodinámico. Se crearon escenarios presentes en campo a partir de herramientas que han sido validadas con modelos físicos y con ello tener la fiabilidad de los resultados en cuanto a eventos de intrusión puntuales que se puedan plantear en casos particulares en las redes de distribución.

Una forma de tener considerado unos de los elementos en la intrusión es la clasificación de los tipos de fallos que se tienen presentes en las conducciones. En este sentido se plantearon escenarios en los modelos físicos y numéricos para lograr así una mejor aproximación del fenómeno de intrusión que se presenta en campo. De esta manera, se busca mejorar la reproducción de condiciones presentes en las redes de distribución con respecto a parámetros que dependen de las características físicas y con ello la alteración en los eventos hidráulicos. Otro de los factores determinantes en la interacción de fluidos entre el interior de la conducción con el exterior de la misma, es el

medio físico poroso que juega un papel determinante cuando las fuerzas de presión internas son equiparables con las fuerzas de retención y pérdida de carga que pueda generar este medio. De esta forma el medio poroso ha sido incluido en los modelos para mejorar la representación hidrodinámica del fenómeno de intrusión.

La cuantificación de la intrusión en eventos transitorio es uno de los temas de mayor demanda en trabajos previos de esta línea de investigación, el enfoque de esta problemática ha sido uno de los temas donde se ha puesto mayor énfasis. Por lo tanto, se ha realiza la representación física y numérica de las condiciones más adversas para la generación de la intrusión en este aspecto. De esta forma se abordaron los casos en donde los eventos pueden ser más agresivos con la calidad del agua.

Finalmente, al tener las herramientas numéricas validadas se pueden reproducir escenarios puntuales donde la vulnerabilidad de la red este comprometida y con ello tener mayor conocimiento de las posibles situaciones que podrían darse durante eventos imprevistos o por cuestiones de gestión en la distribución debida al abastecimiento intermitente.



## **I II ABSTRACT**

This work is part of the researches that have been developed in the recent decades. The drinking water quality is one of the existing issues for water supply systems managers and for the engineering research centers of urban water. This aspect is tackled from different points of view, mainly motivated by the consequences that imply the consumption of contaminated water. In this sense, and because the protection of public health depends on this, it is essential to have greater knowledge in all the ways that the drinking water has been seen vulnerable.

The water distribution networks, like all engineering facilities, have a useful life. Majority of the cities have infrastructure where the live cycle have finished, and as a result of adverse circumstances physical problems may be increasing in the pipes over the time. In recent decades, the problem of water quality is decreasingly on the production and treatment of the drinking water. However, on the distribution networks the water quality has been increasing because of pollution situations that have been documented mainly by epidemiological events. Among others factors identified in this problematic the pathogen intrusion phenomenon can be found.

In this research, pathogen intrusion is analyzed as an event directly related with leaks on pipes of water supply networks. This kind of intrusion is produce with entrance of surrounding flow to the pipes through the defects on them when the conditions of pressure are adverse in the infrastructure.

Thus, the situation of physical leaks is considered a determinant factor in the hydraulic performance of the network, and besides it can represent a risk for water quality in the supply and therefore for the public health when the reliability in the operation is not entirely safe.

The proposed methodology is based on model the adverse events in the pipes for the generation of the intrusion. The interest to carry out these works is because most of the studies consulted in this aspect consider that the quantification of the intrusions in the network is a fundamental factor to have greater management control of this type of adversities. Therefore, experimentation controlled was carried out, and then reproduce numerically the hydrodynamic event. Many scenarios were made like are present on the networks, with tools that were validated with physical models and thus have the reliability of the results on specific intrusion events that may arise in particular cases in the distribution networks.

A way to consider some elements in the intrusion is the classification of the type of failures existing in the pipes. So, different scenarios were proposed to study the physical and numerical models to achieve a better adjust of the intrusion event that occurs in the network. In this way, it seeks to improve the reproduction of conditions that are present on the distribution networks with regard to parameters that depend on the physical characteristics and with it the alteration in the hydraulic events. The porous media is another decisive factor in the interaction of fluids between the interior of the pipes with the outside of them. It plays an important role when the internal pressure forces are comparable with the forces of retention and loss pressure that could generate this media. In this way the porous media has been included in the models to improve the hydrodynamic representation of the intrusion phenomena.

The quantification of the intrusion on transient events is one of the most requested themes on previous studies of this line of research; the focus of this issue has been one of the topics that have placed more emphasis. Therefore, it has made physical and numerical representation of the most adverse conditions for the generation of the intrusion related to this aspect. In this way the cases were undertaken where the events can be more aggressive with the water quality.

Finally, with validated numerical tools, specific scenarios have been reproduced where the vulnerability of the network is compromised. With the results, a greater knowledge is achieved in order to model the possible situations that could arise during unexpected events or by management issues in the distribution due to the intermittent supply.



## I III RESUM

El present treball s'emmarca en una de les línies d'investigació que s'han vingut desenvolupant en les dècades recents. La qualitat de l'aigua per al consum humà és un dels temes vigents per part dels gestors dels sistemes de proveïment i de centres d'investigació a l'entorn de la hidràulica urbana. Aquest aspecte és abordat des de diferents punts de vista, motivat de manera primordial per les conseqüències que implica el consum d'aigua contaminada. En aquest sentit i per tractar-se de la protecció de la salut pública, és indispensable tindre un major coneixement en totes les formes en les quals s'ha vist vulnerable l'aigua potable.

Les xarxes de distribució d'aigua, com tota obra d'enginyeria, presenten una vida útil, en la majoria de les poblacions urbanes es disposa instal·lacions que han complit amb ella i com a conseqüència de circumstàncies adverses es poden anar incrementant els problemes físics en les conduccions amb el pas del temps. En les dècades recents, en les zones de producció i tractament, el problema de la qualitat de l'aigua cada vegada està més controlat. En canvi en les xarxes de distribució s'ha vingut incrementant la degradació de la qualitat per problemes de contaminació, fet que ha sigut documentat principalment per esdeveniments epidemiològics. Entre altres factors identificats en aquesta problemàtica es troba el fenomen de la intrusió patògena.

En el present treball s'analitza la intrusió patògena com un esdeveniment relacionat directament amb les pèrdues d'aigua en les conduccions de la xarxa. Aquest tipus d'intrusió es produeix amb entrada de flux circumdant a les

canonades a través dels defectes en les mateixes quan les condicions de pressió són adverses en la instal·lació.

Així doncs, la situació de les fugides físiques en la xarxa es considera un factor determinant en el rendiment hidràulic de la mateixa, i a més pot representar un risc per a la qualitat de l'aigua en el subministrament i per tant per a la salut pública quan la fiabilitat en l'operació no és del tot segura.

La metodologia plantejada s'ha basat a reproduir els esdeveniments adversos en les conduccions per a la generació de la intrusió. L'interès de realitzar aquests treballs és a causa que en la majoria de les investigacions consultades en aquest aspecte, es considera que la quantificació de les intrusions en la xarxa és un factor fonamental per a obtenir un major control en la gestió d'aquest tipus d'adversitats. En aquest sentit es va realitzar experimentació controlada, per a després reproduir de forma numèrica l'esdeveniment hidrodinàmic. Es van crear escenaris presents en camp a partir d'eines que han sigut validades amb models físics, i amb açò tindre la fiabilitat dels resultats en quant a esdeveniments d'intrusió puntuals que es puguem plantejar en casos particulars en les xarxes de distribució.

Una forma de tindre considerat uns dels elements en la intrusió és la classificació dels tipus de defectes que es tenen presents en les conduccions. En aquest sentit es van plantejar escenaris en els models físics i numèrics per a aconseguir així una millor aproximació del fenomen d'intrusió que es presenta en camp. D'aquesta manera, l'objectiu és millorar la reproducció de condicions presents en les xarxes de distribució pel que fa a paràmetres que depenen de les característiques físiques i amb açò l'alteració en els esdeveniments hidràulics. Un altre dels factors determinants en la interacció de fluids entre l'interior de la conducció amb l'exterior de la mateixa és el mig físic porós que

juga un paper determinant quan les forces de pressió internes són equiparables amb les forces de retenció i perduda de càrrega que puga generar aquest mitjà. D'aquesta forma el mitjà porós ha sigut inclòs en els models per a millorar la representació hidrodinàmica del fenomen d'intrusió.

La quantificació de la intrusió en esdeveniments transitoris és un dels temes de major demanda en treballs consultats d'aquesta línia d'investigació, l'enfocament d'aquesta problemàtica ha sigut un dels temes on s'ha posat major èmfasi. Per tant, s'ha realitzat la representació física i numèrica de les condicions més adverses per a la generació de la intrusió en aquest aspecte. D'aquesta forma es van abordar els casos on els esdeveniments poden ser més agressius amb la qualitat de l'aigua.

Finalment, en tenir les eines numèriques validades es poden reproduir escenaris puntuals on la vulnerabilitat de la xarxa així compromesa i amb açò tenir major coneixement de les possibles situacions que podrien donar-se durant esdeveniments imprevists o per qüestions de gestió en la distribució deguda al proveïment intermitent.



## I IV OBJETIVOS

El objetivo de la tesis es obtener valores cuantificables del fenómeno de intrusión patógena a través de fallos físicos en las conducciones. Para lo cual, se consideran dos tipos de eventos en condiciones adversas de presión dentro de la red.

El primer caso de intrusión se realiza de forma permanente, haciendo la representación de la diversidad de fallos y con ello obtener escenarios como los que se pueden producir cuando se tiene una distribución intermitente del agua. Se realiza un modelo análogo al de las fugas para el fenómeno de intrusión. Mediante los modelos experimental y numérico se obtiene una validación de los datos y en consecuencia una serie de escenarios en donde las condiciones físicas pueden ser representadas.

En el segundo de los casos se realiza la modelación en estado no permanente. Se identifica la respuesta de la instalación por la inclusión del fallo y se representa de manera numérica, en este caso se utiliza un modelo en particular del método de las características, el cual se usa de enlace entre la representación física y el modelo numérico con el que se determinan los volúmenes de intrusión.

Como parte de los resultados logrados, y que se considera como uno de los objetivos, se propone una metodología para la modelación de elementos que influyen en la alteración de la calidad del agua elaborado con técnicas de dinámica de fluidos computacional y que proporciona un punto de vista

diferente para la generación de información en las prácticas de gestión del agua en el abastecimiento.

En ese sentido se busca fortalecer la importancia de la gestión de fugas, que aunado a la labor de mejora del rendimiento hidráulico de la red se da un elemento más para ahondar en la solución de esta problemática. Se hace hincapié en sistemas de distribución que tienen que abastecer de forma intermitente, agudizando la problemática de la calidad agua.

Con este tipo de trabajos se incide en la conservación del agua potable, con lo que supone un ahorro del agua como recurso hídrico, gasto energético y de prácticas necesarias para la potabilización. Por otro lado, la entrada de elementos ajenos al flujo de agua potable puede generar riesgos para la salud. Por ello, todos los esfuerzos encaminados a la cuantificación del potencial de intrusión, se consideran muy adecuados.

## **I V ESTRUCTURA DE LA TESIS**

El presente trabajo de tesis se ha dividido en seis capítulos, se hace una descripción desde el entorno general de los sistemas de distribución de agua hasta abordar de forma teórica el fenómeno de intrusión patógena en particular. Posteriormente se describe la asociación entre el evento de las fugas con respecto a los eventos de intrusión, se muestran las técnicas de simulación y se realiza la aportación de lo que puede representar las situaciones adversas en la operación por la confluencia de factores que generan la intrusión. En el apartado final se concluye y se proponen trabajos a desarrollar.

En el capítulo uno se hace una descripción de los elementos que tienen principal implicación en el mejoramiento y conservación de la calidad del agua, y se identifican los factores que pueden llegar a alterar esta calidad. Se analizan los eventos de contaminación en el abastecimiento que han sucedido en los años recientes y el riesgo que existe en caso de que se presente contaminación en el agua de consumo.

En el capítulo dos se describe el tema en específico de la intrusión patógena, las formas en las que se produce este fenómeno, así como los casos en los que se ha estudiado con anterioridad. Se justifica el análisis de la intrusión patógena relacionado a las fugas en las conducciones de agua y se hace una descripción de ambos eventos relacionado con los fallos en las tuberías.

En el capítulo tres se desarrolla el modelo de intrusión análogo al de fugas. Se hace un análisis de los modelos que se han realizado en trabajos previos de cuantificación de fugas. Se describe el prototipo en el que se basa el modelo de intrusión, así como la construcción de la instalación física y el desarrollo de la representación numérica. Se generan diversos escenarios relacionados a los tipos de fugas y formas de los fallos, así como la consideración del medio poroso exterior de la conducción. Se evalúa el evento de intrusión análogo al de fuga y se muestra la relación entre ambos modelos.

En el capítulo cuatro se muestra el modelo de la intrusión a través de fallos durante eventos transitorios de presión. Se describe el modelo físico para la generación de la intrusión. Se presenta el modelo numérico que se utiliza para la vinculación entre el transitorio en la instalación física y la representación numérica en dinámica de fluidos computacional. Finalmente se muestra el ajuste y los resultados de intrusión obtenidos en la simulación.

En el capítulo cinco se hace una descripción de la vulnerabilidad de la red de distribución a eventos de intrusión a través de fallos. Se utiliza la metodología de la modelación numérica para crear escenarios con condiciones en particular para evaluar la capacidad de intrusión en diversos eventos.

En el capítulo seis se concluye y se proponen trabajos posteriores en este tema de investigación.

## ÍNDICE GENERAL

I I RESUMEN .....	vii
I II ABSTRACT .....	.xi
I III RESUM .....	xv
I IV OBJETIVOS .....	xix
I V ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	xxi
<b>1 DISTRIBUCIÓN Y CALIDAD DEL AGUA EN EL ABASTECIMIENTO .....</b>	<b>39</b>
1.1 Sistemas de Abastecimiento de Agua .....	41
1.1.1 Elementos del sistema de abastecimiento.....	42
1.1.2 Líneas de conducción .....	43
1.1.3 Consumo de agua en la distribución .....	46
1.2 Calidad del Agua en el Abastecimiento.....	48
1.2.1 La desinfección .....	50
1.2.2 Vigilancia de la calidad del agua.....	55
1.2.3 Enfermedades debidas al consumo de agua.....	59
<b>2 INTRUSIÓN PATÓGENA A TRAVÉS DE FALLOS .....</b>	<b>75</b>
2.1 Antecedentes .....	77
2.2 Vías de Entrada de los Patógenos .....	81
2.3 Fuentes Contaminantes .....	85
2.4 Mecanismos que Generan Intrusión.....	91
2.5 El Deterioro de las Conducciones.....	94
2.6 Análisis del Material de las Conducciones .....	99
2.6.1 Conducciones metálicas .....	99
2.6.2 Conducciones de matriz de cemento.....	101
2.6.3 Conducciones plásticas .....	103
2.7 Consecuencias de los Fallos .....	104
<b>3 MODELO DE INTRUSIÓN ANÁLOGO AL DE FUGAS .....</b>	<b>109</b>
3.1 Las Fugas de Agua en las Conducciones.....	111
3.2 Justificación del Modelo.....	112

3.3	Modelo de la Fuga.....	112
3.3.1	Estudios previos .....	115
3.3.2	Relación potencial en la fuga .....	116
3.4	Modelo de Intrusión en Estado Permanente .....	119
3.4.1	Antecedentes del modelo de intrusión.....	119
3.4.2	Prototipo de la intrusión .....	125
3.4.3	Modelo experimental.....	125
3.4.4	Tipo de fallos a ensayar.....	130
3.4.5	Ensayos experimentales del modelo análogo al de fugas.....	135
3.4.6	Resultados del modelo de intrusión permanente.....	137
3.5	La Relación Potencial, Intrusión vs Fugas.....	139
3.6	Variación de los fallos durante la intrusión.....	141
3.7	La Intrusión con un Medio Exterior Poroso .....	145
3.8	Aplicación del Modelo CFD .....	147
3.8.1	Dinámica de fluidos computacional .....	147
3.8.2	CFD aplicado a la Intrusión permanente.....	158
3.8.3	Representación del Medio poroso en el CFD.....	166
3.9	Resultados del Modelo CFD en Estado Permanente.....	169
3.9.1	Resultados para el fallo circular de 4mm .....	169
3.9.2	Resultados para el fallo circular de 1mm .....	173
3.9.3	Resultados para el fallo transversal de 48mm .....	175
3.9.4	Resultados para el fallo longitudinal de 44mm.....	178
3.9.5	Resultado para el fallo circular de 1mm en medio poroso .....	182
<b>4</b>	<b>LA INTRUSIÓN EN UN TRANSITORIO DE PRESIÓN.....</b>	<b>189</b>
4.1	Los Modelos Hidráulicos en Transitorio de Presión .....	191
4.1.1	Golpe de Ariete en Tuberías.....	192
4.1.2	Método de las Características Modificado.....	194
4.1.3	Incorporación de la cavitación y del orificio en el MOC.....	199
4.2	Modelo Físico de Intrusión Durante el Transitorio .....	201
4.2.1	Instalación del Modelo Experimental .....	202
4.2.2	Ensayos experimentales.....	204
4.2.3	Resultados experimentales .....	206

4.3	Aplicación del MOC con Cavitación y Orificio .....	217
4.3.1	Resultados del MOC modificado .....	219
4.4	Modelo CFD Aplicado al Evento Transitorio .....	223
4.4.1	Modelo de CFD antes del transitorio .....	223
4.4.2	Modelo de CFD durante el transitorio .....	228
4.5	Resultados del Modelo de Intrusión en Transitorio.....	231
4.5.1	Resultados CFD para el fallo de 2mm durante el transitorio .....	231
4.5.2	Resultados CFD para el fallo de 4mm durante el transitorio .....	242
<b>5</b>	<b>LA INTRUSIÓN PATÓGENA EN LA DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>255</b>
5.1	Las Zonas de Vulnerabilidad.....	257
5.2	Aspectos a Considerar en base al Modelo Resuelto .....	258
5.3	La Intrusión en el Abastecimiento.....	260
5.4	Intrusión en Estado Permanente con Medio Poroso .....	263
5.5	Intrusión en Transitorio con Medio Poroso .....	271
5.6	Bifurcación en una Red de Distribución .....	278
5.6.1	Configuración de la instalación a modelar .....	278
5.6.2	Escenarios en la bifurcación en estado permanente .....	280
5.6.3	Escenario de la bifurcación en transitorio de presión.....	282
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....</b>	<b>289</b>
6.1	Conclusiones.....	291
6.2	Desarrollos Futuros .....	295
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>299</b>
	<b>PUBLICACIONES VINCULADAS .....</b>	<b>311</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>317</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Epidemias documentadas en Canadá y Estados Unidos	64
Tabla 1.2	Parámetros en exceso en la Provincia de Alicante (2005-2007)	67
Tabla 1.3	Parámetros en exceso en la Provincia de Castellón (2005-2007)	68
Tabla 1.4	Parámetros en exceso en la Provincia de Valencia (2005-2007)	69
Tabla 2.1	Bacterias presentes en agua superficial en el entorno urbano	89
Tabla 2.2	Volumen de agua no registrada en la distribución	90
Tabla 3.1	Clasificación de las fugas	130
Tabla 3.2	Datos de los fallos circulares	132
Tabla 3.3	Ancho de fallo para una longitud de 50,3mm	133
Tabla 3.4	Longitud de los cortes con anchos teóricos (mm)	133
Tabla 3.5	Datos de los fallos longitudinales y transversales	134
Tabla 3.6	Procedimiento del modelo de intrusión análogo al de fugas	136
Tabla 3.7	Síntesis de los escenarios para fallos circulares	137
Tabla 3.8	Síntesis de los escenarios para fallos alargados	137
Tabla 3.9	Características de los fallos y Número de Reynolds	143
Tabla 3.10	$C_{di}$ equivalente de los fallos longitudinales y transversales	143
Tabla 3.11	Variación del área respecto al $C_{di}$ ajustado	144
Tabla 3.12	Granulometría mayoritaria del medio poroso	145
Tabla 3.13	Ensayos de intrusión en estado permanente	158
Tabla 3.14	Características del agua para el modelo numérico	159
Tabla 3.15	Características de las mallas en el modelo permanente	162
Tabla 3.16	Coefficientes del modelo <i>Realizable k-ε two-layer</i>	164
Tabla 3.17	Tensores de porosidad	168
Tabla 3.18	Resultados de los escenarios del fallo circular de 4mm	170
Tabla 3.19	Resultados de Eficiencia N-S para FC 4mm	172
Tabla 3.20	Resultados de los escenarios del fallo circular de 1mm	174
Tabla 3.21	Resultados de Eficiencia N-S para FC 1mm	174
Tabla 3.22	Resultados de los escenarios del fallo transversal de 48mm - calculado	176
Tabla 3.23	Resultados de Eficiencia N-S para FT 48mm - calculado	177
Tabla 3.24	Resultados de los escenarios del fallo longitudinal de 44mm	179
Tabla 3.25	Resultados de Eficiencia N-S para FL 44mm	180
Tabla 3.26	Resultados de los escenarios del fallo circular de 1mm en medio poroso	182
Tabla 3.27	Resultados de Eficiencia N-S para FC 1mm - poroso	183
Tabla 4.1	Condiciones iniciales en los escenarios de intrusión	205

Tabla 4.2	Descripción de las características físicas del ensayo 2mm-----	218
Tabla 4.3	Descripción de las características físicas del ensayo 4mm-----	218
Tabla 4.4	Datos de la instalación física para la simulación del modelo numérico -----	218
Tabla 4.5	Condiciones iniciales en el modelo CFD para los escenarios de 2 y 4mm-----	227
Tabla 4.6	Condiciones temporales en el modelo CFD no permanente -----	229
Tabla 4.7	Resultados de Eficiencia N-S para el caudal en el fallo de 2mm-----	234
Tabla 4.8	Resultados de Eficiencia N-S para los volúmenes con el fallo de 2mm -----	237
Tabla 4.9	Volúmenes de intrusión final en los escenarios de 2mm -----	238
Tabla 4.10	Contaminación durante transitorios del fallo circular de 2mm-----	238
Tabla 4.11	Resultados de Eficiencia N-S para el caudal en el fallo de 4mm -----	244
Tabla 4.12	Resultados de Eficiencia N-S para los volúmenes con el fallo de 4mm -----	246
Tabla 4.13	Volúmenes acumulados en los escenarios de 4mm -----	247
Tabla 4.14	Contaminación durante transitorios del fallo circular de 4mm-----	247
Tabla 5.1	Características del medio poroso -----	263
Tabla 5.2	Escenario de transitorios con medio poroso exterior-----	264
Tabla 5.3	Contaminación durante servicio intermitente con fallo de 1mm -----	267
Tabla 5.4	Contaminación durante servicio intermitente con fallo de 4mm -----	270
Tabla 5.5	Reducción del caudal de intrusión con material poroso -----	271
Tabla 5.6	Escenario de transitorios con medio poroso exterior-----	272
Tabla 5.7	Volumen acumulado medio para los escenarios E2-13,5mca -----	273
Tabla 5.8	Contaminación durante transitorio del fallo de 2mm con suelos-----	273
Tabla 5.9	Volumen acumulado medio para los escenarios E4-15,0mca -----	275
Tabla 5.10	Contaminación durante transitorio del fallo de 4mm con suelos -----	276
Tabla 5.11	Condiciones de contorno para la bifurcación en permanente -----	280
Tabla 5.12	Valor del trazador en las salidas -----	281
Tabla 5.13	Condiciones de contorno para la Bifurcación en transitorio -----	283

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 El abastecimiento en su conjunto de operaciones -----	41
Figura 1.2 Adversidades de la calidad del agua en la distribución-----	49
Figura 1.3 Evolución de la reacción del cloro -----	53
Figura 1.4 Los trihalometanos en relación con la cloración -----	54
Figura 1.5 Casos de enfermedades por consumo de agua contaminada -----	61
Figura 1.6 Deficiencias en el abastecimiento que han originado epidemias-----	62
Figura 1.7 Imagen tomada del SINAC-----	66
Figura 2.1 Esquema de un modelo de intrusión-----	79
Figura 2.2 Condiciones de entrada de los patógenos a través de fallos-----	85
Figura 2.3 Colector principal (Izquierda) y sifón en conducción de agua (derecha)-----	87
Figura 2.4 Agua superficial como fuente contaminante -----	88
Figura 2.5 Siembra de organismos patógenos de agua superficial -----	88
Figura 2.6 La presencia de fugas en las redes-----	92
Figura 2.7 Registro de transitorios de presión por diversas causas -----	93
Figura 2.8 Comercialización de las tuberías según su material-----	95
Figura 2.9 Tipos de materiales para la conducción de agua en Estados Unidos -----	96
Figura 2.10 Mecanismos que generan fallos en tuberías enterradas-----	97
Figura 2.11 Corrosión e incrustación en tuberías-----	98
Figura 2.12 Fallos en tubería de hierro -----	100
Figura 2.13 Fallos en tuberías de matriz de cemento-----	102
Figura 2.14 Tipos de fallos en tuberías -----	105
Figura 3.1 Fugas en tuberías de redes de agua-----	114
Figura 3.2 Influencia del material de la tubería con el exponente $N$ -----	117
Figura 3.3 Influencia del tipo de fallo con el exponente $N$ -----	118
Figura 3.4 Descripción del modelo Venturi para intrusión -----	121
Figura 3.5 Modelo físico de la intrusión a través de un tubo de Venturi-----	122
Figura 3.6 Volumen de control del modelo Venturi-----	123
Figura 3.7 Ajuste de la velocidad en el modelo Venturi-----	123
Figura 3.8 Ajuste de la presión en el modelo Venturi-----	124
Figura 3.9 Esquema de la intrusión en estado permanente-----	125
Figura 3.10 Diseño del modelo físico de la intrusión en estado permanente-----	126
Figura 3.11 Modelo físico de intrusión permanente-----	127
Figura 3.12 Detalles del modelo físico de intrusión permanente-----	128

Figura 3.13	Modelo experimental del dispositivo de intrusión-----	129
Figura 3.14	Rango de caudales para los fallos circulares a ensayar -----	131
Figura 3.15	Fallos longitudinales y transversales -----	135
Figura 3.16	Relación potencial para caudales de intrusión en fallos-----	138
Figura 3.17	Exponentes de modelos de intrusión y de fuga-----	139
Figura 3.18	Valores de exponentes resultantes del modelo de intrusión -----	140
Figura 3.19	Coeficiente de descarga de los fallos circulares -----	142
Figura 3.20	Relación potencial con el modelo del medio poroso-----	146
Figura 3.21	Metodología para el modelado con CFD -----	157
Figura 3.22	Geometría del volumen de control (cotas en metros)-----	159
Figura 3.23	Fronteras del volumen de control (fallo circular 4mm)-----	160
Figura 3.24	Discretización del volumen de control-----	163
Figura 3.25	Gráfica del balance de masa-----	165
Figura 3.26	Gráfica de los residuos de las variables en el CFD-----	165
Figura 3.27	Ajuste del caudal en el modelo CFD para el orificio circular de 4mm -----	170
Figura 3.28	Transporte de la intrusión con el fallo circular de 4mm -----	172
Figura 3.29	Ajuste del caudal en el modelo CFD para el orificio circular de 1mm -----	173
Figura 3.30	Transporte de la intrusión con el fallo circular de 1mm -----	175
Figura 3.31	Ajuste del caudal en el modelo CFD para el fallo transversal de 48mm -----	176
Figura 3.32	Transporte de la intrusión con el fallo transversal de 48mm-----	177
Figura 3.33	Ajuste del caudal en el modelo CFD para el fallo longitudinal de 44mm-----	179
Figura 3.34	Transporte de la intrusión con el fallo longitudinal de 44mm -----	180
Figura 3.35	Caudal de intrusión respecto al Caudal total en la conducción-----	181
Figura 3.36	Resultados CFD para el fallo circular de 1mm con medio poroso-----	182
Figura 3.37	Transporte de la intrusión con el fallo de 1mm con medio poroso-----	183
Figura 4.1	Prototipo de la intrusión durante un transitorio-----	201
Figura 4.2	Instalación de transitorios de presión de CEHIDRO -----	202
Figura 4.3	Esquema del modelo físico -----	203
Figura 4.4	Condiciones del modelo experimental -----	204
Figura 4.5	Verificación de los caudales medidos con vertedor -----	206
Figura 4.6	Escenario 2-1, H0 15mca. Fallo 2mm -----	207
Figura 4.7	Escenario 2-2, H0 13,5mca. Fallo 2mm-----	208
Figura 4.8	Escenario 2-3, H0 9,5mca. Fallo 2mm-----	208
Figura 4.9	Escenarios de transitorios de presión con fallo de 2mm-----	209
Figura 4.10	Escenario 4-1, H0 15mca. Fallo 4mm-----	210
Figura 4.11	Escenario 4-2, H0 13mca. Fallo 4mm-----	211
Figura 4.12	Escenario 4-3, H0 9mca. Fallo 4mm -----	211

Figura 4.13 Escenarios experimentales con fallo de 4mm de diámetro-----	212
Figura 4.14 Escenarios de transitorios con una carga inicial de 15mca con y sin fallo-----	213
Figura 4.15 Escenarios de transitorios con carga inicial próxima a 9mca, con y sin fallo -----	214
Figura 4.16 Instantes del evento de intrusión durante el transitorio-----	215
Figura 4.17 Imágenes a partir del video de alta definición -----	216
Figura 4.18 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 15,3mca-----	219
Figura 4.19 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 13,5mca-----	220
Figura 4.20 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 9,5mca -----	220
Figura 4.21 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 15,0mca-----	221
Figura 4.22 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 13,1mca-----	222
Figura 4.23 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 9,2mca -----	222
Figura 4.24 Dimensiones del volumen de control para el fallo circular de 2mm-----	224
Figura 4.25 Dimensiones del volumen de control para el fallo circular de 4mm-----	224
Figura 4.26 Fronteras del volumen de control para los escenarios en transitorio-----	225
Figura 4.27 Malla para los escenarios del fallo circular de 4mm-----	226
Figura 4.28 Escenarios de velocidad y presión en estacionario (fallo circular 2mm) -----	227
Figura 4.29 Escenarios de velocidad y presión en estacionario (fallo circular 4mm) -----	228
Figura 4.30 Verificación de la estabilidad de la presión durante la simulación-----	230
Figura 4.31 Verificación del balance de masa durante la simulación -----	230
Figura 4.32 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 15,3mca-----	232
Figura 4.33 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 13,5mca-----	233
Figura 4.34 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 9,5mca -----	233
Figura 4.35 Diferencia de columnas en una oscilación de presión -----	235
Figura 4.36 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 15,3mca -----	235
Figura 4.37 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 13,5mca -----	236
Figura 4.38 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 9,5mca -----	237
Figura 4.39 Trazador durante el transitorio de 15,3mca (2mm) -----	239
Figura 4.40 Trazador durante el transitorio de 13,5mca (2mm) -----	240
Figura 4.41 Trazador durante el transitorio de 9,5mca (2mm)-----	241
Figura 4.42 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 15,0mca-----	242
Figura 4.43 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 13,1mca-----	243
Figura 4.44 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 9,2mca -----	243
Figura 4.45 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 15,0mca -----	245
Figura 4.46 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 13,1mca -----	245
Figura 4.47 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 9,2mca -----	246
Figura 4.48 Trazador durante el transitorio de 15,0 (4mm)-----	248
Figura 4.49 Trazador durante el transitorio de 13,1 (4mm)-----	249

Figura 4.50 Trazador durante el transitorio de 9,2 (4mm) -----	250
Figura 5.1 Caudal de intrusión para un fallo circular de 1mm con material poroso-----	264
Figura 5.2 Caudal de intrusión para un fallo circular de 1mm con material poroso-----	265
Figura 5.3 Trazador en el fallo de 1mm con el exterior con y sin suelo -----	266
Figura 5.4 Caudal de intrusión para un fallo circular de 4mm con material poroso-----	268
Figura 5.5 Trazador en el fallo de 4mm con el exterior con y sin suelo -----	269
Figura 5.6 Trazador en el fallo de 4mm con el exterior con y sin suelo -----	270
Figura 5.7 Volúmenes a través del fallo de 2mm durante transitorios con suelos -----	272
Figura 5.8 Trazador para el transitorio de 13,5 (FC2mm con suelos) -----	274
Figura 5.9 Volúmenes a través del fallo de 4mm durante transitorios con suelos -----	275
Figura 5.10 Trazador para el transitorio de 15,0 (FC4mm con suelos) -----	277
Figura 5.11 Volumen de control para una bifurcación -----	278
Figura 5.12 Malla y condiciones de frontera en la bifurcación -----	279
Figura 5.13 Trazador para el evento permanente con salidas 75 y 25% -----	281
Figura 5.14 Transitorio a simular en la bifurcación -----	282
Figura 5.15 Trazador durante el transitorio en la bifurcación -----	283
Figura 5.16 Volúmenes a través del fallo durante el transitorio en la bifurcación -----	284
Figura 5.17 Trazador en las fronteras de salida -----	285

## SIMBOLOGÍA

Símbolo	Parámetro	Dimensiones
$A$	Área	[L <sup>2</sup> ]
$A_{ER}$	Coeficiente 1 en la relación de Ergun	*
$B_{ER}$	Coeficiente 2 en la relación de Ergun	*
$c$	Celeridad de propagación de onda	[L·T <sup>-1</sup> ]
$C_d$	Coeficiente de descarga	*
$C_{di}$	Coeficiente en intrusión	*
$C_i$	Valor calculado	*
$C_v$	Coeficiente de descarga del vertedor	*
$C^+$	Recta característica positiva	*
$C^-$	Recta característica negativa	*
$C_\mu$	Coeficiente del modelo $k-\varepsilon$	*
$C_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 2} C_{\varepsilon 3}$	Coeficientes del modelo <i>Realizable</i> $k-\varepsilon$	*
$C_1 C_2$	Constantes del modelo $k-\varepsilon$	*
$D$	Diámetro interior de la tubería	[L]
$d_{eq}$	Diámetro equivalente	[L]
$D_{eq}$	Diámetro equivalente de la partícula del medio poroso	[L]
$D_{eqi}$	Diámetro equivalente del volumen $V_i$ en un medio heterogéneo	[L]
$\bar{D}_v$	Diámetro de una esfera a partir del volumen medio de las partículas reales	[L]
$\bar{D}_{vs}$	Diámetro de la esfera media	[L]
$e$	Espesor de la pared de la tubería	[L]
$E$	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	*
$E_p$	Módulo de Young	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$F$	Fuerzas exteriores definidas sobre el volumen de control	*
$F_P$	Medio poroso	[M·L <sup>-2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$F_{xi}^{ext}$	Fuente de masa externa	[M·L <sup>-2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$g$	Aceleración de la gravedad	[L·T <sup>-2</sup> ]
$G_b$	Producción de energía debida a la flotación	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-3</sup> ]
$G_k$	Producción turbulenta	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-3</sup> ]
$GradP$	Gradiente de presión a través del medio poroso	[M·L <sup>-2</sup> ]
$h$	Carga adimensional	*
$h_0$	Carga adimensional en el tiempo $\tau_0$	*
$h_v$	Carga sobre el vertedor	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$H$	Carga piezométrica	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$H_A$	Presión en un tiempo anterior y un espacio posterior a $i$	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]

$H_B$	Presión en un instante y espacio anterior a $i$	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$H_{IC}$	Presión de vapor del líquido	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$H_{max}$	Máximo incremento de la presión	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$H_p$	Presión en el instante y espacio $i$	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$I$	Pérdida de carga	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$I^+$	Pérdida por fricción para la recta característica positiva	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$I^-$	Pérdida por fricción para la recta característica negativa	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$J$	Pérdida de carga a lo largo de la tubería	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$k$	Constante según el material de la tubería	*
$k$	Energía cinética turbulenta	$[L^2 \cdot T^{-2}]$
$k_v$	Factor de corrección de la carga en el vertedor	[L]
$K$	Módulo del fluido	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$K_{elas}$	Coefficiente de decaimiento para los efectos elásticos	*
$K_{ij}$	Coefficiente de viscosidad efectiva	*
$KH$	Coefficiente de reducción de carga	*
$KQ$	Coefficiente de reducción de caudal	*
$K_{VISC}$	Coefficiente de decaimiento para el plástico	*
$L$	Longitud de la tubería	[L]
$L_T$	Longitud de mezcla	[L]
$N$	Exponente en la relación potencial del flujo en orificios	*
$O_i$	Valor observado	*
$\bar{O}_i$	Media de los valores observados	*
$p$	Presión	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$-P$	Tensor de resistencia porosa	$[M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}]$
$P_{atm}$	Presión atmosférica	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$P_i$	Tensor de resistencia inercial	$[M \cdot L^{-4}]$
$P_m$	Perímetro mojado	[L]
$P_v$	Tensor de resistencia lineal debida a la viscosidad	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$Q$	Caudal	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$q$	Caudal relativo	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_A$	Caudal en un instante anterior y espacio posterior a $i$	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_B$	Caudal en un instante y espacio anterior a $i$	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_L$	Caudal hacia la izquierda de la cavitación	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_P$	Caudal en el instante $i$	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_R$	Caudal hacia la derecha de la cavitación	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$Q_v$	Caudal en el vertedor	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$q_L$	Caudal de fuga	$[L^3 \cdot T^{-1}]$
$S$	Tensor de tensiones	$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$
$S_m$	Posible fuente de masa contenida en el volumen de control	*
$s_p$	Superficie de la partícula	$[L^2]$

---

$t$	Tiempo	[T]
$u_i$	Componente unidimensional de la velocidad	[L·T <sup>-1</sup> ]
$u_i'$	Componente de fluctuación de la velocidad	[L·T <sup>-1</sup> ]
$U_T$	Escala de velocidad	*
$\bar{U}_i$	Velocidad media	
$\dot{u}$	Velocidad estructural	[L·T <sup>-1</sup> ]
$v$	Velocidad	[L·T <sup>-1</sup> ]
$V_0$	Velocidad perpendicular a la sección del medio poroso	[L·T <sup>-1</sup> ]
$V_i$	Fracción de volumen del medio poroso heterogéneo	*
$v_p$	Volumen de la partícula	[L <sup>3</sup> ]
$\mathcal{V}_{i,j}$	Volumen de vapor por cavitación	[L <sup>3</sup> ]
$W$	Tensor de rotación	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$x$	Distancia a lo largo del eje de la tubería	[L]
$Y_M$	Disipación por dilatación	
$\Delta H$	Variación en la carga	[L]
$\Delta H_J$	Pulso de Joukowsky	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$\Delta Q$	Variación en el flujo	[L <sup>3</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
$\Delta h_0$	Pérdida de carga relativa	*
$\Delta t$	Variación en el tiempo	[T]
$\Delta x$	Variación en el eje $x$	[L]
$\alpha$	Parámetro en función del medio poroso	*
$\beta$	Parámetro en función del medio poroso	*
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker	*
$\varepsilon$	Disipación de energía turbulenta	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-3</sup> ]
$\varepsilon$	Fracción de vacío (porosidad)	*
$\theta$	Ángulo del vertedor	°C
$K$	Constante de Von-Karman	*
$\mu$	Viscosidad molecular	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
$\mu t$	Viscosidad turbulenta	[L <sup>2</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	*
$\rho$	Densidad	[M·L <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Tensor normal	[M·L <sup>-1</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$\sigma$	Número molecular de Schmidt	*
$\sigma_t$	Número turbulento de Schmidt	*
$\sigma_\kappa$	Constante del modelo $k-\varepsilon$	*
$\sigma_\varepsilon$	Constante del modelo $k-\varepsilon$	*
$\tau$	Tiempo para la carga adimensional $h$	*
$\tau_0$	Tiempo para la carga adimensional $h_0$	*
$\bar{\tau}$	Tensor de tensiones	*
$\phi_s$	Esfericidad	*

---



# **CAPÍTULO 1**



# **1 DISTRIBUCIÓN Y CALIDAD DEL AGUA EN EL ABASTECIMIENTO**

En este capítulo se describen los elementos que conforman una red de abastecimiento, así como la implicación de cada uno de ellos dentro del conjunto del sistema. Se identifican aquellos que son determinantes para la calidad del agua como producto final del abastecimiento.

Se hace una descripción del recorrido del agua desde la fuente, así como su paso por el tratamiento y durante su transporte hasta los consumidores. En la entrega a los consumidores se debe garantizar el buen servicio en cantidad y en calidad del agua. En la gestión del agua se tiene considerada la pérdida de caudal a través de fugas; para los gestores esta situación les permite establecer un rendimiento de la red. Vinculado a este rendimiento la calidad del agua presenta una relación intrínseca. Si se tiene un rendimiento cercano al óptimo, la garantía de mantener una buena calidad del agua es mayor.



## 1.1 Sistemas de Abastecimiento de Agua

El objetivo de los sistemas de abastecimiento es el de suministrar el agua en cantidad requerida y con la calidad óptima para que sea aprovechada por los consumidores; así como realizar la gestión de la evacuación de las aguas residuales, entre otros.

Los parámetros que determinan la calidad del agua deben cumplir los rangos establecidos por las instituciones implicadas para garantizar la potabilización del producto final. Además, como lo describía Geldreich en 1996, el agua tiene que ser aceptable en términos de olor, sabor y apariencia.

El abastecimiento requiere de la disposición de elementos que permitan la captación, el tratamiento, transporte, almacenamiento y distribución del agua desde las fuentes hasta los puntos de consumo (Figura 1.1). Los elementos que forman parte del abastecimiento se describen a continuación.

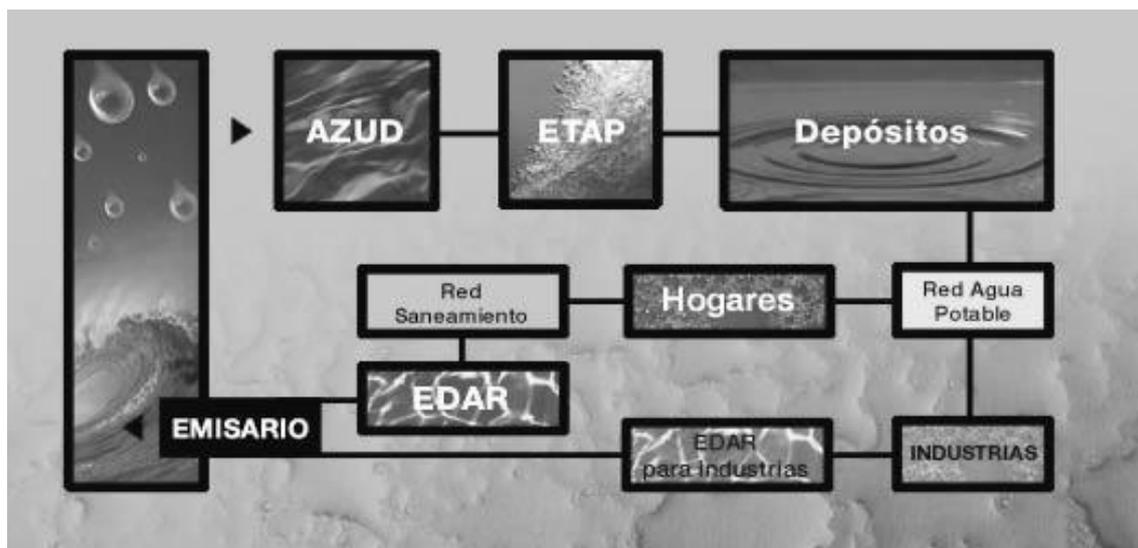


Figura 1.1 El abastecimiento en su conjunto de operaciones

### **1.1.1 Elementos del sistema de abastecimiento**

Debido al amplio proceso que se presenta en el abastecimiento de agua, las instalaciones se pueden clasificar en dos etapas principales: la producción y la distribución (Fuertes *et al.*, 2002). En la etapa de producción se consideran las instalaciones de captación de agua, plantas de tratamiento, depósitos de regulación y sistemas de bombeo, además de las aducciones que conectan a éstos elementos. Mientras que en la etapa de distribución se encuentran las instalaciones de aducción desde depósitos o estaciones de bombeo de agua tratada, red arterial o primaria de abastecimiento, red (secundaria) de distribución, depósitos dentro de la red y estaciones de bombeo.

Dentro de la producción, La calidad del agua varía según el tipo de captación y el proceso establecido en la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP). Dependiendo de las características físico-químicas y biológicas en las que se encuentre el agua en estado natural, quedará determinado el tipo de tratamiento que se llevará a cabo en la ETAP. Por ello, la ETAP se considera como la instalación fundamental en lo que se refiere a la calidad del agua. Las condiciones óptimas de desinfección también serán adquiridas en esta etapa.

La impulsión del agua por medio del bombeo es determinante para los sistemas de abastecimiento. Las presiones de servicio varían según el accesorio o tramo. Las condiciones de presión no deben ser muy variables en el tiempo con respecto a su nivel adecuado. Dependiendo de la función de cada elemento se presentan condiciones diferentes de presión (Ferrer y Aguado 2007).

Los valores de presión mínima varían según las recomendaciones de los organismos correspondientes de tipo municipal o equivalentes. Por ejemplo, una presión mínima en acometida puede ser de 15mca sobre la altura a

abastecer. Como límite superior se recomiendan que no se exceda la presión máxima de 40mca (Ferrer y Aguado, 2007). Dichas presiones máximas se soportan sobre todo en horarios nocturnos cuando el caudal en la red es el mínimo. Además de las sobrepresiones que se puedan producir en eventos de golpe de ariete.

Especial énfasis se tiene a las líneas de conducción debido a que a través de los fallos de estos elementos se genera el problema de intrusión patógena al que se refiere en la presente disertación.

### **1.1.2 Líneas de conducción**

Las tuberías constituyen los elementos principales de una red de distribución, estas varían dependiendo de la función dentro del abastecimiento y su ubicación (Fuertes *et al.*, 2002). Las conducciones son de rigidez variable, generalmente se instalan enterradas y van acompañadas por otro tipo de accesorios y juntas (Ferrer y Aguado, 2007).

Las aducciones son las líneas de conducción que llevan el agua desde las fuentes de abastecimiento a la ETAP, al depósito de regulación o estación de bombeo, estas líneas también llevan el agua hasta la red y sus depósitos.

Conectadas a las aducciones en la red se tienen las líneas principales o arterias, las cuales son las de mayor diámetro y alimentan a las líneas secundarias. Por lo general no se tienen acometidas en estas líneas. Las líneas secundarias son las que llevan el agua de las arterias a las tuberías de distribución y en ellas se hacen tomas a consumidores importantes.

En las líneas de distribución están la mayoría de las acometidas. Éstas son el conjunto de tuberías, válvulas y accesorios que conectan la red pública con la instalación interior de los edificios (Fuertes *et al.*, 2002). Dependiendo del tamaño de la red la clasificación puede llegar a reducirse a tuberías de distribución y acometidas.

Los materiales más utilizados son el polietileno (PE), el policloruro de vinilo (PVC), el fibrocemento, el hormigón, el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), el hierro fundido dúctil, y el acero. Desde la década de los noventas, en las nuevas urbanizaciones ya se mencionaba el uso de tuberías de plástico flexible (Gray, 1994). Aunque en muchos casos la incorporación de nuevos materiales en una red se ve obstaculizada por la tradición en el uso de algunos materiales y la forma de trabajarlos (Fuertes *et al.*, 2002).

El hierro fundido dúctil o fundición dúctil es uno de los materiales más utilizados, sustituyó a la fundición gris, aunque aún quedan muchos kilómetros de este tipo de tubería. La fundición dúctil presenta buena resistencia mecánica en instalaciones enterradas y su revestimiento le ofrece resistencia a la corrosión, el revestimiento interior debe ser adecuado para el uso en agua de consumo. Este tipo de tubería puede presentar dilatación hasta del 10%, no es frágil pero si flexible por lo que su manejo es sencillo y tiene cierta resistencia a movimientos del terreno (Ferrer y Aguado, 2007).

Así como la fundición dúctil presenta buenas propiedades mecánicas, el acero presenta características similares, se usa en grandes diámetros o en conducciones sobre la superficie. Existen diversos tipos de conducciones de acero, destacando la tubería en base de chapa soldada longitudinalmente y la tubería con soldadura helicoidal. En cualquier caso, requieren de un tratamiento

(ej. galvanizado) para hacerlas aptas como conducciones de agua potable (Fuertes *et al.*, 2002).

En cambio, Los materiales plásticos tienen la ventaja de ser resistentes a la corrosión, presentan una rugosidad menor y con ello se impide la incrustación. El PVC presenta buenas propiedades mecánicas, es un material termoplástico por lo que puede ser fácilmente manipulado, es inodoro, insípido, no tóxico y químicamente inerte. Hay tres tipos de PVC. El PVC Rígido (PVC-U), se usa en bajas presiones, aun siendo rígido, su elasticidad permite absorber efectos de golpe de ariete (Ferrer y Aguado, 2007). El PVC Orientado (PVC-O) ofrece mejores características mecánicas, menor espesor de pared para una misma presión nominal y grado de deformación elástica, por lo que se usa para presiones de trabajo altas en diámetros pequeños. Y el PVC Clorado (PVC-C) presenta mayor cantidad de cloro y con ello mejores propiedades (Iglesias *et al.*, 2006), como mayor resistencia a la temperatura.

En cuanto al Polietileno (PE), si el proceso de fabricación es a elevadas presiones se genera el polietileno de baja densidad (LDPE) y si el proceso es a menor presión y temperatura se obtiene el polietileno de alta densidad (HDPE). Es un material inerte, inodoro, insípido, inoxidable, inalterable a la acción de terrenos corrosivos, resistente, bajo factor de fricción, no admite incrustaciones, aislante térmico (para temperaturas de 0°C se dilata y recupera su dimensión al descongelarse el líquido), bajo módulo de elasticidad (atenúa transitorios hidráulicos) y es insoluble en agua (no aumenta de peso al trasegar agua). A pesar de su elevado coeficiente de dilatación térmica, su flexibilidad permite absorber dilataciones produciendo serpenteo (Iglesias *et al.*, 2006).

El PE se empleaba exclusivamente en acometidas, hoy en día forma parte de redes de distribución e incluso de conducciones principales. Se usa en

terrenos tortuosos, con poca resistencia y profundidad, donde las condiciones no son muy adecuadas para soportar instalaciones hidráulicas (Ferrer y Aguado, 2007).

El PRFV es menos conocido aunque su uso tenga más de 30 años. Es un material relativamente reciente, se caracteriza por su elevada resistencia, poco peso y fácil instalación. Se debe aplicar a sistemas de distribución a temperaturas inferiores a 35°C.

Las tuberías de hormigón se pueden clasificar en tres tipos. Las tuberías con camisa de chapa, son las que más se usan sobre todo en diámetros grandes. Las tuberías reforzadas con alma de acero, se usan cuando se requieren soportar altas presiones y las tuberías de armadura para presiones bajas. Finalmente, las tuberías de fibrocemento prácticamente están en desuso y están siendo desplazadas por tuberías de otros materiales. Aún así, existen muchos kilómetros de red instalados de este material.

La selección del tipo de tubería dependerá del costo, presión de trabajo, condiciones climáticas, propiedades del suelo y técnicas de instalación. Todos los materiales tienen sus ventajas e inconvenientes y la elección de cada uno de ellos depende además del transporte, montaje, resistencia a cargas internas y externas, protección requerida, tipo de terreno, características del agua a transportar, envejecimiento, mantenimiento y tiempo de vida.

### **1.1.3 Consumo de agua en la distribución**

Para obtener el caudal de abastecimiento hay que considerar diversos elementos en base a las características de la población. Entre otros, la dotación y número de habitantes, crecimiento de la población, tipo de desarrollo urbano,

actividad económica (industrial, comercial, turismo), condiciones climáticas. Además de factores como consumo punta y el caudal para incendios (Ferrer y Aguado, 2007). Por ejemplo, la red debe estar diseñada para que se tengan funcionando dos hidrantes de forma simultánea durante un tiempo determinado, con caudal y presión especificados. Finalmente se tienen que considerar el rendimiento volumétrico del sistema de abastecimiento, el cual variará con el tiempo.

La variabilidad de los caudales en la producción es prácticamente nula comparada con la variación de los caudales que se consumen durante un período de tiempo en la distribución, es por ello que se deben tomar en cuenta instalaciones que regulen esta diferencia, manteniendo los niveles requeridos de caudal y presión en la red; entre los elementos de regulación se tienen los depósitos, equipos de bombeo y válvulas. En el caso de los depósitos, se pueden tener en cabecera, de compensación y de cola. La regulación por bombeo es directa a la red. Mediante las válvulas se hace gestión de regulación.

Se deben considerar dos volúmenes de reserva, uno frente a averías y otro para incendios. Con respecto al primero, se estima en las condiciones más desfavorables, en hora punta de consumo y se considera el tiempo para localizar la avería, vaciar la conducción, hacer la reparación, el llenado y la desinfección. Estimar este volumen es complejo por lo que se puede considerar un volumen de consumo de un día medio.

Una limitación del volumen de reserva en instalaciones después de la desinfección, es el tiempo de residencia del agua. En condiciones favorables, hasta 48 horas es el tiempo efectivo del cloro (Ferrer y Aguado, 2007).

Teniendo en cuenta estas consideraciones y el buen funcionamiento de las ETAP, así como de las estaciones de cloración en la distribución, debe ser suficiente para garantizar la buena calidad del agua que se entrega como producto final a los consumidores.

## **1.2 Calidad del Agua en el Abastecimiento**

El aspecto de la calidad del agua está relacionado con todos los elementos que conforman el abastecimiento. Desde la captación, en base a la fuente de abastecimiento (según la mineralización y carga microbiana) dependerá el tratamiento del agua, la complejidad de la potabilización y el nivel de calidad que se pueda alcanzar (Ferrer y Aguado, 2007). Además de ello, el agua de consumo debe contar con requisitos específicos para declararla potable.

Posterior al tratamiento, la calidad del agua se verá influenciada por las condiciones en las que se encuentren los elementos de transporte, almacenamiento y distribución, aún con ello se deben mantener las condiciones idóneas para su consumo. En la distribución se instalan estaciones de cloración, las cuales se encargan de preservar la desinfección en zonas donde el contenido de cloro sea insuficiente para mantener el nivel adecuado.

Es por ello que los niveles de calidad del agua potable dependen de dos aspectos principales: la calidad del agua a la salida de la ETAP, con los parámetros controlados (López *et al.*, 2006) y a diversas condiciones durante la distribución que hacen variar esta calidad a lo largo del trayecto hasta el punto de consumo (Figura 1.2).

La calidad del agua de consumo depende de la integridad de la red de distribución. Mantener los niveles adecuados de calidad se vuelve una tarea primordial, debido al impacto que conlleva para la salud de los consumidores. El consumo de agua contaminada se ve reflejado en los casos que son reportados por enfermedades epidémicas; no obstante en la mayoría de los casos no se tiene conocimiento del origen de la contaminación del agua, el evento que la genera y sobre todo la entrada del contaminante. Es por ello la importancia de esta línea de investigación, y las aportaciones que se dan para generar más conocimiento en este tipo de eventos.

## Contaminación del agua desde la fuente hasta el grifo

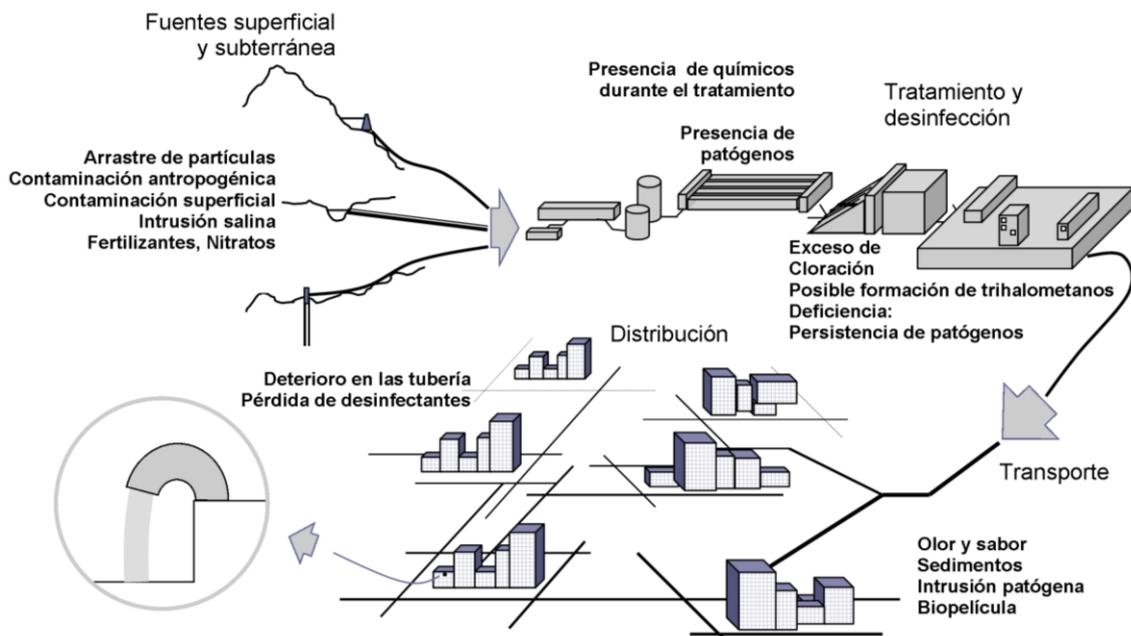


Figura 1.2 Adversidades de la calidad del agua en la distribución

Las condiciones de calidad del agua en las redes de abastecimiento, por ejemplo para La Comunidad Europea están determinadas en principio por la Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998. Se especifica que el objetivo es proteger la salud de las personas, estableciendo los requisitos para el agua potable. Vigilando que el agua no contenga ningún tipo de micro-

organismo, parásito o sustancia que pueda suponer un peligro para la salud humana y además, cumpla los requisitos mínimos (parámetros microbiológicos, químicos y los relativos a la radiactividad).

Los parámetros así como sus valores permisibles se basan principalmente en las recomendaciones de La Organización Mundial de la Salud (OMS) y en las condiciones preventivas que establezcan para preservar un nivel de protección de la salud pública. La calidad del agua será verificada en las zonas de consumo, los programas de control dependerán de cada abastecimiento. El objetivo es satisfacer la entrega de agua segura al consumidor, se requiere de una vigilancia para evitar cualquier intrusión de contaminación en la red y la degradación del agua.

La buena calidad del agua se cumple habitualmente, a pesar de que se presentan escenarios complejos con una serie de elementos que introducen vulnerabilidad para la preservación de la calidad del agua (Geldreich, 1996). A partir de que el agua es enviada desde la planta de tratamiento hacia la red de distribución, ésta debe cumplir con los requisitos que se ponen de manifiesto por las normas estipuladas.

### **1.2.1 La desinfección**

La desinfección en la planta de tratamiento es la barrera final contra la contaminación microbiana en el agua potable. Los desinfectantes son principalmente usados para asegurarse de la destrucción de los organismos patógenos que puedan estar presentes en aguas superficiales o en fuentes desprotegidas de agua subterránea (Geldreich, 1996). Los desinfectantes comunes son el cloro libre, cloraminas, ozono, dióxido clorhídrico y luz ultravioleta (Propato *et al.*,

2004). Se asume que después de una desinfección primaria, el cloro residual mantiene inactivos a los patógenos que pueden entrar en los sistemas de distribución de agua potable y previene de enfermedades por consumo de agua contaminada.

La desinfección es importante, desde el punto de vista higiénico y estético. Su primer objetivo es evitar la transmisión de enfermedades y además evitar el desarrollo de algas microscópicas que enturbian el agua (AEAAS, 1984). Un diseño efectivo en la ETAP para eliminar patógenos consta de filtración rápida y lenta sobre arena, seguida de cloración o tratamiento de precloración, además de coagulación, sedimentación, filtración rápida sobre arena y poscloración. El tratamiento de desinfección para la eliminación de microorganismos que son provenientes del agua bruta puede ser eficiente hasta en un 99,9% (Gray, 1994); siempre habrá riesgo de tener patógenos residuales.

La efectividad de la desinfección y la resistencia del microorganismo dependen de la concentración del desinfectante y del tiempo de contacto, pero además está influenciada por factores ambientales como la temperatura, pH, material orgánico, demanda de desinfectantes y rangos de mezcla de desinfección (Geldreich, 1996). Muchos agentes químicos y físicos han sido estudiados con respecto a su potencial como desinfectante de agua potable. El cloro continúa siendo el desinfectante dominante en el uso del tratamiento de abastecimiento de agua.

En base a la eficiencia en la desinfección se presentan alternativas al cloro libre; entre otros, el ozono, el dióxido de cloro y las cloraminas, pero el dominio del primero se ha relacionado principalmente con su disponibilidad, el costo, además de su fácil medición y manejo. La efectividad de los desinfectantes está basada en la inactividad de los Coliformes. El ozono es el desinfectante

más eficiente, seguido del dióxido de cloro y a continuación el ácido hipocloroso, los menos eficientes son el ion hipoclorito y las cloraminas. Por su parte, los organismos patógenos presentan un orden de resistencia a los desinfectantes, los menos resistentes son los Coliformes, seguido de los virus y los más resistentes son los quistes de protozoos. Se ha estimado que se requiere de 3 a 100 veces más cloro para inactivar un virus entéricos que lo que se necesita para matar una bacteria Coliforme, en las mismas condiciones ambientales (Geldreich, 1996).

La desinfección no actúa de manera constante en una red de distribución, por un lado la actividad del desinfectante puede variar debido al estado en el que se presenten los microorganismos, la cohesión del mismo, la mezcla con otros sólidos como sedimentos, material disuelto, etc. La asociación de los microorganismos con cierto tipo de partículas puede generar una protección contra la acción del desinfectante. Para contrarrestar esta protección, se establece un límite de turbidez en el tratamiento del agua.

La cloración es con mucho el desinfectante más efectivo para las bacterias y los virus porque el efecto residual de desinfección puede durar todo el viaje del agua a través de la red de distribución y es suficiente para limitar la extensión de epidemias (Gray, 1994). El cloro es un agente químico muy activo, por lo que su efecto se lleva a cabo en un proceso por el cual se identifican diferentes etapas antes de provocar la desinfección, este conjunto de reacciones se clasifica según la curva de demanda del cloro (Figura 1.3), adaptada de La Asociación Española de Abastecimientos de Agua (AEAAS, 1984).

Cuando el cloro entra en contacto con el agua, se genera reacción con compuestos reductores, éstos pueden ser sustancias disueltas o suspendidas.

Los compuestos con los que actúa el cloro son el ácido sulfhídrico, el manganeso, el hierro y los nitritos.

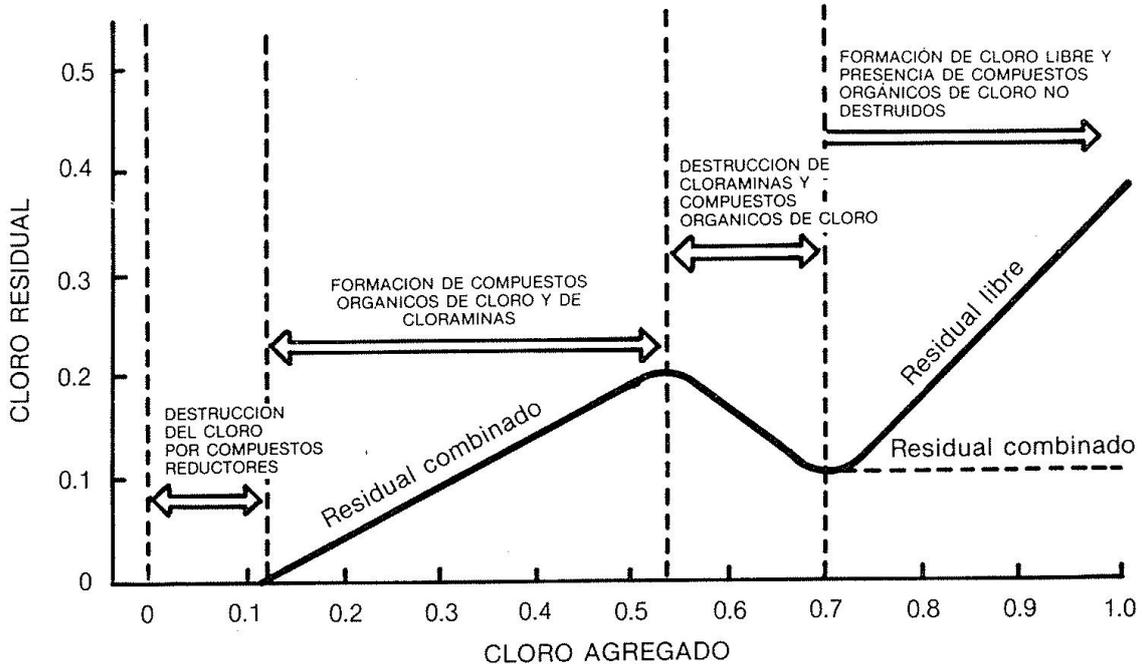


Figura 1.3 Evolución de la reacción del cloro

El cloro adicional comienza a reaccionar con materia orgánica, a partir de la cual se producen compuestos orgánicos de cloro, estos compuestos prácticamente no tienen la capacidad de desinfectar y generan un olor y sabor característico.

El cloro que se sigue agregando reacciona con las sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoníaco. Finalmente el cloro que se añade quedará como cloro residual libre disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo.

En la curva de demanda del cloro se presenta un punto que se conoce como "punto crítico" (breakpoint), el cual es la dosis de cloro correspondiente al mínimo de la curva, en el que se ha consumido todo el cloro necesario para eliminar el amoníaco y se han destruido parcialmente las cloraminas que

podrían haberse formado. Una vez alcanzado este punto, todos los compuestos nitrogenados han sido destruidos y por lo tanto, cualquier adición posterior de cloro produce un incremento en el nivel de cloro libre del agua (AEAAS, 1984).

Las limitaciones de la cloración aparecen cuando se presentan microorganismos resistentes (ej. la legionela), por lo que se debe llegar a un equilibrio entre la adición de cloro para la desinfección y la presencia de cloro residual en exceso. La interacción del cloro con materia orgánica (Figura 1.4) forma trihalometanos compuestos simples de un carbono que contiene halógenos considerados como posibles cancerígenos. Por ello, se debe mantener la cantidad de cloro residual dentro de unos límites. La presencia de cloro residual en elevadas cantidades puede suponer un problema de calidad adicional (López *et al.*, 2006).

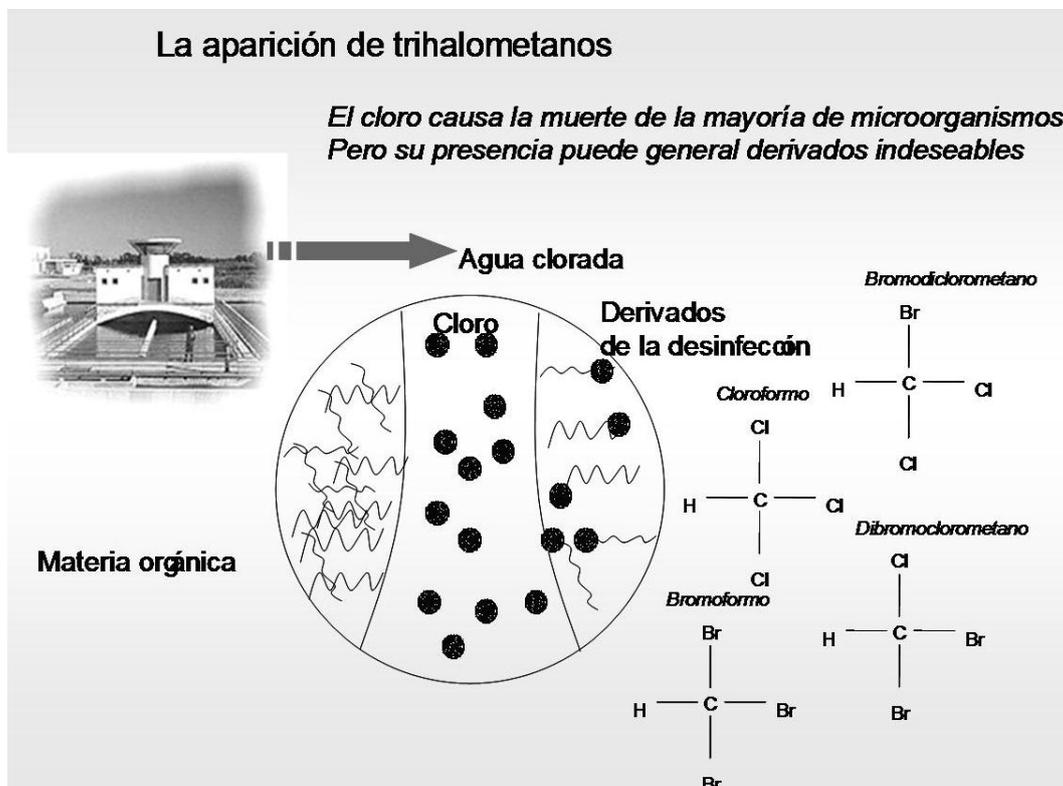


Figura 1.4 Los trihalometanos en relación con la cloración

Como se ha mencionado existen otras formas de desinfección, entre ellas se presentan desinfectantes primarios como el ozono, el dióxido de cloro y las cloraminas. Otro tipo de desinfectantes como el yodo, variaciones de bromo, permanganato potásico, peróxido de hidrógeno, plata, luz ultravioleta, radiación-ionización, pH elevado, temperaturas elevadas en desalinización y algunas combinaciones entre estos oxidantes (ozono con radiación UV, peróxido de hidrógeno con radiación UV, y peróxido de hidrógeno catalizado ozonizado) han sido investigados para la reducción de sustancias orgánicas en el agua pudiendo tener una aplicación benéfica en la desinfección. Sin embargo, algunos factores como riesgo de toxicidad, costo excesivo para su instalación y operación, etc. han limitado su uso en el tratamiento de abastecimiento público.

### **1.2.2 Vigilancia de la calidad del agua**

Los niveles de calidad del agua que circula por la red de abastecimiento dependen de niveles controlados con la que sale de la ETAP y de las condiciones en las que se encuentre la instalación hasta los puntos de consumo, así como del tiempo que dura el agua dentro de la red (López *et al.*, 2006). Ciertos problemas pueden aparecer en la calidad del agua dentro de la red. La afectación puede ocurrir en el seno del agua dentro de la tubería o en la pared de la misma (Clark *et al.*, 1998). Con respecto al estado de las tuberías se puede presentar corrosión, biopelícula y deposición de sustancias transportadas en la pared. Con respecto a la fase líquida, la degradación del agua puede deberse a conexiones con redes no potables y fallos en la aplicación del tratamiento, causando entradas de contaminantes al suministro y su posterior transporte en el fluido.

Los tratamientos convencionales no pueden garantizar la seguridad del agua potable suministrada todo el tiempo. Cabe la posibilidad de que se produzcan enfermedades de origen patógeno debido al consumo de agua contaminada (Propato *et al.*, 2004). Un segundo desinfectante puede tener efecto perjudicial en la formación de subproductos, por lo que la concentración del desinfectante debe ser controlada y adecuadamente gestionada. Es por ello que se cuenta con sistemas de vigilancia.

La OMS define en 1976 que la vigilancia se considera como la evaluación continua de la salud pública, revisión de la seguridad y aceptabilidad del agua suministrada (Rojas, 2005). La vigilancia de la calidad del agua en el caso de España está incluida en El Real Decreto (RD) 140/2003 de 7 de febrero. Establece que el control de la calidad se hará en los abastecimientos para cada uno de los parámetros fijados. Cuando la autoridad sanitaria lo disponga se controlarán aquellos parámetros o contaminantes que se sospeche puedan estar presentes en el agua y supongan un riesgo para la salud. El control de la calidad del agua engloba los siguientes apartados: Autocontrol del agua, vigilancia sanitaria y control del agua en el grifo del consumidor.

En cualquier tipo de control, el agua podrá identificarse como apta o no apta para el consumo, dependiendo de si supone o no un riesgo para la salud. En el caso de que la muestra de agua se considere apta para el consumo, se está garantizando que no se presentan microorganismos, parásitos y sustancias en cantidades o concentraciones elevadas o en su defecto que no se identifican en lo absoluto determinados parámetros. Los rangos que determinan la aptitud del agua para su consumo son establecidos por las autoridades sanitarias y en ellos se especifican los valores paramétricos de microbiología, indicadores de calidad,

químicos y radiactivos. Cuando el agua no se considera apta para el consumo, se refiere a que no cumple con alguno de los requisitos antes mencionados.

El autocontrol lo realiza el gestor del abastecimiento a través de laboratorios adecuados para los análisis. Los puntos de muestreo deben ser representativos de la calidad del agua de todo el sistema, desde la ETAP o desde los depósitos hasta el último tramo donde se entrega el agua. Los análisis que deben llevarse a cabo en el autocontrol son: examen organoléptico, análisis de control y análisis completo.

En el análisis de control, además de la información organoléptica que se obtiene, se analiza la eficacia del tratamiento de potabilización. Mientras que en el análisis completo se analizan todos los demás parámetros especificados en el RD 140/2003 y los que determinen oportunos la autoridad sanitaria para garantizar la salud de la población. Ante cualquier tipo de riesgo, la autoridad sanitaria podrá solicitar al gestor muestreos complementarios que crea necesarios para salvaguardar la salud de la población. La vigilancia sanitaria del agua de consumo dependerá de la autoridad, y será la encargada de realizar inspecciones periódicas en el abastecimiento, además podrá realizar análisis en cualquier momento y lugar que sea necesario para mantener una vigilancia óptima.

El control en el grifo del consumidor lo realiza el municipio u otra entidad de ámbito local. Los parámetros mínimos a controlar son: olor, sabor, color, turbidez, conductividad, pH, amonio, bacterias Coliformes y Escherichia Coli (E. Coli). Dependiendo del material de la instalación interior se podrán analizar parámetros como cobre, cromo, níquel, hierro, plomo u otro. Según el tipo de tratamiento en la potabilización se podrán analizar parámetros como el cloro libre residual y/o cloro combinado residual.

Otra de las maneras en las que se puede implementar la vigilancia de los sistemas de abastecimiento está relacionada a eventos extraordinarios. En el caso de que se presenten riesgos o problemas de salud pública, como es el caso epidemias, donde una de las posibles fuentes pueda ser el agua de consumo, se podría poner en marcha un sistema de vigilancia extraordinario. En este sentido la vigilancia se realiza para localizar e identificar lo antes posible el origen del evento adverso y con ello implementar medidas para minimizar la epidemia con la mayor antelación posible.

Los sistemas de vigilancia deben tener un efecto a largo plazo para identificar los patrones de las epidemias y determinar factores de riesgo a fin de que se puedan aplicar medidas de control (Hunter *et al.*, 2003). Se debe medir el impacto de las intervenciones, evaluando la prevención y los programas de control, para obtener conclusiones y realizar consideraciones futuras.

El muestreo general es el adecuado para la identificación de microorganismos patógenos, considera la mayoría de los casos de contaminación que han ocurrido en los suministros de agua. Se realiza con microorganismos indicadores con los que se determina la probabilidad de la contaminación por heces (Gray, 1994). Estos organismos indicadores deben ser de detección e identificación práctica, deben estar presentes en mayor número y tener el mismo origen que los patógenos, aún sin serlo.

Los indicadores de contaminación fecal son organismos presentes en el intestino de los seres vivos y se excretan igual que los patógenos, los más usados son las bacterias Coliformes, estreptococos fecales y los clostridios sulfato reductores (usados más en superficies de agua). Estos tres grupos son capaces de sobrevivir durante diferentes períodos de tiempo en el medio acuático. Los estreptococos fecales mueren relativamente rápido fuera del

individuo, por lo que su presencia es un indicador de una contaminación reciente. De los Coliformes fecales, E. Coli es uno de los más usados para identificar presencia fecal, ya que en condiciones ideales puede sobrevivir durante varias semanas y es de fácil detección. En un medio templado y en aguas enriquecidas E. Coli es capaz de llevar una reproducción acelerada, por lo que en algunos casos se debe tener cuidado en la interpretación de resultados. Los clostridios sulfato reductores pueden tener una presencia indefinida en el agua, si son detectados sin la presencia de E. Coli y estreptococos fecales, la contaminación se considera intermitente o remota.

### **1.2.3 Enfermedades debidas al consumo de agua**

El principal problema de la deficiencia en la calidad del agua es que genera problemas de salud, dando lugar a brotes de enfermedades causadas por su consumo. Una vez que los patógenos se encuentran dentro del sistema de distribución, pueden llegar a sobrevivir y ser transportados por el flujo del agua o mantenerse en las paredes de las tuberías. La biopelícula presenta un ambiente apropiado para que la bacteria sobreviva y genere su reproducción. La relación entre la degradación biológica y los estudios epidemiológicos es compleja, pero considerando una serie de factores puede llegar a identificarse (Propato *et al.*, 2004).

Los patógenos biológicos se transmiten por vía fecal oral, principalmente se debe a la contaminación del agua de manera directa e indirecta, por ejemplo, el contacto con aguas residuales, desechos de animales, etc. Se consideran tres grupos principales de microorganismos que se transmiten a través del agua de consumo: protozoos, virus y bacterias.

Los protozoos que han sido registrado con mayor frecuencia en eventos epidemiológicos son *Cryptosporidium* y *Giardia lamblia*. El primer caso registrado de infección humana ocurrió en 1976. La primera epidemia documentada originada por el agua fue en 1985 debido a la contaminación de un pozo por aguas residuales (Gray, 1994).

Entre los virus que se transmiten a través del agua son: Hepatitis infecciosa, Enterovirus, Retrovirus y Adenovirus. Las epidemias de Hepatitis A generalmente suceden con un patrón cíclico en una determinada región, una vez infectada la población, esta se hace inmune para posteriores infecciones del virus (Gray, 1994), por tanto no se producen nuevos casos hasta dentro de cinco o diez años cuando hay una nueva generación que no ha sido previamente expuesta (normalmente niños). El virus de la Hepatitis A representa el 87% de las enfermedades virales transmitidas por el agua en Estados Unidos (Craun, 1996).

Los patógenos que más se identifican en el suministro de agua son las bacterias y presentan el mayor número de registros de epidemias. Al igual que los protozoos y los virus, las bacterias normalmente están relacionadas con la contaminación fecal del agua. La bacteria *Campylobacter* es la principal causa de diarrea en Europa (Gray, 1994), siendo más común que la *Salmonella*. Mientras que en Estados Unidos la bacteria que provoca más problemas es la *Shigella*. Normalmente el origen de la contaminación del agua por bacterias es debida al agua residual.

En el caso de la población española la *Legionella* ha tenido mayor impacto en tiempos recientes. Desde 1980 se ha registrado un total de 48 brotes de legionelosis, que han afectado a 789 personas, al margen de los 1.358 casos esporádicos desde 1997; Murcia, Alcalá, Alcoy, Granada, Barcelona y Vigo han

sido las ciudades donde se han registrado las epidemias (López *et al.*, 2006). En fechas posteriores, entre 1997 y 2006, en los datos de vigilancia epidemiológica (ISCI, 2009) se presentan las tasas de incidencia por cada 100.000 habitantes. Durante este periodo, en el año 2002 se presentó el mayor número de casos declarados (1.461 casos) con lo que se obtuvo la mayor tasa de incidencia (3,54). A partir de ese año, la tasa de incidencia se ha mantenido en 3,0 por cada 100.000 habitantes hasta 2006.

En Estados Unidos, en el período de 1920 a 2002 se reportaron 883.806 casos debido al consumo de agua contaminada (Figura 1.5; adaptada de Craun *et al.*, 2006).

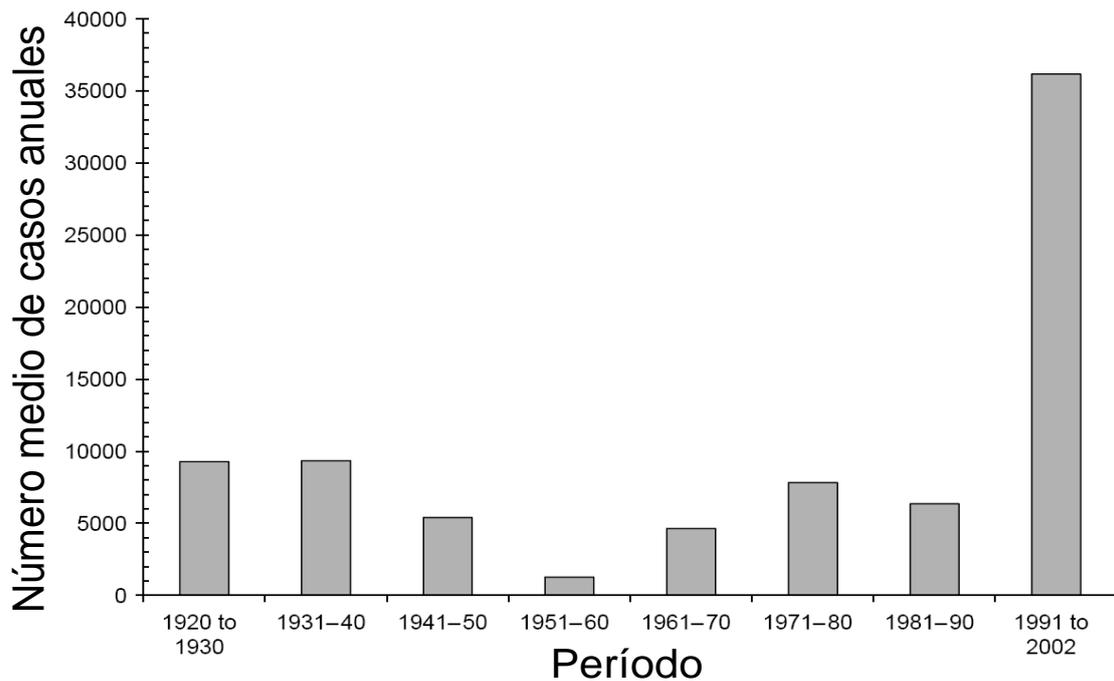


Figura 1.5 Casos de enfermedades por consumo de agua contaminada

De 1951 a 1960 fue el período donde se registraron menos casos. Por el contrario, entre 1991 a 2002 se registraron 36.162 casos. Durante finales del siglo XIX y principios del siglo XX, cólera y tifoidea eran las causas frecuentes de las epidemias debidas al consumo de agua. Durante el período de 1920 a 1941

se reportaron 87.675 casos de tifoidea, no obstante, solo 108 casos ocurrieron de 1961 a 1970. La Hepatitis A (22%) y Shigella (16%) fueron los dos agentes etiológicos más frecuentes identificados en los años sesentas. De 1971 a 1990 los agentes etiológicos más frecuentes que se identificaron fueron la Giardia (18%) y varios productos químicos que causaban enfermedades agudas (10%). Durante el período de 1991 a 2002, Giardia (16%) y los contaminantes químicos (12%) continuaron siendo importantes, pero los brotes también fueron causados por otros patógeno incluyendo Cryptosporidium (7%), Norovirus (6%), E. Coli (5%), Campylobacter (3%) y Legionela (3%). La Legionela solo se ha registrado desde 2001, presentado 6 de 11 brotes asociados a la contaminación del agua potable durante ese año (Craun *et al.*, 2006).

La evolución de las deficiencias que han provocado las epidemias muestra que en el tratamiento se presenta una disminución como origen de la contaminación, en cambio la deficiencia en la distribución muestra un aumento a lo largo del tiempo (Figura 1.6; adaptada de Craun *et al.*, 2006).

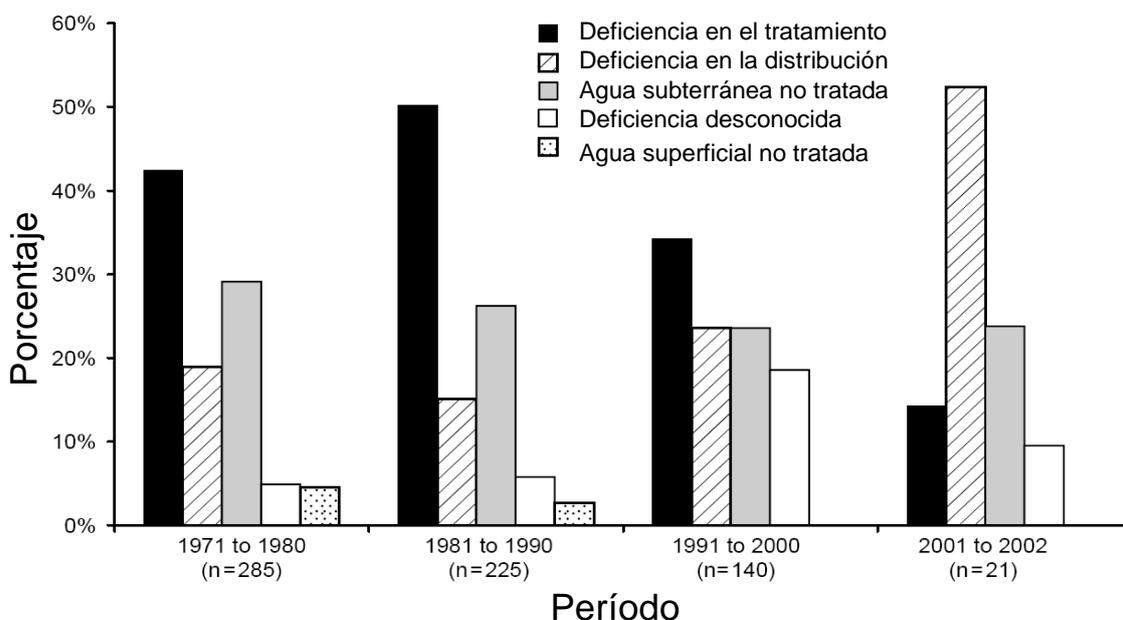


Figura 1.6 Deficiencias en el abastecimiento que han originado epidemias

De 1981 a 1998 los centros de prevención "*Centers for Disease Control and Prevention*" (CDCP) documentaron 57 epidemias debidas al consumo de agua relacionadas con conexiones de instalaciones no potables resultando en 9.734 casos (USEPA, 2002). Lo anterior incluye 20 brotes (6.333 casos) causados por contaminación microbiológica, 15 brotes (679 casos) causados por contaminación química, y 22 brotes (2.722 casos) en los cuales el contaminante no se reportó. Durante el período de 1971 a 1998 el 30% de las epidemias fueron causadas por contaminación en las instalaciones de la distribución y el 51% debido a conexiones con instalaciones no potables (eventos de retorno desde instalaciones conectadas a la red de suministro).

Aunque la documentación de los impactos a la salud más a menudo involucra desordenes gastrointestinales agudos, el desarrollo lento de las infecciones como aquella que causa la *Micobacterium Avium* podrían no ser identificado (Pedley *et al.*, 2004). Es complejo asociar las enfermedades debidas a la contaminación del agua a través de la transmisión de microorganismos. Las epidemias son esporádicas o sólo se presentan algunos casos. A partir de estos eventos esporádicos se deben tomar en cuenta todas las posibles fuentes, muchas veces los esquemas disponibles no son suficientemente discriminatorios para tener la certeza de aislar el ambiente, identificarlo y relacionarlo con los casos afectados.

En las redes de distribución de agua en ocasiones se reporta la presencia de contaminantes como los que se describen en la Tabla 1.1 (Hrudey *et al.*, 2004 y 2006). Se presenta un resumen de accidentes considerables y que han sido relacionados con la fuente de contaminación. No obstante, en la mayoría de las veces, los casos reportados en la bibliografía no presentan una relación directa con la fuente contaminante, no se tiene la información complementaria del

estado de conservación de la red, así como los defectos y reparaciones de la misma. Cuando se detecta un contaminante, el origen puede ser atribuido a un evento en la distribución o puede ser consecuencia de un problema en la producción, hecho menos común pero no imposible. En países en desarrollo, en ocasiones la calidad del suministro se encuentra menos garantizada; se producen interrupciones en el mismo, además de que la presencia de aljibes con aguas no tratadas o tomas y puntos de unión fraudulentas, el problema se produce con mayor intensidad, aunque no esté claramente identificado y reportado.

Tabla 1.1 Epidemias documentadas en Canadá y Estados Unidos

Patógeno	Fecha y Lugar	Fuente y Tratamiento	Factores del fallo	Consecuencias para la salud	Observaciones reportadas
Viral	02/1983 Alberta, Ca.	Río - Filtración granular Cloración	Contaminante proveniente de saneamiento. Falta de coagulación en el tratamiento	1326 casos (c) confirmados de gastroenteritis  3000 c. estimados 2 muertes	Gestión impropia de estación de bombeo residual. Tratamiento sin coagulación impropia
Escherichia Coli	1989-90 Missouri, EE.UU.	Acuífero profundo - Ninguno	Intrusión en red por exceso de averías debidas al frío extremo	243 c. confirmados 32 hospitalizados 4 muertes	Alta incidencia por heladas. Riesgo asociado con reparaciones. Poco mantenimiento en saneamiento
Cryptosporidium Parvum	03/1993 Wisconsin, EE.UU.	Lago - Cloración KMnO4 Coagulación F granular Cloraminación	Entrada de agua de saneamiento en lago y/o red. No se reconoció la presencia del patógeno	285 c. confirmados 4400 hospitalizados  50 muertes asociadas en los 2 años siguientes	Riesgo asociado con entrada de agua de saneamiento. Fallo en reconocimiento bacteriano en la red. Fallo en declaración de quejas de usuarios

Salmonella typhimurium	11/1993 Missouri, EE.UU.	Acuífero profundo - Ninguno	Contaminación fecal en depósitos procedentes de aves	31 c. confirmados 650 c. estimados 15 hospitalizados 7 muertes	Riesgo de contaminación en depósitos y fallo en desinfección intermedia
Esterichia Coli Campylobacter	09/1999 Washington Nueva York EE.UU.	Acuífero somero - Ninguno	Pozo cercano a fosa séptica. Contaminación por flujo subterráneo	161 c. confirmados 5000 c. estimados 2 muertes	No se consideró la presencia de la fosas. Agua sin tratar. Continuos defectos en la red por sequía en años previos
Esterichia Coli Campylobacter	05/2000 Ontario, Ca.	Acuífero somero - Cloración	Tratamiento limitado para el tipo de contaminantes del agua	163 c. de E Coli 105 c. de Campylobacter 2300 c. estimados 7 muertes	Falta de monitoreo del cloro residual. Trabajadores sin formación adecuada. Fallos de operación durante inundaciones

En el caso de España, se ha centralizado la información sobre el control de la calidad del agua que se tiene en los abastecimientos en base a la normativa vigente del artículo 30 del RD 140/2003, en que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, El Ministerio de Sanidad y Consumo Español ha desarrollado una aplicación informática: Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo (SINAC) que se basa en la información de los gestores y laboratorios encargados de realizar la vigilancia de la calidad del agua. El objetivo de la aplicación es disponer de un sistema informatizado para identificar la calidad de las aguas de consumo a nivel nacional, el estado de la infraestructura de los sistemas de abastecimiento desde la captación hasta la distribución final.

De esta forma, el análisis pormenorizado de la información que proporciona SINAC confirma que sí se ha detectado presencia microbiológica en la red. Hay que señalar que representa una proporción de las mediciones ínfima, lo cual indica que es un hecho inusual pero no inexistente. En la Figura 1.7 se muestra el esquema de la información de libre acceso al ciudadano que proporciona SINAC sobre los análisis de calidad del agua pormenorizados en los abastecimientos, en ella se muestra la descripción de contenido de bacterias Coliformes en una red de distribución.

**► Zona(s) de Abastecimiento**  
 Localidad  Zona(s) de Abastecimiento

**► Origen del Agua / Tratamiento aplicado**  
 Origen del Agua  Tratamiento   
 Pozo entubado [Tipo de Tratamiento no definido]

**► Calidad del Agua**  
 Pulse  para visualizar los últimos boletines de análisis de red de distribución.

---

**Información de un Abastecimiento**

**► Calidad del Agua** (Últimos 9 boletines de análisis de red de distribución realizados)

Fecha	Tipo Análisis	Resultados	Más Información
26/11/2007	Análisis de control	No apta para el consumo	
24/09/2007	Análisis de control	Apta para el consumo	
27/08/2007	Análisis de control	Apta para el consumo	
23/07/2007	Análisis de control	Apta para el consumo	
28/05/2007	Análisis de control	No apta para el consumo	
26/03/2007	Análisis de control	Apta para el consumo	
26/03/2007	Análisis de control	Apta para el consumo	
26/02/2007	Análisis completo	No apta para el consumo	
23/01/2007	Análisis de control	No apta para el consumo	

**► Calidad del Agua** (Más información del boletín de análisis seleccionado)

Zona Abastecimiento	<input type="text"/>
Red de Distribución	RED DE DISTRIBUCIÓN DE <input type="text"/>
Gestor de la Red de Distribución	<input type="text"/>
Fecha Toma	26/11/2007
Ubicación Punto de Muestreo	<input type="text"/>
Tipo Análisis	Análisis de control
	No apta para el consumo
Parámetros afectados	► Bacterias coliformes
Motivo(s) del resultado	<input type="text"/>
Comunicado de la Admón. Sanitaria	<input type="text"/>

Figura 1.7 Imagen tomada del SINAC

En la figura anterior se observa un reporte de concentración inaceptable de bacterias Coliformes en la red de distribución de agua, en este caso la determinación de la calidad del agua se reporta como agua no apta para el consumo. La información concreta sobre el abastecimiento y la compañía suministradora ha sido ocultada de forma deliberada. En los resultados presentados por el SINAC se especifica el tipo de análisis realizado, el cual puede ser análisis completo, análisis de control o análisis de control complementario; se presenta el resultado, con el que se califica la muestra del agua de consumo. En el caso de que algún parámetro sobrepase los valores de la legislación, se indicará el parámetro afectado que sobrepasa el valor del RD 140/2003. Pudiendo especificarse el motivo del resultado por el cual se ha presentado el incumplimiento (información facilitada por el gestor) y en caso de ser necesario, se dará algún tipo de mensaje sanitario por la situación de incumplimiento, emitido el comunicado por la autoridad sanitaria autonómica.

En el período de 2005 a 2007 se han realizado consultas en SINAC para verificar la calidad del agua en la red en la Comunidad Valenciana. Se muestran los reportes en los casos donde se presentan parámetros microbiológicos en exceso para cada una de las Provincias de la Comunidad: Alicante, Castellón y Valencia.

En la Provincia de Alicante se han excedido parámetros indicadores, en siete ocasiones se ha reportado recuento de colonias a 22°C y en tres ocasiones las bacterias Coliformes (Tabla 1.2). En ningún caso se repite ni la localidad, ni el municipio con respecto a los parámetros reportados.

Tabla 1.2 Parámetros en exceso en la Provincia de Alicante (2005-2007)

<b>Fecha</b>	<b>Parámetro en exceso</b>
17/07/2005	Recuento de colonias a 22°C
17/07/2005	Bacterias Coliformes

28/07/2005	Recuento de colonias a 22°C
entre 04/01/2006 y 03/05/2007	Recuento de colonias a 22°C
18/04/2006	Recuento de colonias a 22°C
03/08/2006	Recuento de colonias a 22°C
07/11/2006	Bacterias Coliformes
01/03/2007	Recuento de colonias a 22°C
11/04/2007	Bacterias Coliformes
14/08/2007	Recuento de colonias a 22°C

Para los abastecimientos de la Provincia de Castellón, se reportaron cinco registros con parámetros microbiológicos en exceso. En cuatro ocasiones el parámetro en exceso fue E. Coli y en una vez Enterococo. De los parámetros indicadores se reportaron diez casos en exceso, nueve de bacterias Coliformes y uno de recuento de colonias a 22°C (Tabla 1.3). En una localidad se reportó un parámetro en exceso en dos fechas diferentes, mientras que en tres localidades se reportaron parámetros indicadores y microbiológicos en un mismo análisis.

Tabla 1.3 Parámetros en exceso en la Provincia de Castellón (2005-2007)

<b>Fecha</b>	<b>Parámetro en exceso</b>
10/01/2006	Escherichia Coli
entre 12/04/2006 y 14/06/2006	Bacterias Coliformes
entre 12/04/2006 y 08/11/2006	Bacterias Coliformes
26/07/2006	Bacterias Coliformes
26/07/2006	Escherichia Coli
13/09/2006	Bacterias Coliformes
14/09/2006	Bacterias Coliformes
14/09/2006	Escherichia Coli
31/10/2006	Bacterias Coliformes
04/11/2006	Recuento de colonias a 22°C
04/11/2006	Enterococo
08/11/2006	Escherichia Coli
10/11/2006	Bacterias Coliformes
04/01/2007	Bacterias Coliformes
04/05/2007	Bacterias Coliformes

En la Provincia de Valencia, se reportaron 36 registros (Tabla 1.4). De los parámetros microbiológicos se reportaron en tres ocasiones E. Coli y dos de Enterococo, mientras que de parámetros indicadores se reportaron 25 de

bacterias Coliformes en exceso y seis de recuento de colonias a 22°C. En cuatro localidades se reportó en la misma fecha tanto parámetros microbiológico como indicadores. En algunas localidades se presentaron parámetros en exceso en diferentes fechas de muestreo.

Tabla 1.4 Parámetros en exceso en la Provincia de Valencia (2005-2007)

<b>Fecha</b>	<b>Parámetro en exceso</b>
06/04/2005	Bacterias Coliformes
15/06/2005	Bacterias Coliformes
02/09/2005	Recuento de colonias a 22°C
07/09/2005	Recuento de colonias a 22°C
08/09/2005	Bacterias Coliformes
10/01/2006	Bacterias Coliformes
10/01/2006	Escherichia Coli
01/03/2006	Recuento de colonias a 22°C
15/03/2006	Bacterias Coliformes
15/03/2006	Bacterias Coliformes
19/06/2006	Bacterias Coliformes
02/08/2006	Recuento de colonias a 22°C
17/08/2006	Recuento de colonias a 22°C
12/09/2006	Bacterias Coliformes
14/09/2006	Bacterias Coliformes
26/09/2006	Bacterias Coliformes
04/10/2006	Bacterias Coliformes
06/11/2006	Recuento de colonias a 22°C
07/11/2006	Enterococo
07/11/2006	Bacterias Coliformes
14/11/2006	Bacterias Coliformes
21/11/2006	Bacterias Coliformes
21/11/2006	Enterococo
21/11/2006	Bacterias Coliformes
21/11/2006	Escherichia Coli
05/02/2007	Bacterias Coliformes
17/04/2007	Bacterias Coliformes
28/05/2007	Bacterias Coliformes
28/05/2007	Escherichia Coli
12/06/2007	Bacterias Coliformes
20/07/2007	Bacterias Coliformes
01/08/2007	Bacterias Coliformes
entre 25/08/2007 y 28/08/2007	Bacterias Coliformes
18/09/2007	Bacterias Coliformes
24/09/2007	Bacterias Coliformes
26/11/2007	Bacterias Coliformes

En estos casos, la autoridad sanitaria valora la calificación del agua como apta o no apta para el consumo humano en función del riesgo para la salud. Todos estos parámetros reportados tendrían que tener un valor de 0UFC (Unidades Formadoras de Colonias) en 100 ml, solo el indicador de recuento de colonias a 22°C puede tener como máximo 100UFC en 1ml desde la salida de la ETAP y sin cambios anómalos en la red de distribución.

El seguimiento de esta información fue realizada en un período de tiempo en el cual se buscó verificar si la problemática de la presencia de organismos patógenos se puede presentar en redes de abastecimiento, el período de búsqueda se realizó durante dos años en los cuales se comprobó la presencia de estos microorganismos.

Para los parámetros indicadores, dependiendo de la concentración medida, la autoridad sanitaria decide si el agua es apta o no para su consumo. En la mayoría de los casos donde se reportó bacterias Coliformes y recuento de colonias a 22°C, el resultado fue agua apta para el consumo con exceso en algún parámetro. No obstante para algunos casos de bacterias Coliformes y en el caso de los parámetros microbiológicos en exceso, el agua se consideró no apta para el consumo.

Los registros muestran que se pueden llegar a presentar patógenos en la red de abastecimiento y que una de las fuentes principales por las que se puede generar esta situación es en base a la intrusión patógena, de la cual, identificar el origen del contaminante es un tarea compleja.

La identificación de los parámetros microbiológicos se realiza mediante los procedimientos especificados en la normativa competente y en los protocolos de las empresas gestoras de los aspectos de calidad. Esta

identificación se realiza normalmente mediante siembra de muestras de agua en los medios adecuados y posterior conteo o detección de presencia en las mismas. De esta manera, la duración aproximada en la determinación de la presencia de microorganismos es de 48 horas, y mientras esto ocurre, el flujo en la red sigue siendo continuo, por tanto es un fenómeno que se constata a posteriori, de forma puntual y con orígenes diversos, entre los cuales se describen los siguientes:

- a) Podría ser un problema en la desinfección. Ello no implica deficiencias hidrodinámicas en la red, sino en el proceso de entrada del desinfectante en el tratamiento, o en el proceso de la mezcla o toma de muestras en ese momento. Esto es harto difícil porque las mediciones del desinfectante a la salida de las ETAP se realizan en continuo y en puntos en los que se considera mezcla completa o suficiente. A este respecto no se encuentran indicaciones en las redes de abastecimiento consultadas.
- b) Podría relacionarse con tomas de muestras en puntos donde el agua permanece un mayor tiempo de residencia debido a las características de la red. Las redes de distribución son habitualmente malladas, ello implica que el suministro a los puntos de consumo pueda provenir de diferentes direcciones. Esto es una ventaja desde el punto de vista de la fiabilidad, puede convertirse en un problema en ciertos momentos con tramos en los que el caudal de circulación quede reducido, lo que puede implicar un tiempo de residencia mayor al establecido. Puede ocurrir que en la toma de muestra para determinar la calidad, haya sido considerada agua con este tipo de procedencia, con tiempos de permanencia grandes o que se encontraba en fondos intermedios en los que por características de mezcla no completa, no se ha producido una desinfección adecuada.

- c) Podría relacionarse con el problema de contaminación en la distribución y que incluye este trabajo. Se constata que tanto en fugas deslocalizadas como en averías puntuales, puede entrar flujo desde el exterior de la red. El flujo externo puede entrar en condiciones no permanentes durante la operación de la misma o durante eventos permanentes, en los casos de suministro intermitente, cuando además se vuelve una práctica en la que la demanda se satisface bajo estas condiciones (Andey y Kelkar, 2009; Cabrera y Tzatchkov, 2010) comparada con un suministro permanente. Si cuando el contaminante entra, se realiza una toma de muestra antes de que los agentes desinfectantes hayan actuado, puede detectarse presencia de estos agentes patógenos que se encontraban en el flujo externo.

Este capítulo pone de manifiesto la importancia del conocimiento de los eventos de la intrusión patógena en las redes de distribución de agua, así como de la vulnerabilidad de los sistemas de abastecimiento en que se da la presencia de defectos aunado a este problema. La trascendencia del fenómeno hace que no se trate de un problema aislado sino un aspecto que requiere mayor conocimiento para el control de todos los niveles de riesgo en el abastecimiento, en la actualidad la tendencia de los trabajos de investigación se está desarrollando en dos aspectos. El primero es en la medición en tiempo real de aspectos que afectan a la calidad del agua (Miles *et al.*, 2010; Murray *et al.*, 2010; Whittle *et al.*, 2010) y el segundo es en el desarrollo de técnicas para la determinación de la vulnerabilidad global de la red (McInnis, 2004; Besner, *et al.*, 2010). Los capítulos siguientes se dedicarán a analizar las causas del proceso de la intrusión y la manera de representarlo tanto de forma experimental como numérica para el análisis del mismo.

## **CAPÍTULO 2**



## **2 INTRUSIÓN PATÓGENA A TRAVÉS DE FALLOS**

La intrusión patógena está relacionada en gran parte con la presencia de contaminantes en el agua de los consumidores. El agua que es bacteriológicamente pura cuando entra en el sistema de distribución puede irse deteriorando antes de alcanzar el punto de consumo. La intrusión patógena se ha clasificado dependiendo de la vía de entrada del contaminante y por ende se han identificado distintos grados de afectación.

En este trabajo, la intrusión se relaciona directamente con las fugas de agua en la red, no obstante no es la única causa que puede producir un evento de intrusión. Las fugas físicas se consideran un factor determinante en el rendimiento hidráulico de la propia red, es por ello el interés de trabajar en esta correlación.

Así como en condiciones normales de operación en los tramos donde existen fallos, se producen fugas. A través de estos mismos fallos, cuando las condiciones de presión son adversas respecto a su entorno en un medio saturado, se puede presentar entrada de flujo con posible transporte de contaminantes.



## 2.1 Antecedentes

La Comunidad Internacional por medio del grupo de trabajo en biotecnología para usos del agua y su conservación de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD, siglas en inglés) reconoció en 1996, la necesidad de lograr una mayor comprensión del papel que juega el agua en la transmisión de enfermedades infecciosas (Hunter *et al.*, 2003). Así, el problema de la intrusión patógena debe ser considerado como uno de los posibles factores de riesgo.

La Agencia Estadounidense “*Environmental Protection Agency*” (EPA) ha destinado importantes recursos al tema de la intrusión patógena a través del proyecto “*Microbial Risk in Drinking Water*” (*Science to Achieve Results, STAR program*). El agua potable constituye una de las áreas prioritarias para la EPA, mostrando como objetivo reducir al máximo los posibles riesgos para la salud pública.

En Estados Unidos los “*Centers for Disease Control and Prevention*” (CDCP) relacionan los casos de enfermedades gastrointestinales con la ingestión de agua supuestamente potable. Según la EPA son necesarios datos, estudios, metodologías y herramientas analíticas para conocer mejor el fenómeno, determinar las causas que lo provocan y poder así predecirlo y prevenirlo con antelación.

Existen algunas iniciativas de análisis de este problema a nivel internacional. En el proyecto “*Intrusión Patógena en los Sistemas de Distribución*” se han desarrollado dos paquetes informáticos *KYPIPE* y *SURGE*, el

primero para el análisis de redes en período extendido y el segundo para el análisis de transitorios.

En ese proyecto se tomaron muestras de suelos alrededor de las conducciones en diversas localidades de Estados Unidos con el objetivo de identificar agentes contaminantes, organismos patógenos e indicadores biológicos. Se buscaba considerar a los microorganismos como indicadores del estado de conservación de la instalación. Se estimó la posibilidad de la intrusión atribuible a las bajadas de presión durante eventos transitorios en las redes de distribución. Se detectaron organismos indicadores y virus en muestras de agua y suelo alrededor de las conducciones. Mientras que del análisis hidráulico, se determinó que los transitorios de presión ocurren frecuentemente, aunque en pocas ocasiones se presenta presión negativa, sugiriendo que la intrusión patógena puede ocurrir (Karim *et al.*, 2003). Por lo cual, se propone tener un mejor conocimiento de los peligros potenciales para los sistemas de distribución y tomar decisiones de gestión más adecuadas para minimizar los riesgos.

En 2004 (a y b), Boyd *et al.* presentan un modelo a escala de una instalación de agua (Figura 2.1) para simular el comportamiento de la intrusión mediante transitorios hidráulicos provocados por un cierre rápido de válvula o por un encendido o apagado incontrolado del equipo de bombeo. Se determinó el volumen introducido por dos distintos orificios circulares y con ello demostraron que en condiciones similares de presiones y flujos preferenciales en un sistema de distribución de agua, se podrían introducir agentes patógenos que se pueden encontrar en suelos y agua alrededor de la tubería durante periodos cortos de transitorios de presión; se compararon los resultados obtenidos de forma volumétrica respecto a cálculos teóricos, concluyendo que la aproximación de la intrusión puede estar subestimada en un 50%.

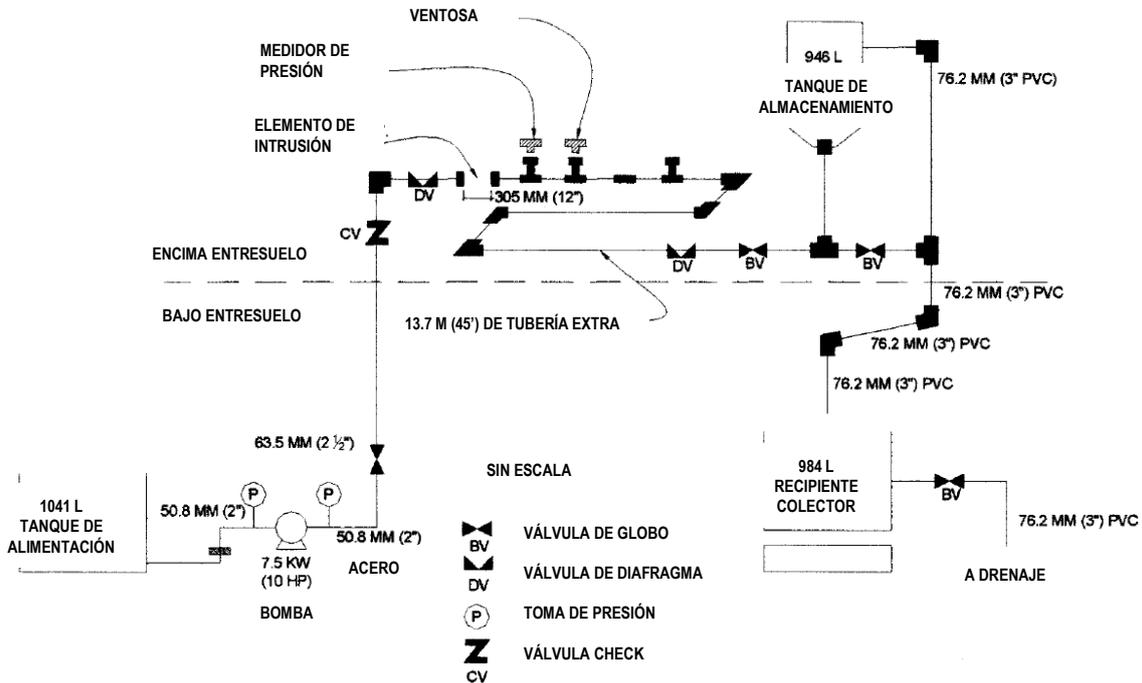


Figura 2.1 Esquema de un modelo de intrusión

El proyecto “*Distribution System Security Primer for Water Utilities; Project 2931*” de la Asociación “*American Water Works Association*” (AWWA) tuvo por objetivo hacer un análisis de fiabilidad de redes para determinar los puntos de vulnerabilidad de la misma. Con ello se formuló un manual de recomendaciones para reducir la vulnerabilidad de los elementos críticos del sistema. En ese sentido, Covas *et al.* (2001) centra su investigación en considerar el análisis inverso del transitorio hidráulico; a través de dicha metodología se pretendía localizar las fugas dentro de las redes de abastecimiento utilizando las presiones observadas durante transitorios hidráulicos y con ello minimizar las diferencias entre los parámetros calculados y observados.

En el proyecto “*Contamination during Distribution*” (Van Lieverloo *et al.*, 2006) desarrollado en el marco de los proyectos “*MicroRisk*” (evaluación del riesgo microbiológico: bases científicas para el manejo del agua potable desde la

fuente hasta el grifo), se proporciona un método para estimar la probabilidad de contaminación fecal del agua en la distribución. En el primer caso se analiza un evento de intrusión debido a una conexión con una instalación no potable. El evento sucedió en un conjunto habitacional, donde se colectó la información en la semana del incidente. Se realizó una estimación de los patógenos que pudieron haber sido ingeridos (por persona / litro de agua / día) durante la epidemia. Para ello se tomaron en cuenta los registros de los patógenos e indicadores en la fuente de suministro y después del tratamiento, considerando las fechas previas a la epidemia, así como los registros de períodos similares en años anteriores. Se obtuvo la relación entre los patógenos indicadores (*Cryptosporidium* y *Giardia* en el caso de parásitos protozoos; *Campylobacter* para las bacterias y el Enterovirus para los virus) y la bacteria de muestreo la *E. Coli*.

En un segundo análisis se hizo una evaluación tomando en cuenta un período de 10 años en el que se reportaron 50 eventos de contaminación del agua potable afectando a un porcentaje de la población. Se estimó la cantidad de personas que podrían ser afectadas por año. Se analizaron las posibles fuentes de contaminación y en base a proyectos anteriores se estimó la concentración de los patógenos indicadores de los parásitos protozoos, bacterias y virus. Obteniendo de igual manera la relación de los patógenos con respecto a los Coliformes *E. Coli* o en su defecto con los Coliformes termotolerantes. Como resultados a este segundo análisis se obtuvo la estimación del máximo riesgo por persona por año; el riesgo de ser afectado por contaminación fecal en base a la presencia de *E. Coli*. Resultando en  $5 \times 10^{-3}$  por cada 43 millones de habitantes (para el período de 2000 a 2003, en los lugares de estudio: Francia, Los Países Bajos y Alemania).

Se muestra con estos proyectos, el enfoque y la dirección en la que se plantea la línea de investigación, los trabajos de experimentación y demostración de los sucesos que envuelven a la intrusión patógena. En este sentido se realiza una descripción de las condiciones en las que se presenta este fenómeno.

## 2.2 Vías de Entrada de los Patógenos

Los sistemas de distribución se vuelven vulnerables cuando se presentan deficiencias durante la construcción y reparación de la red. La operación del sistema no está exenta de maniobras que pueden alterar la calidad del agua. A continuación se muestran las diversas vías por las cuales se podría generar la entrada de los organismos patógenos que contaminan el agua.

La entrada de los patógenos puede ocurrir a través de válvulas de aire, ventosas, hidrantes, bombas, depósitos de servicio, conexiones con instalaciones no potables, sifones de retorno o reparaciones incorrectas en las conducciones (López *et al.*, 2006). En el proyecto *“Pathogen Intrusion in the Distribution System”* que ha sido realizado la fundación *“American Water Works Association Research Foundation”* (AWWARF), se congregó a un grupo de trabajo conformado por expertos en esta línea de investigación en abril de 1998 para determinar la clasificación de las rutas de entrada de los patógenos identificados como causantes de eventos epidemiológicos debidos al consumo de agua. El grupo de expertos estaba constituido por: J. Dartnall de la *“Water Service Consultant Inc.”* experto en control de conexiones *“Cross Connection”*; J. Funk de la Universidad de Kentucky, experto en modelos de transitorios y contaminación durante este tipo de eventos; M. LeChevallier de la *“American Water Works Service Co.”* Experto en microbiología, P. LaFrance de la *“City of*

*Laval*” de Canadá, experto en servicios públicos de abastecimiento; R. Pankiewicz, de “Pennsylvania American Water Co.” de Pittsburgh, experto en el control de conexiones “*Cross Connection*” y de las instalaciones de distribución de agua, y D. Van Der Kooij, de KIWA, Holanda, experto en microbiología.

Las rutas de entrada de los patógenos identificadas en la literatura se determinaron en base a cuatro criterios principales: gravedad de la enfermedad, probabilidad del brote epidémico, volumen contaminado y frecuencia de intrusión (Kirmeyer *et al.*, 2001). Las rutas con alto riesgo acordadas fueron conexiones con instalaciones no potables, contaminación por transitorios hidráulicos, sitios de roturas y reparación de conducciones, y durante el tratamiento del agua. Los tanques de almacenamiento descubiertos se consideraron rutas de mediano riesgo. Las instalaciones de bajo riesgo fueron tanques de almacenamiento cubiertos, la ampliación de las redes, resuspensión de bacterias y contaminación provocada.

Los tanques de almacenamiento descubiertos son susceptibles de contaminación de organismos patógenos desde fuentes difusas. Entre las fuentes difusas comunes son los desechos de roedores y aves que son portadores de contaminantes. Además del transporte de organismos patógenos en el polvo, las algas y los desechos.

Las instalaciones de almacenamiento cubiertas están mejor protegidas que los tanques abiertos. De cualquier manera, pueden ser contaminados por organismos patógenos suspendidos en el aire que entren a través de la ventilación, de las tapas y de las juntas que no tengan un cierre adecuado. Los patógenos pueden entrar por infiltración desde el subsuelo o por el agua encharcada sobre la superficie o las cubiertas de los tanques, los cuales se consideran una fuente de contaminación debido al contacto con animales

portadores de patógenos. El agua encharcada debe ser removida de las cubiertas y el sitio donde se encuentre el embalse se debe proteger para minimizar el acceso de animales.

En cuanto a la instalación y reparación de las tuberías se presentan dos etapas en donde se puede generar la contaminación. Durante el almacenamiento del material, las tuberías deben protegerse para evitar una posible contaminación proveniente de la suciedad, el barro, desechos y agua contaminada. Estos elementos pueden dar lugar a problemas de calidad como la turbidez y presencia de organismos patógenos. En la construcción y reparación, las juntas y zanjas son susceptibles de contaminación. La humedad del suelo debida a la fuga de agua, es una fuente potencial de contaminación durante la reparación (Kirmeyer *et al.*, 2001).

Los desastres naturales son un factor importante en la generación de vías de contaminación en la red de distribución. Los movimientos en seísmos causan fallos en las tuberías y almacenamientos. Las inundaciones pueden arrastrar suelos hacia las conducciones causando fracturas, además de que ésta agua puede estar contaminada con agua residual y otro tipo de fuentes contaminantes. En casos específicos donde se presentan tormentas de grandes dimensiones como los tornados y ciclones pueden causar daños a las redes de distribución cuando el suelo se ve alterado debido a las caídas de árboles y postes eléctricos.

Una ruta importante de intrusión es la conexión física entre el sistema de agua potable y alguna otra instalación, normalmente de tipo industrial y productos diferentes al agua potable y que es externa al agua de consumo (Symons *et al.*, 2000), en inglés se define como “*cross connection*”. El retorno desde estas conexiones puede ocurrir cuando la presión en la red de

distribución es menor que la presión en la acometida, por ejemplo cuando se rompe una conducción o cuando ocurre un pico de demanda. Además, la instalación externa puede estar presurizada por aire o gas, facilitando la intrusión. Las instalaciones que provocan este tipo de eventos son compresores de aire, expendedoras de bebidas, sistemas de refrigeración y sistemas de riego.

Los eventos de contaminación por transitorios hidráulicos, como se ha mencionado ocurre durante los periodos de presión baja o negativa que permitan el ingreso de organismos patógenos. Estos eventos de contaminación pueden no ser detectado a través de pruebas tradicionales de bacterias Coliformes o mediante pérdida de desinfectante residual. En diversos tramos de tubería puede ocurrir con suficiente frecuencia.

Las condiciones de intrusión se ven favorecidas cuando se presentan los siguientes casos: grietas en las tuberías que se desarrollan con el tiempo, deformaciones en los acoplamientos flexibles, fugas en las juntas, nivel freático somero y el suministro intermitente de servicio de agua de potable.

Para nuestro caso, la intrusión en las redes de distribución de agua se presenta como consecuencia de la conjugación de la existencia de una rotura u orificio en una conducción, con un estado de presión negativa en el interior de la misma y la presencia de un fluido exterior que se somete a la corriente, la cual se genera a consecuencia de una bajada de presión dentro de la conducción (Figura 2.2). En este sentido, cualquier entrada de flujo externo en la conducción debe ser considerada patógena, en tanto que va a alterar los niveles de calidad del flujo que circula por el interior. La intrusión puede ocurrir como consecuencia de situaciones transitorias, fallos por debajo del nivel freático o conexiones en las que haya alguna deficiencia (Kirmeyer *et al.*, 2001).

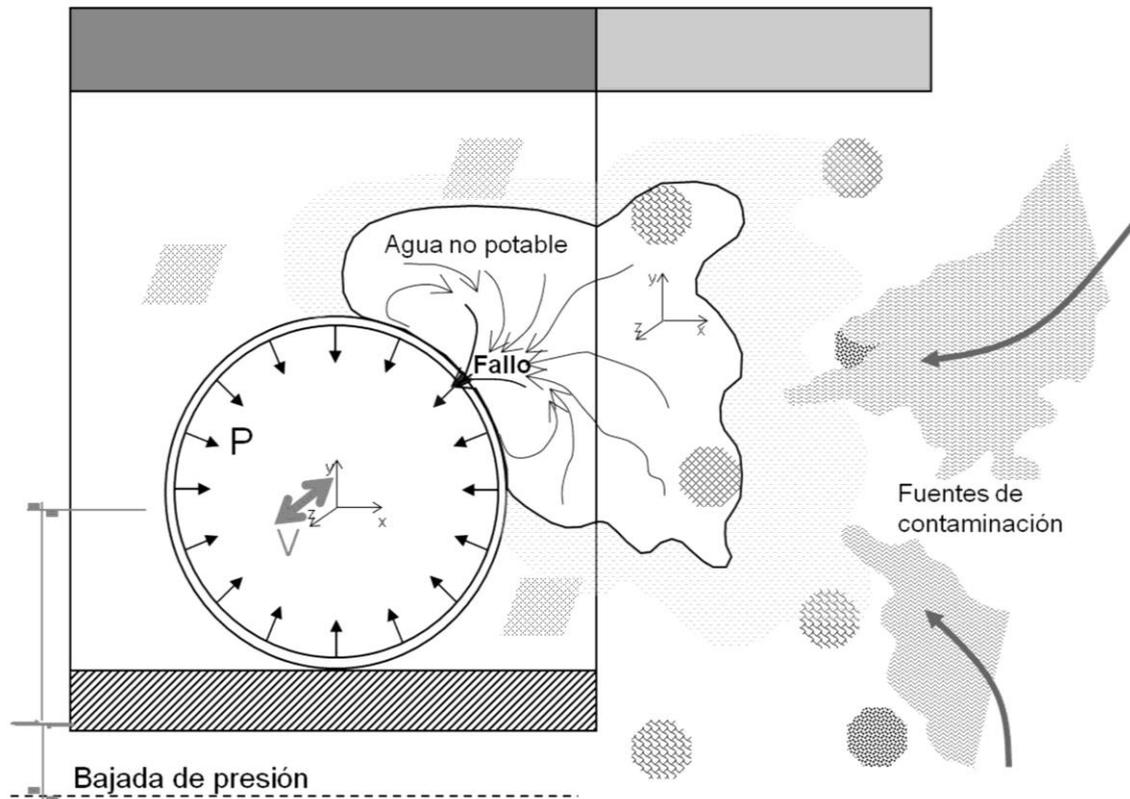


Figura 2.2 Condiciones de entrada de los patógenos a través de fallos

A continuación se describen los tres elementos que conllevan a la intrusión patógena en este trabajo en particular y las deducciones que se han considerado para el establecimiento de la modelación con respecto a la intrusión a través de fallos en las conducciones.

### 2.3 Fuentes Contaminantes

Las fuentes de donde proviene la intrusión pueden ser de los sistemas de saneamiento, de niveles freáticos someros, zonas de inundación y del propio caudal fugado de la red. Otras fuentes son las provenientes del riego, aportando contaminantes como fertilizantes, nitratos, etc. (Zloczower y Charuv 2009). Además de este tipo de contaminantes también son considerados aquellos

como aceites, gasolina, disolventes, detergentes y otros compuestos de diversas procedencias.

La presencia de contaminantes de origen microbiológico presenta un interés específico debido a que estos pueden desarrollarse en los medios acuáticos y terrestres en el entorno de las instalaciones y de la red de distribución, por lo que existe la posibilidad de que estos patógenos contaminen el abastecimiento.

La atención se incrementa con la presencia de presiones negativas (resultado de la diferencia de una carga hidráulica exterior -un medio saturado- con respecto a una presión menor dentro de la tubería) causadas por cambios repentinos en la velocidad del agua en las redes de distribución (LeChevallier *et al.*, 2003). Durante un evento de presión negativa, el agua contaminada y los suelos exteriores a la conducción pueden entrar en la red de distribución a través de grietas, juntas, fallos o roturas en las tuberías. Karim *et al.* (2003) colectaron muestras de 66 suelos y agua alrededor de las conducciones en ocho localidades en seis estados de Estados Unidos. Las muestras fueron tomadas para determinar la presencia de organismos patógenos. Cerca de la mitad de las muestras de agua y suelo presentaban bacterias Coliformes totales y fecales indicando la presencia de contaminación de microorganismos. Se detectaron virus en 56% de las muestras. Aunque las muestras en este estudio no fueron analizadas para bacterias, pero las fugas de la red de alcantarillado proporcionan un ambiente altamente orgánico favorable para su crecimiento (Pedley *et al.*, 2004).

Una de las fuentes de organismos patógenos más importante es el agua proveniente del saneamiento y que puede fluir por el medio poroso en zonas de fugas de las tuberías de distribución. Las diferentes redes se deben colocar a

una distancia mínima de tres metros para evitar este tipo de contacto; aunque no siempre es posible mantener esta norma y en algunos casos en particular se tiene el riesgo de tener una menor distancia entre ambas redes (Figura 2.3). En la imagen de la izquierda se muestra el cumplimiento con colectores principales, no obstante en la imagen de la derecha se observa que en ciertos puntos de la red, no hay alternativa para mantener una distancia apropiada entre la red de agua de consumo y de saneamiento. Si se presentan fugas en la red de saneamiento, el movimiento de los organismos patógenos en un flujo saturado puede ser de varios metros en cortos períodos de tiempo.



Figura 2.3 Colector principal (Izquierda) y sifón en conducción de agua (derecha)

Además del agua procedente del saneamiento en el medio saturado, hay otro tipo de fuente que se percola a través del terreno en los alrededores de las acometidas y que puede ser proveniente del agua de lluvia o de riego (Figura 2.4), pudiendo ser una fuente potencial de organismos patógenos.

A lo largo de la investigación, para realizar el presente documento, se han analizado muestras de agua encharcada y proveniente de acequia, detectando considerable presencia de bacterias Coliformes, E. Coli y Salmonella.



Figura 2.4 Agua superficial como fuente contaminante

En la Figura 2.5 se pueden observar las siembras que se han reproducido en las muestras de agua de charco como en la de acequia en el entorno urbano.

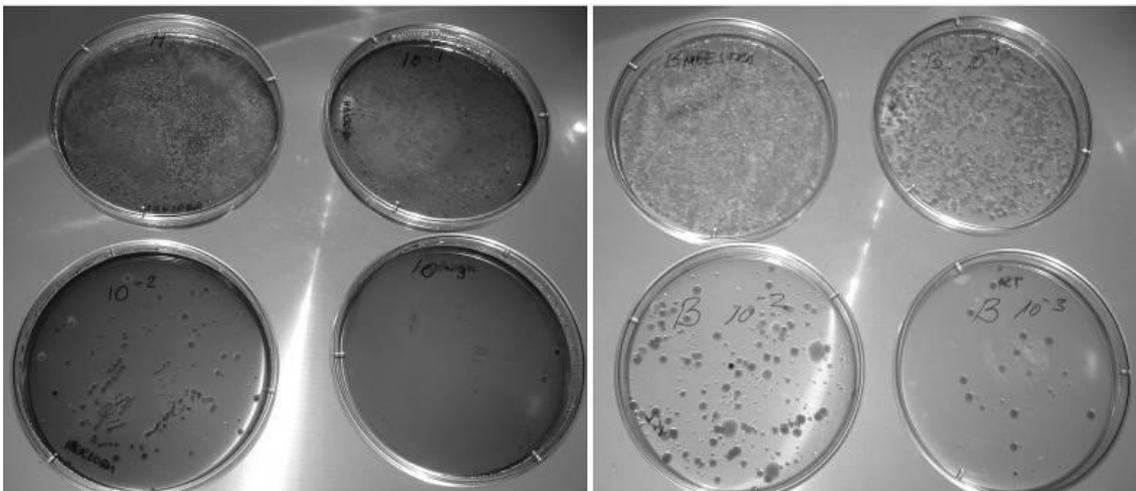


Figura 2.5 Siembra de organismos patógenos de agua superficial

En la Tabla 2.1 se muestra el conteo de colonias después de 24 horas de incubación. La presencia de éstas ha sido notable en las aguas recogidas sembradas en un medio selectivo.

Se muestra que otra de las fuentes potenciales es la que queda en forma de charcos en el entorno urbano proveniente de agua de lluvia. Estas fuentes se

mantienen horas e incluso días en zonas ajardinadas y descampados, y que en algunos casos se presentan en zonas aledañas a las instalaciones de distribución de agua.

Tabla 2.1 Bacterias presentes en agua superficial en el entorno urbano

<b>Muestra</b>	<b>Bacteria</b>	<b>UFC/100ml</b>
Agua encharcada	E. Coli	$4,3 \times 10^5$
	Salmonella	$4,7 \times 10^5$
Agua de riego	E. Coli	$4,9 \times 10^6$
	Salmonella	$1,4 \times 10^5$

Las conducciones por debajo del nivel freático están sujetas a una presión hidráulica exterior y con una fuente potencial de contaminación (LeChevallier *et al.* 2003), la posibilidad de que el agua externa se introduzca a la tubería es mayor en condiciones de presiones negativas, incluso de bajas presiones. Este aspecto se ve con mayor frecuencia en abastecimientos de ciudades costeras, donde aproximadamente el 75% de la población mundial vive a menos de 1,5km de la línea de costa (Ecometta, 2010) donde los niveles freáticos son muy variables y cercanos a la ubicación de las conducciones. Incluso arquetas concebidas para medición o control de las tuberías pueden verse anegadas por lluvias o crecidas de escorrentía urbana superficial. En estas condiciones, incluso los sistemas de ventosas, durante su funcionamiento, en su fase de admisión pueden favorecer la entrada de agentes patógenos en las redes de distribución.

Las zonas donde se presentan las fugas en la red, se convierten en un medio saturado y susceptible a mezclarse con fuentes contaminantes. Con ello se crea un medio propicio para el desarrollo de organismos patógenos. En este sentido el rendimiento hidráulico de la red es un elemento importante para estimar el medio saturado que pudiera crearse en torno a las conducciones y sea susceptible a contaminarse.

Por ejemplo, el porcentaje medio de pérdidas de agua (volumen suministrado menos volumen no registrado, Tabla 2.2) de España en 1990 era de 32% en abastecimientos medios y de 40% en abastecimientos pequeños (Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, AEAS visto en Ferrer y Aguado, 2007). Estos porcentajes corresponden a redes antiguas con una deficiente conservación. En redes nuevas el porcentaje de pérdidas es prácticamente nulo, se incrementa con el paso de tiempo (por lo que se debe considerar este deterioro para diseñar con un rendimiento volumétrico del 75%). En España, de 1999 a 2006 se redujeron las pérdidas del 21,4% al 16,7% del volumen de agua introducido en las redes de abastecimiento de forma global; la reducción se debe a la mejora paulatina del estado de conservación de las redes (INE, 2008).

Tabla 2.2 Volumen de agua no registrada en la distribución

<b>Tipo de Pérdida</b>	<b>%</b>
En red de distribución (fugas)	41
Por error y averías en contadores	33
Consumo no controlado	15
Pérdidas en operaciones de potabilización	4
Otros factores	7

Para mantener niveles de servicio adecuados se acepta un nivel de pérdidas físicas entre 10 y 15% (sin incluir el agua no registrada). Así pues, el número de roturas debería ser como máximo de 0,4 por kilómetro y año. Ello exigiría que la edad media de las conducciones no superase los 25 años y que las causas de la fuga fueran conocidas con detalle. En la actualidad el nivel de pérdidas en las redes oscila entre un 10% (estado de conservación excelente) y un 50% (estado de conservación muy deficiente).

El nivel de pérdidas de agua por fallos en la red considera el caudal de fugas de fondo y de difícil detección que pueden durar largos periodos de

tiempo. Entonces, en el caso de la intrusión a través de los fallos, el mismo caudal fugado se considera un medio propicio para los organismos patógenos y que para la duración de los eventos de intrusión, la fuente contaminante sería permanente en el tiempo.

## 2.4 Mecanismos que Generan Intrusión

Además de la fuente contaminante, otro factor fundamental para que ocurra la intrusión patógena es el mecanismo que genera la entrada de contaminantes. Las condiciones de baja presión o presión negativa dentro de la red de distribución son el elemento mecánico en la intrusión a través de fallos.

Las presiones negativas son causadas por eventos puntuales como pueden ser gasto excesivo del recurso, durante transitorios hidráulicos, por gestiones en la operación y por eventos extraordinarios. Entre los cuales se pueden mencionar algunos como la utilización de hidrantes contra incendios, cortes en el suministro eléctrico que afecten a las estaciones de bombeo, a la regulación del caudal en conducciones y tanques de almacenamiento; y por el abastecimiento intermitente. Estos eventos favorecen las bajadas de presiones no permanentes que generan la mayoría de entrada de flujo externo en las redes de distribución (López *et al.*, 2006).

Los eventos transitorios hidráulicos son alteraciones en el agua causados durante un cambio de estado, típicamente efectuando una transición de un estado o una condición de equilibrio a otro. Los principales componentes de las alteraciones son los cambios de presión y flujo en el punto donde se causa la propagación de ondas de presión a través del sistema de distribución. Las ondas de presión viajan a velocidades sónicas, dependiendo de la elasticidad del agua

y de las propiedades elásticas de la tubería (material y espesor de la pared). Al propagarse estas ondas, se crea un ajuste transitorio de las condiciones de presión y de flujo a través del sistema. Al paso del tiempo, la presencia de las pérdidas y la fricción reducen las ondas hasta que el sistema se estabiliza en un nuevo estado estacionario. Usualmente solo la regulación del flujo extremadamente lento puede resultar en transitorios aparentemente suaves desde un estado estacionario a otro sin fluctuaciones en presión o flujo (Boulos *et al.*, 2005).

En el caso de que se tenga una fuga en la conducción (Figura 2.6) y se presente un transitorio hidráulico, se puede generar una intrusión en las fases de presión negativa durante el proceso del transitorio, siempre y cuando la disminución de la presión sea por debajo de la cota de la tubería. Entre mayor sea la presión máxima, el transitorio de presión podría generar con mayor probabilidad una presión negativa en la red, provocando la intrusión del agua previamente fugada (Ferrer y Aguado, 2007).

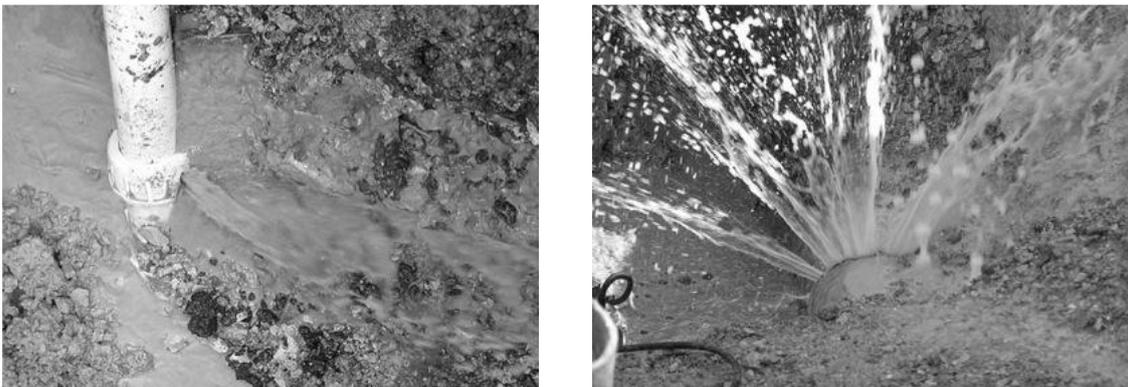


Figura 2.6 La presencia de fugas en las redes

Los transitorios hidráulicos provocan también la entrada de aire que puede dañar a los elementos de la red disminuyendo su fiabilidad (Iglesias *et al.*, 2001), además de favorecer la entrada de contaminantes. Por ello, se debe

evaluar la eficiencia de los desinfectantes ante los eventos de intrusión (Ramalingam *et al.*, 2009).

En la Figura 2.7 se muestra diversos casos de transitorios hidráulicos en redes de distribución (tomadas de Friedman *et al.*, 2004). En un momento u otro de la operación, Las conducciones pueden presentar presiones negativa si no se toman las medidas de protección adecuadas contra este tipo de eventos. La presión en el interior puede llegar a alcanzar valores de cavitación.

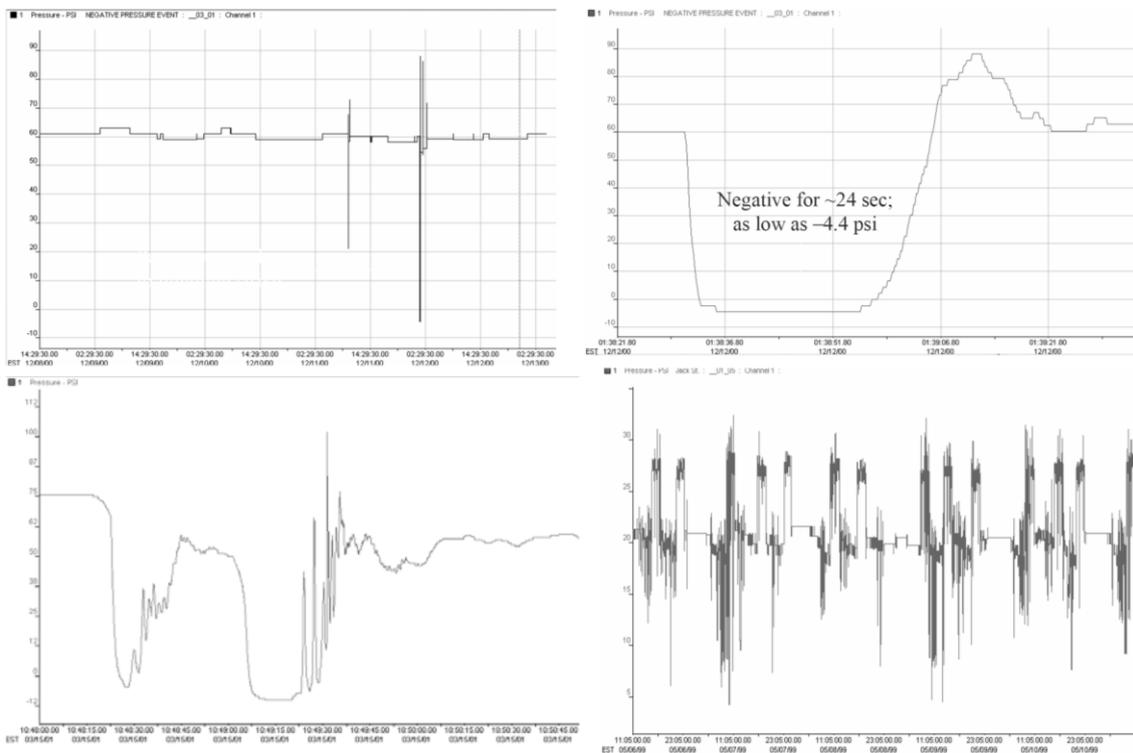


Figura 2.7 Registro de transitorios de presión por diversas causas

También pueden aparecer situaciones de presión negativa no ligada a eventos transitorios. Cuando se diseña una conducción en la que los caudales requeridos generan grandes pérdidas de carga, y las cotas de ciertos puntos son altas. Se puede presentar una situación de sifón con carácter permanente. En estas condiciones la presión puede bajar hasta los niveles de cavitación del

fluido, con lo que podemos encontrarnos con tramos de las conducciones en presión negativa como consecuencia de un mal diseño de la misma.

El abastecimiento intermitente puede crear situaciones de vaciado de las conducciones provocando la intrusión a través de juntas deficientes y fallos en las conducciones (Cabrera y Tzatchkov, 2010). El período de tiempo sin agua en una red intermitente es significativo y puede durar varias horas durante un día, convirtiéndolo en un mecanismo de menor intensidad pero de larga duración comparado con los transitorios hidráulicos de presión.

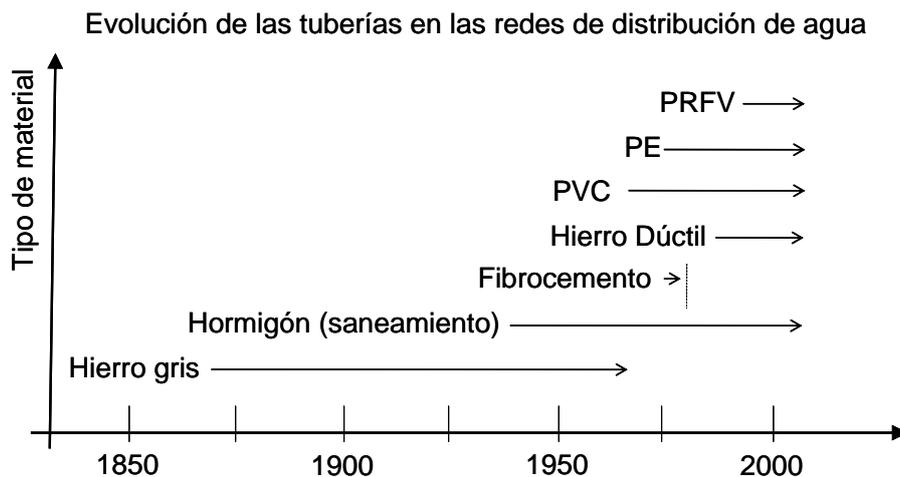
Los fallos en las conducciones es la vía de intrusión en este trabajo en particular, por lo que se hará una mayor descripción de este fenómeno relacionado al rendimiento hidráulico de la red. En condiciones normales de operación, los defectos y fallos producen fugas, se pierde caudal hasta que la fuga se detectada y repara. Pero donde se tenga una presión mayor en el exterior en el entorno del fallo, es cuando se produce la intrusión.

## **2.5 El Deterioro de las Conducciones**

Un factor fundamental para que se presenten los fallos en las conducciones es el tiempo de instalación en la red. Algunas tuberías que en la actualidad formaban parte de las redes de distribución de agua han sido colocadas desde finales del siglo XIX (Makar, 2000), en la Figura 2.8 se muestra un esquema de la evolución de los materiales utilizados para la conducciones de las redes de distribución.

Las tuberías de hierro fundido gris fueron usadas desde principios del siglo pasado hasta que las tuberías fundición dúctil se introdujeron entre la década de los sesentas y setentas (Rajani *et al.*, 1996; Seica *et al.*, 2002). Las

tuberías de fibrocemento han sido instaladas de manera considerable en Norteamérica, Europa y Australia desde finales de la década de los veinte hasta principios de los ochentas (Hu *et al.*, 2007), y continúan siendo un componente significativo de las redes de distribución de muchas ciudades, aunque este tipo de instalaciones ya no se realiza en muchos países como en España.



Posteriormente, las tuberías de fundición dúctil y de PVC comenzaron a entrar en el mercado y a ser mayoritariamente usadas. En la década de los noventas el polietileno de media densidad (MDPE) y HDPE fueron los materiales alternativos para la renovación de conducciones (Rajani, 1996).

En 1992 se hace una estimación del tipo de tubería instalada en Estados Unidos (Kirmeyer *et al.*, 1994 citado en Kleiner *et al.*, 2001), más de las dos terceras partes eran metálicas (aproximadamente el 48% de fundición gris y 19% de fundición dúctil), cerca del 15% eran de fibrocemento y el resto, 18% eran de plástico, hormigón y otros (Figura 2.9). En contraste, con el material de las tuberías que estaban siendo instaladas, el 48% eran de fundición dúctil, 39% PVC y 12,5% de hormigón. En Canadá se obtuvieron distribuciones semejantes del material instalado en 21 ciudades (11% de la población del país). Las

tuberías de PVC se están usando en un 80% del mercado norteamericano para la renovación de conducciones (Davis *et al.*, 2007).

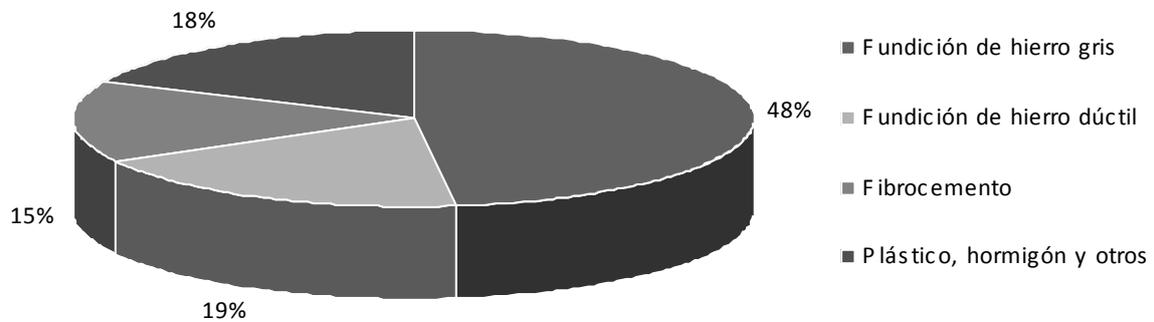


Figura 2.9 Tipos de materiales para la conducción de agua en Estados Unidos

Debido a que la mayoría de las tuberías de agua instaladas durante la primera mitad del siglo XX fueron de fundición gris o dúctil y que a mediados de la década de los noventa tenían en promedio entre 50 y 75 años de operación (Rajani, 1996), los estudios de los tipos de fallos se han enfocado más a este tipo de materiales. Los fallos de las conducciones juegan un papel importante en el fenómeno de la intrusión patógena, provocando un problema de calidad del agua, lo cual se considera en diversos estudios, como en la AWWA (2001) e incluso en España (Cabrera *et al.*, 1999).

Desde 1970 numerosas investigaciones se han dedicado a evaluar la funcionalidad de las tuberías corroídas para proporcionar criterios confiables para considerar su mantenimiento, reparación o cambio (Silva *et al.*, 2007). El mecanismo de deterioro a largo plazo de las tuberías de PVC no está bien documentado, principalmente porque estos mecanismos son típicamente más lentos que en las tuberías metálicas.

Existen mecanismos que generan los fallos en las tuberías (Figura 2.10), se consideran tres aspectos principales: 1. Propiedad estructural en el que se

incluye tipo de material, interacción entre el suelo y la tubería, y la calidad de la instalación; 2. Cargas internas y externas; debidas a la presión de operación y a sobrecargas del suelo, cargas del trafico, cargas por congelación y por injerencia de terceros; y 3. Deterioro del material debido en gran parte a químicos internos y externos, ambientes bioquímicos y electroquímicos (Rajani *et al.*, 2001).

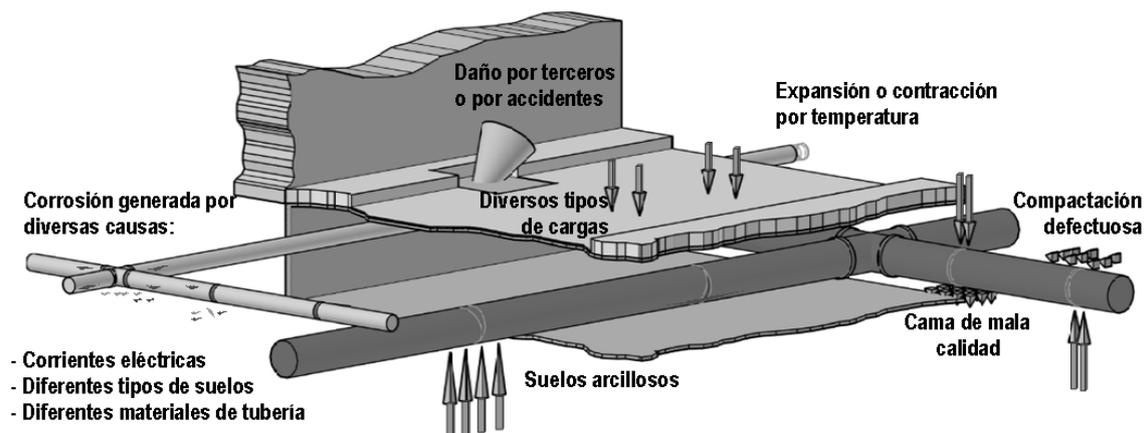


Figura 2.10 Mecanismos que generan fallos en tuberías enterradas

El deterioro de las tuberías se clasifica en dos categorías. La primera es el deterioro estructural, donde se disminuye la resistencia y habilidades para soportar los distintos tipos de tensiones o cargas impuestos sobre ella. La segunda es el deterioro sobre la superficie interior resultando en la disminución de la capacidad hidráulica, degradación de la calidad del agua y reduciendo la resistencia elástica en caso de corrosión severa interna (Kleiner *et al.*, 2001).

Los tipos de fallos estructurales que presentan las tuberías son: roturas circunferenciales, longitudinales, agujeros causados por la corrosión o por presión (reventón), rajaduras, cortes y grietas espirales. Las roturas normalmente producen una sustancial pérdida de presión y de flujo en el sitio del fallo, tiende a ser fácilmente detectable y requiere atención inmediata. En cambio, las fugas regularmente son pequeñas, difíciles de detectar y afectan

menos a los cambios de presión y flujo. La distinción entre ambos fallos no es muy clara (Royer, 2005).

Las roturas en las conducciones ocurren cuando la carga en la tubería excede su capacidad. La corrosión es una causa importante en el deterioro de la resistencia. Hay varios tipos de corrosión y se puede presentar en el interior o el exterior de la tubería. Los defectos de fábrica contribuyen al deterioro. Numerosos tipos de cargas estresan y debilitan la tubería. Diferentes factores químicos y/o físicos pueden coincidir para originar los fallos.

Los factores químicos que provocan corrosión interna y externa son suelos o aguas agresivos, microbios, corrientes eléctricas, gradientes de aireación y conexiones de distinto tipo de material metálico (Royer, 2005). La aparición de biopelícula es inadecuada, algunas bacterias atacan los materiales de las conducciones favoreciendo la aparición de corrosión y daños en sus componentes (Figura 2.11). Otra causa de corrosión son las aguas enriquecidas en cloruros y sulfatos, esta corrosión se puede identificar por la coloración, siempre y cuando esta coloración no provenga de la planta de tratamiento o por la acción microbiana (López *et al.*, 2006).

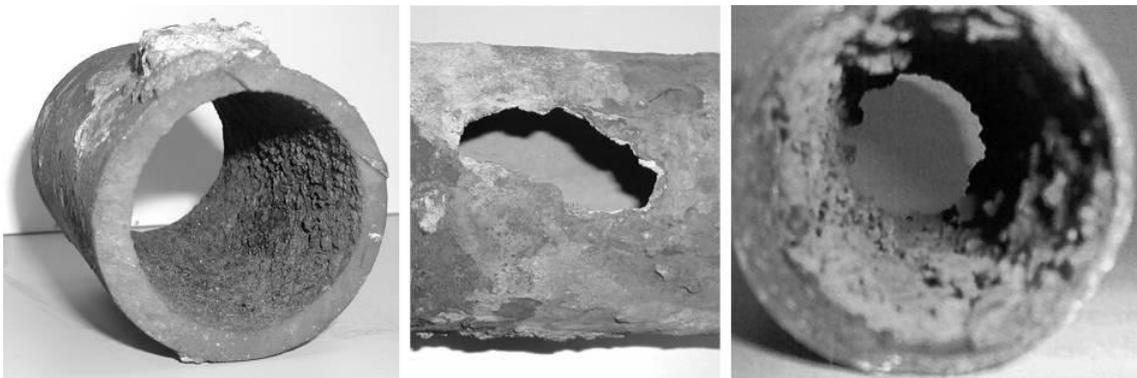


Figura 2.11 Corrosión e incrustación en tuberías

Entre los factores físicos, se encuentran daños generados durante la instalación: el transporte, descarga y/o almacenamiento. Daños generados en la operación: cargas por tráfico, cargas por hundimiento diferencial, por socavación debida a las propias fugas, por sequía, por arcillas expansivas y deslizamiento de tierra. Además de cargas puntuales, se presentan cargas internas radiales debidas a fluctuaciones en la presión del agua, cargas axiales por actividad sísmica, movimiento de suelos y transitorios hidráulicos. Por estrés térmico por diferencias de temperatura entre el agua, la tubería y el suelo. Por expansión del agua y carga de suelos en temperaturas extremadamente bajas. Daños por equipos de excavación que causan o aceleran los fallos. Daños a las capas externas o revestimiento interno que propicia la aceleración de la corrosión (Royer, 2005).

## **2.6 Análisis del Material de las Conducciones**

Para realizar el análisis de los diversos tipos de tuberías, se consideran los materiales de mayor uso para la conducción de agua y se realiza una descripción de cómo se han estudiado los fallos en diversos proyectos publicados en años recientes.

### **2.6.1 Conducciones metálicas**

El mecanismo predominante de deterioro en el exterior de las tuberías de fundición gris, dúctil y de acero es la corrosión electroquímica. Esta corrosión produce daños que se presentan en forma de agujeros. La corrosión se puede clasificar según el medio agresivo: Corrosión seca o en medios gaseosos y corrosión húmeda o electroquímica, en medios acuosos (Ferrer y Aguado,

2007). El entorno físico de la tubería tiene un impacto significativo en su deterioro, los factores que aceleran la corrosión son corrientes eléctricas extraviadas, características del suelo como: contenido de humedad, contenido químico y microbiológico, resistividad eléctrica, aireación, potencial redox, etc.

Las tuberías de fundición se protegen con revestimiento (protección pasiva). Algunos recubrimientos tienen la desventaja de que con algunos grados de flexión pueden fracturarse o desprenderse (Iglesias *et al.*, 2006). El interior de las tuberías metálicas está expuesto a incrustaciones, erosión y grietas por corrosión resultando en una reducción del diámetro interior, así como la reproducción del crecimiento de bacterias (Figura 2.12, varias fuentes). La corrosión interna severa puede provocar deterioro estructural de la tubería. El agua de abastecimiento afecta a la corrosión interna en las tuberías a través de sus propiedades químicas, por ejemplo, el pH, oxígeno disuelto, cloro residual libre, alcalinidad, etc., así como la temperatura y la actividad microbiológica (Kleiner *et al.*, 2001).

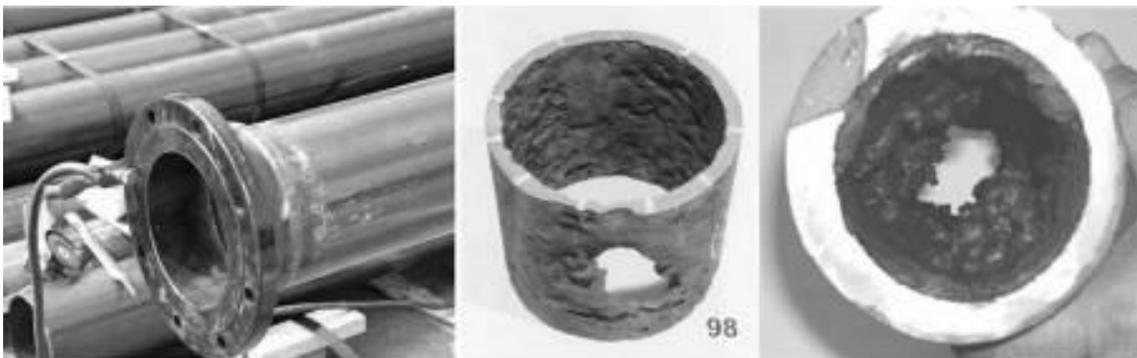


Figura 2.12 Fallos en tubería de hierro

Las tuberías de hierro fundido tienen el mayor número de fallos por kilómetro por año en Canadá, con rangos típicos de 0,39 roturas/km/año (Makar, 2000). Como se ha mencionado, un factor importante es la edad de las tuberías. En las redes de distribución antiguas predominaba el hierro fundido.

Estas conducciones tienen una antigüedad considerable y signos de deterioro, principalmente en forma de roturas o fugas que requieren atención continua, Seica *et al.* (2002) concluía que esa situación se presenta tanto en la ciudad de Toronto, como en Canadá, Norteamérica y resto del mundo. La susceptibilidad de las tuberías a la corrosión y su naturaleza quebradiza son las grandes causas de los fallos.

Seica *et al.* (2002) evalúan tuberías fundición gris, dúctil y de acero. Determinan el estado estructural y la principal causa de fallo. Hacen evaluación geométrica, prueba de tensión y de compresión; los fallos son principalmente roturas circunferenciales, roturas longitudinales y agujeros por reventón o pinchazo. La mayoría de las tuberías analizadas en su proyecto sufren de moderado a severo daño por corrosión. Por lo que recomiendan establecer medidas para detener o al menos retrasar ese proceso.

### **2.6.2 Conducciones de matriz de cemento**

Las tuberías de fibrocemento y hormigón están sujetas al deterioro debido a varios procesos químicos con lo que se forman productos que debilitan la matriz de cemento. La presencia de ácidos orgánicos e inorgánicos, alcalinos o sulfatos en el suelo, son factores principales para la corrosión del hormigón. El agua presente en los poros del suelo puede disolver sales contenidas en él, por lo que se convierte en un medio conductor que funciona como electrolito en una pila de corrosión (Ferrer y Aguado, 2007). En hormigón reforzado y pretensado, pequeños valores de pH en el suelo pueden generar que baje el valor de este parámetro en el mortero de cemento al punto donde pueda ocurrir la corrosión del alambre pretensado o reforzado (Figura 2.13, varias

fuentes), provocando una sustancial debilidad de la tubería (Dorn *et al.*, 1996, consultado en Rajani *et al.*, 2001).

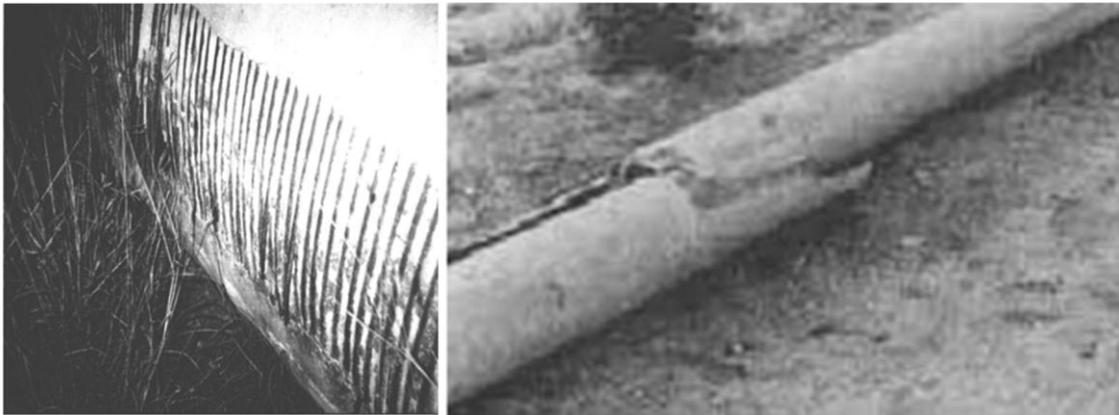


Figura 2.13 Fallos en tuberías de matriz de cemento

Con respecto a la tubería de hormigón, el de tipo pretensado presenta mayor índice de fallos por fuga (Iglesias *et al.*, 2006). Resisten bien a la corrosión del terreno por la protección del hormigón pero es sensible a corrientes eléctricas por la continuidad que puedan establecer las armaduras, por lo que se deben de proteger en ese sentido. Además de la corrosión metálica se puede presentar degradación por el contacto con altos contenidos de sulfatos.

Dependiendo de los compuestos químicos del suelo, las tuberías de hormigón con elementos metálicos son vulnerables a la agresividad relativa debida a continuidad eléctrica (Ferrer y Aguado, 2007). Las corrientes eléctricas extraviadas (electrolisis) pueden provenir de instalaciones de corriente continua de vías de comunicación, de instalaciones industriales y de tomas de tierra. La superficie de la tubería por donde sale la corriente funciona como ánodo, y es la que finalmente se corroe.

Hu *et al.* (2007) mencionan que entre los principales factores que se identifican y que generan roturas en las tuberías de fibrocemento (Figura 2.13,

derecha) son el clima y el suelo arcilloso. Algunos ataques químicos del agua transportada y de la humedad del suelo afectan negativamente la integridad estructural de este tipo de tuberías.

### **2.6.3 Conducciones plásticas**

La vulnerabilidad de las tuberías de PVC se presenta en condiciones extremas de temperatura. Cuando las temperaturas son bajas (0°C) y con la luz solar, se vuelven rígidas y quebradizas. A partir de 20°C su resistencia se va reduciendo un 2% por cada grado centígrado (Ferrer y Aguado, 2007).

Los mecanismos de deterioro para el PVC pueden incluir degradación química y mecánica. Los fallos que han sido reportados en campo en tuberías de PVC-U se atribuyen a instalaciones defectuosas, condiciones excesivas de operación y daños por terceros; mientras que en otros casos se deben a la baja calidad en la fabricación (Davis *et al.*, 2007).

Debido al proceso de fabricación de las tuberías de PRFV y de las tuberías plásticas en general, hacen que con el tiempo se pierda resistencia por el efecto de altas temperatura y los esfuerzos de trabajo. Las juntas de acero se usan también para la reparación de fugas (Iglesias *et al.*, 2006). Finalmente, a lo largo del tiempo la impregnación del plástico causa lixiviación orgánica en el abastecimiento de agua (Geldreich, 1996) y posible aceleración de fallo en la tubería.

## 2.7 Consecuencias de los Fallos

Los fallos de las conducciones ocurren cuando las tensiones de operación y ambientales actúan sobre aquellas tuberías en que su integridad estructural está comprometida por corrosión, degradación, instalación inadecuada o defectos de fabricación. Los tipos de roturas fueron clasificados por O'Day *et al.* en 1986 (visto en Rajani, 2001), diferenciando tres tipos principales: 1. Rotura circunferencial, causada por tensión longitudinal; 2. Rotura longitudinal, causada por tensión transversal (tensión radial); y 3. Grieta en unión causada por tensión transversal en la junta de la tubería (Figura 2.14). Esta clasificación debe ser complementada con un tipo de rotura adicional, agujeros debidos a la corrosión.

Las roturas circunferenciales debidas a la tensión longitudinal son normalmente el resultado de una o más de las causas que se enumeran a continuación (Rajani *et al.*, 2001); 1. Contracción térmica por bajas temperaturas del agua en la tubería y en el entorno; 2. Tensión por flexión debida a los movimientos diferenciales del suelo, básicamente en suelos arcillosos o cuando se presentan oquedades resultantes de fugas; 3. Inadecuadas instalaciones de zanjas y camas de apoyo; y 4. Injerencia de terceros (por ejemplo roturas accidentales, etc.). La presión interna en la tubería contribuye en menor medida a la tensión longitudinal, pudiendo incrementar el riesgo de roturas circunferenciales cuando se conjuga con una o más de las tensiones externas.

Las roturas longitudinales por tensión transversal son normalmente producto de uno o más de los siguientes factores: 1. Tensión radial por la presión en la tubería; 2. Tensión transversal debida a la cobertura del suelo de carga, 3. Tensión transversal debida a cargas vivas causadas por el trafico, y 4.

Incremento de cargas transversales cuando se produce expansión por la humedad congelada en el suelo (Rajani *et al.*, 2001).

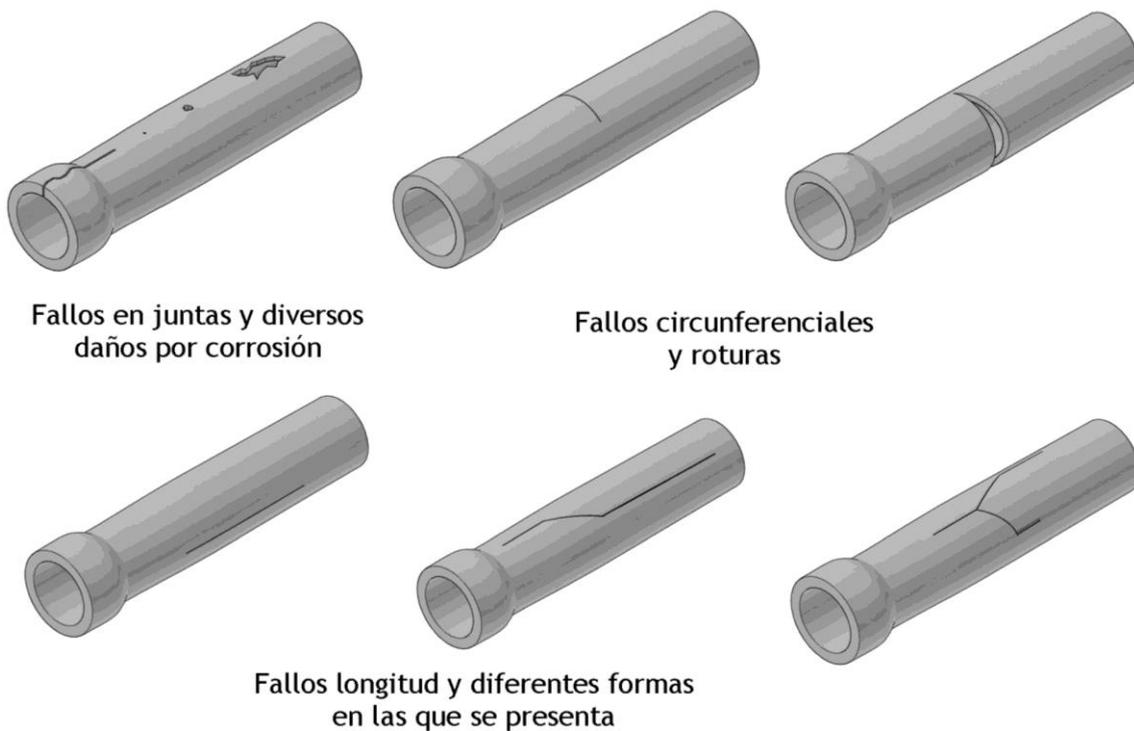


Figura 2.14 Tipos de fallos en tuberías

Aunque la estadística de los tipos de fallos varía de ciudad en ciudad, en promedio el 70% de las roturas en tuberías son circunferenciales, y el otro 30% son longitudinales, pinchazos o agujeros y fugas a través de conexiones de servicio e hidrantes (Rajani *et al.*, 1996). En el caso de Canadá, el hecho de que la mayoría de los fallos sean circunferenciales y ese tipo de roturas ocurran principalmente durante la temporada de invierno sugiere que la interacción axial tubería – suelo sea el principal mecanismo para ciudades donde las temperaturas estacionales son extremas.

Con respecto al tiempo, la presencia de un fallo inicial incrementa la posibilidad de fallos adicionales en la tubería, en zonas cercanas y en periodos de tiempo relativamente cortos. Esto debido a los desajustes que se presentan

alrededor del primer fallo por causa del agua fugada y también por los desajustes que puedan ocasionarse durante la posible reparación (Hu *et al.*, 2007).

En este capítulo este sentido se han presentado varios aspectos, entre ellos y el primordial, la descripción de la intrusión patógena, como se presenta de forma general y la particularidad del fenómeno de intrusión a través de los fallos. Además se han descrito los fallos en las conducciones, debido a que éstos son la vía de entrada de los patógenos en este caso de estudio.

La importancia del conocimiento de los fallos es las conducciones es porque a través de éstos se presentan las fugas, que es el evento contrario a la intrusión y de ello depende el rendimiento hidráulico de la red. En el siguiente capítulo se presentan los modelos que se han trabajado en ese sentido y la propuesta del modelo de la intrusión análogo al de las fugas.

# **CAPÍTULO 3**



### **3 MODELO DE INTRUSIÓN ANÁLOGO AL DE FUGAS**

En condiciones habituales de operación en una red de abastecimiento se presentan caudales circulantes a lo largo de las tuberías con sus respectivas cargas de presión en cada punto de la red, considerando sus fluctuaciones a lo largo del tiempo. De esta manera se lleva el suministro del agua a los usuarios, con la fuerza y cantidad necesarias para su disposición.

En el presente capítulo se hace una descripción de la metodología para cuantificar los caudales de fuga a través de los fallos, basados en la teoría de caudales a través de orificios y la teoría de descarga de área fija y variable (FAVAD, por sus siglas en inglés).

Se presenta el modelo de intrusión análoga al de las fugas para obtener el potencial del caudal que se introduce a través de los fallos en diversas condiciones de presión.

Los resultados se han obtenido haciendo las consideraciones que se plantean en la teoría FAVAD. La relación que existe entre el caudal y la presión están relacionados a los defectos y tipo de material de las tuberías.



### 3.1 Las Fugas de Agua en las Conducciones

El volumen no registrado de agua en un sistema de abastecimiento es la diferencia entre el volumen total aportado a la red y el volumen total registrado en los contadores de los usuarios. Dentro del volumen no registrado se encuentran las pérdidas físicas en roturas, fugas; entre otros factores. Estimar este volumen es complejo, porque en él se incluyen otro tipo de volúmenes.

La aparición de fugas es inevitable y genera una pérdida económica secundaria (además de la pérdida económica primaria, que es el coste del agua cruda, así como su tratamiento y transporte) debido a los daños en la red de distribución (Burn *et al.*, 1999). Las fugas pueden provocar socavación en la zanja de la conducción y con ello más fallos; además pueden llegar a afectar cimentaciones de calles y edificaciones.

La estadística del rendimiento de las conducciones de agua se expresa normalmente en términos de frecuencia de roturas (eventos que encabeza la interrupción del servicio de agua) por kilómetro por año. Una frecuencia mayor a 0,05 roturas/km/año es altamente desfavorable (Rajani *et al.*, 1996). Una fuga puede variar dependiendo del suelo, tipo de agua, especificaciones y calidad en la construcción, así como de los materiales utilizados; además de la edad de las instalaciones, prácticas de operación y mantenimiento (Enríquez *et al.*, 1994). En acometidas, las fugas se presentan por rajadura, perforación, corte o piezas mal instaladas. El 75% de las fugas en las tomas domiciliarias se presentan en las tuberías, mientras que el 25% restante es en los accesorios, distinguiéndose la conexión con la tubería de distribución.

## 3.2 Justificación del Modelo

Debido a que los caudales que normalmente se presentan en los fallos son de fuga, se ha realizado un modelo de intrusión basado en el modelo que se usa para determinar la relación potencial de las fugas en conducciones.

Los caudales de fuga representan un problema complejo para los sistemas de distribución en el que se deben tomar medidas para reducirlos. Se debe tener conocimiento del estado de la red en base al nivel de fugas y establecer hasta qué punto son permisibles estos caudales para finalmente determinar las posibilidades reales de optimizar el rendimiento del sistema.

Al presentarse los fallos en las conducciones, se generan fugas y deficiencia en el sistema, con lo cual baja el rendimiento de la red. A su vez, la presencia de bajadas de presión puede provocar la intrusión de agentes externos y con ello la disminución en la calidad del agua y por ende en la salud pública. Es importante el estudio del fenómeno de intrusión así como el análisis de los caudales fugados para tener mayor conocimiento en uno de los factores que pueden provocar epidemias debidas al consumo de agua (López *et al.*, 2007a).

## 3.3 Modelo de la Fuga

El modelo de la fuga se basa en la teoría de caudales a través de orificios y en la adecuación de la teoría de FAVAD (*Fixed and Variable Area Discharge Paths*) de May (1994). Se hace una descripción sobre los “trayectos de descarga de área fija y variable”. En esta teoría se demuestra que el área transversal de algunos tipos de fugas (agujeros, desgarros o roturas en tubos, juntas o

accesorios) podría variar también con la presión, mientras la velocidad del flujo sigue variando con la raíz cuadrada de la presión. En definitiva, se concluye que el caudal de fuga es función del material de la tubería y del tipo de defecto.

La relación entre la presión y el caudal de las fugas se describe a partir del principio de la conservación de la energía donde la velocidad ( $v$ ) de un chorro de agua a través de un orificio varía con la raíz cuadrada de la presión ( $P$ ), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{2gP} \quad [1]$$

En base a la teoría FAVAD, el caudal fugado también varía con el área del orificio, para grietas longitudinales en tuberías de plástico, el área del orificio varía con la presión (Lambert, 2001).

$$Q = v \cdot A = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gP} \quad [2]$$

Para fugas particulares, el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) puede variar dependiendo de si el flujo es laminar o turbulento. Si el área varía linealmente con la presión (La apertura de la grieta longitudinal se abra en una dimensión) por lo tanto, el área variará con  $P^{1,0}$  y en consecuencia el caudal variará con  $P^{1,5}$ . Si la grieta se abre en dos dimensiones (longitudinal y transversal), por lo tanto, el área variará con  $P^{2,0}$  y el caudal con  $P^{2,5}$ . Con lo anterior, la teoría FAVAD determina que el caudal ( $Q$ ) varía con la presión ( $P$ ) elevada a un exponente ( $N$ ) que puede variar entre 0,50 y 2,50 dependiendo del tipo de fuga (Figura 3.1, varias fuentes).

$$Q = P^N; \quad 0,5 < N < 2,5 \quad [3]$$

La teoría FAVAD, en su momento permitió establecer los rangos en los que podría fugarse el caudal en una red en específico. A partir de esta descripción, se obtuvo una manera de contabilizar los caudales físicos en determinadas zonas de las redes en las que se puso en práctica esta teoría.

En este sentido, en la modelación de la intrusión a través de fallos se toma en cuenta la relación que pudiera surgir con la teoría FAVAD en base a las diferencias que podrían surgir si la relación potencial depende de uno u otro exponente; para ello se realizaron modelos de fallos de diversas geometrías para la aplicación de la teoría. Identificar por medio de la modelación de la intrusión si la teoría se cumple en este tipo de eventos, supone una consideración importante debido a que el caudal contaminante depende de la diferencia de presiones en el fallo en un rango considerable.

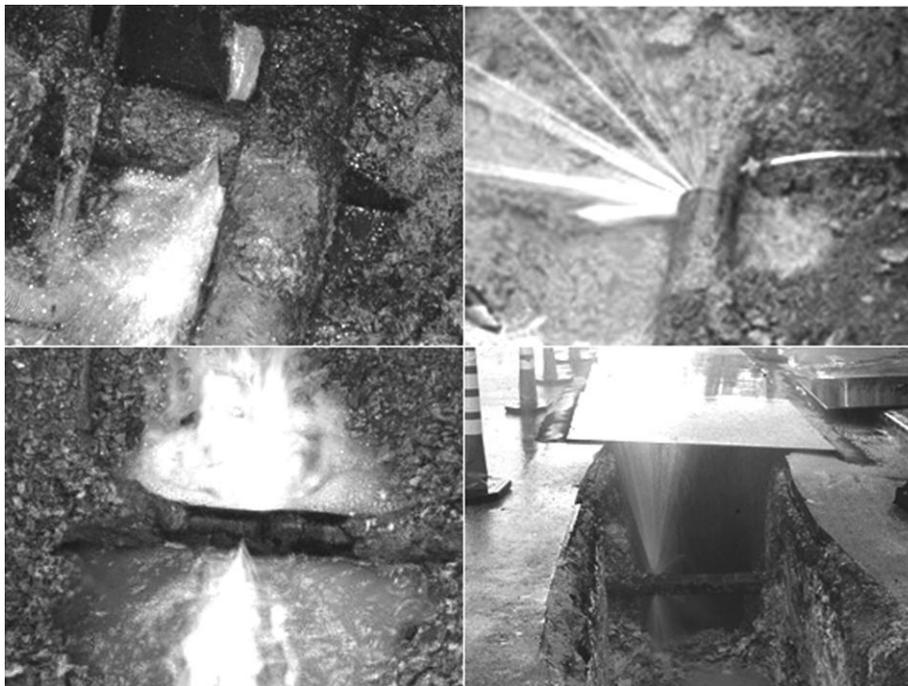


Figura 3.1 Fugas en tuberías de redes de agua

### 3.3.1 Estudios previos

En los trabajos en los que se ha documentado la modelación de la fuga, se presentan experimentos en tuberías metálicas y plásticas. A continuación se hace una descripción y se muestran los resultados de los ensayos disponibles en la bibliografía.

Se realizó la recopilación de distintos modelos de Japón y Reino Unido (Lambert, 2001), ensayos realizados desde 1980 a 1996. Para tuberías metálicas se obtienen valores de  $N$  de 0,36 a 0,70; con promedios de 0,50. Para tuberías plásticas se obtuvieron valores entre 1,39 y 1,72; algunos experimentos presentaban promedio de 1,5.

Dentro de los trabajos previos, se han hecho modelos con el objetivo de obtener relaciones entre el caudal de fuga con características físicas del fallo, el diámetro de la tubería y la presión en la red para fallos longitudinales en tuberías de PVC (Ávila *et al.*, 2004). El exponente  $N$  varió entre 1,5 y 1,8; al aumentar el diámetro de la tubería para una misma Relación Diámetro Espesor (RDE) el área de la rotura se va abriendo cada vez menos debido al aumento del espesor de pared de la misma.

En otro experimento en tubería de PVC de 3/4 de pulgada de diámetro y con fallo longitudinal, se obtuvo un valor de  $N$  de 1,36 (Salinas-Vázquez *et al.*, 2006), lo cual se corroboró con un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, siglas en inglés). Concluyendo que las diferencias entre el modelo experimental y numérico se deben principalmente a que la variación del área de la rotura (características elásticas del material) en el modelo experimental no ha sido considerada en el modelo numérico.

En un estudio hecho por Greyvenstein *et al.* (2007) se analizan diversos materiales de tubería. El objetivo era considerar factores como el medio poroso del exterior y la demanda de agua para observar su influencia en el valor del exponente. Se experimentó con fallos longitudinales en tuberías de fibrocemento, obteniendo valores de  $N$  entre 0,78 y 1,04. En tuberías con alto grado de corrosión se obtuvieron valores de 1,90 y 2,30. En perforaciones redondas en tuberías de acero y PVC-U, se obtuvo valores entre 0,52 y 0,53. Para tuberías de PVC-U con fallos longitudinales, los valores fueron entre 1,50 y 1,85; y en fallos transversales entre 0,40 y 0,52. En relación con el factor del suelo mencionan que no es probable que se tenga una relación lineal entre la pérdida de carga y el flujo. En suelo granulares el flujo puede ser continuo sin que se detecten fugas, mientras que en suelos de baja permeabilidad como arcillas o limos, donde la fractura es más probable, la fuga puede ser detectada con mayor rapidez.

Finalmente, se ha realizado un modelo de una fuga en una tubería en CFD (López *et al.*, 2005), generando un valor de  $N$  de 1,15.

### **3.3.2 Relación potencial en la fuga**

En base a los trabajos recopilados se ha identificado en la bibliografía la influencia del tipo de fallo y el material de la tubería (variables básicas de la teoría FAVAD) para la relación potencial entre el caudal de fuga y la presión en la conducción (ver Anexo 1).

En este sentido se generan dos gráficas para identificar las relaciones de las características antes mencionadas. Primero se analiza la influencia que tiene

el material de la tubería con respecto a los valores de  $N$  obtenidos en los trabajos previos. En la Figura 3.2 se muestran la relación entre el material y  $N$ .

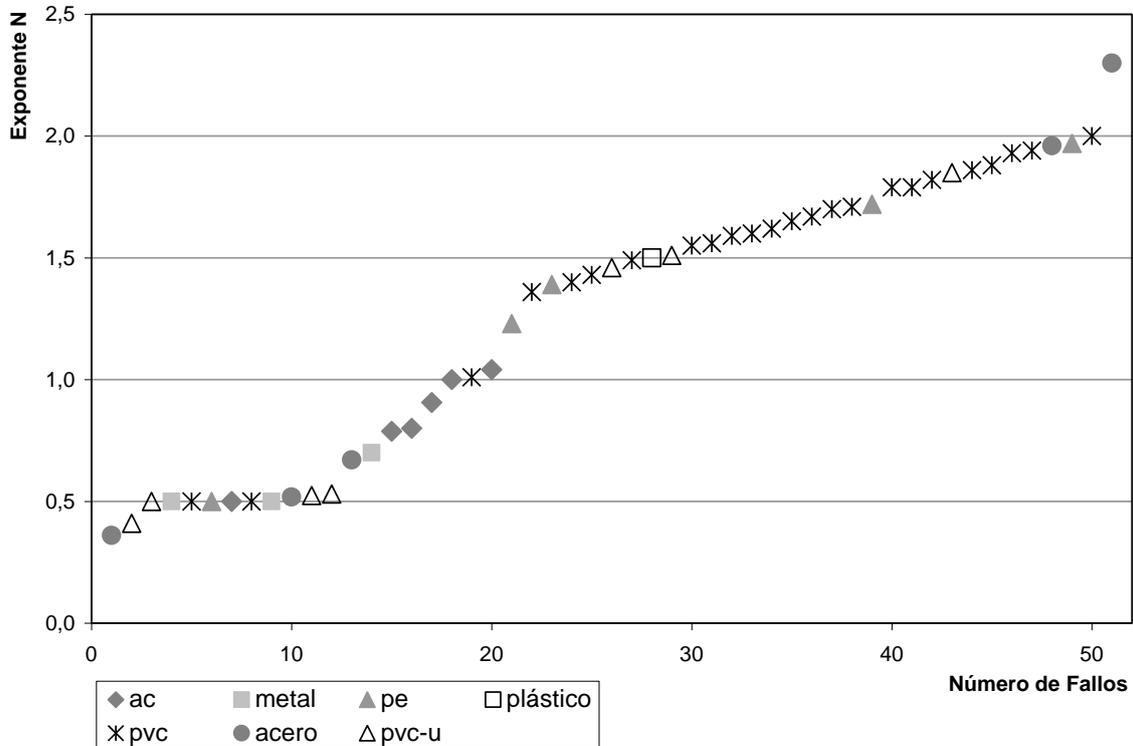


Figura 3.2 Influencia del material de la tubería con el exponente  $N$

En términos generales las tuberías metálicas presentan valores entre 0,35 y 0,70; salvo dos casos en los que se obtienen valores alrededor de 2,25. Con respecto a las tuberías de fibrocemento el rango va de 0,79 a 1,04; solo en un caso presenta valor de 0,50. Con respecto a las tuberías plásticas se presentan valores desde 0,41 hasta 2,00.

En la segunda gráfica se muestra la relación entre el tipo de defecto con el valor de  $N$  (Figura 3.3). Los defectos se han nombrado de la misma forma como los mencionan en cada estudio en particular. La gráfica muestra que los fallos por alto grado de corrosión y de tipo longitudinal son los que presentan los valores más altos de  $N$ , y en consecuencia presentan mayor pérdida de

caudal. Los agujeros por corrosión o fabricados durante el experimento y los fallos transversales presentan valores de  $N$  alrededor de 0,50.

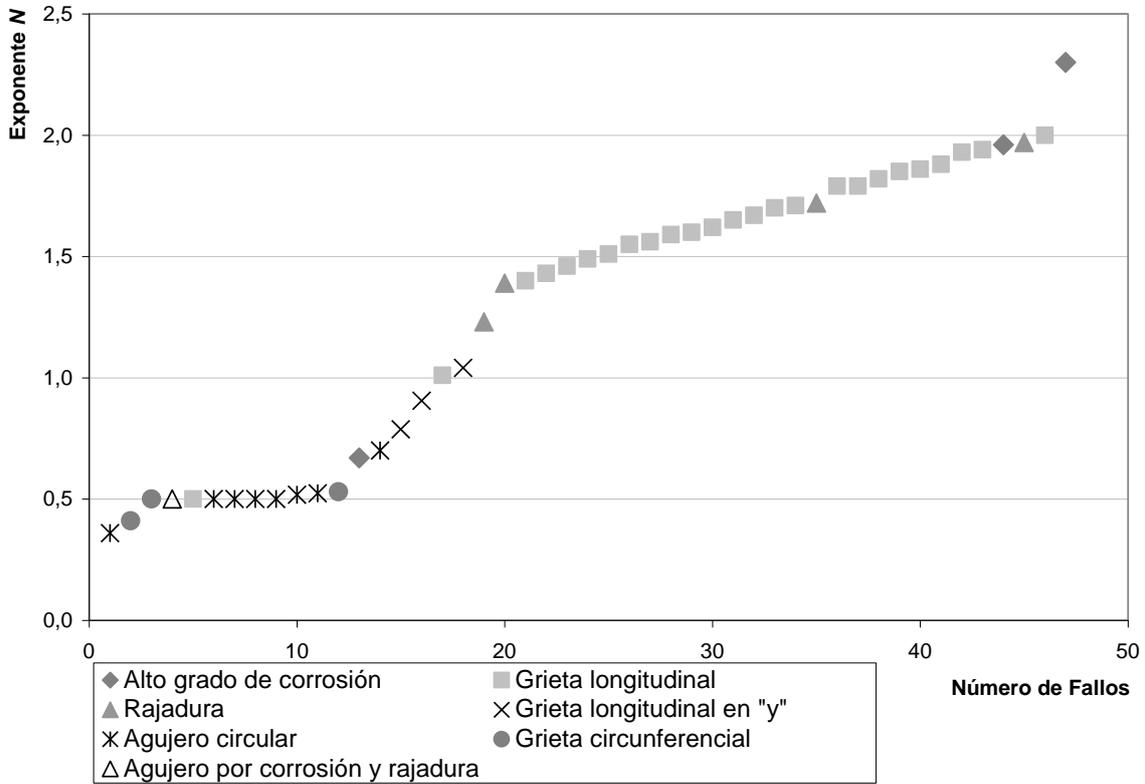


Figura 3.3 Influencia del tipo de fallo con el exponente  $N$

Los resultados muestran que tanto el material como el tipo de fallo, afectan en el potencial del caudal fugado. En base a estos estudios se puede observar que para el caso de las tuberías metálicas, el grado de corrosión es determinante para identificar la tasa de caudal fugado, el valor de  $N$  puede ser 0,50 ó 2,50 dependiendo del daño que presente la tubería. Para las tuberías plásticas, si el fallo es más bien circular, el valor de  $N$  se mantendrá cercano a 0,50; pero si el fallo es longitudinal entonces  $N$  puede tomar valores desde 1,0 hasta 2,0. Con respecto a las tuberías de fibrocemento, se han analizado fallos longitudinales con forma de "y" obteniendo valores entre 0,50 y 1,00. Los fallos transversales también mantienen el valor de 0,50.

El análisis que se presentó con las gráficas anteriores se realizó en base a la búsqueda bibliográfica de trabajos publicados previamente y muestra el rango en el que se presentan los caudales fugados para diversas características de los fallos, de los materiales de las conducciones en diversos rangos de presión.

En base a este tipo de modelos de fugas se planteó el modelo análogo para la intrusión. Con ello se busca cuantificar el potencial del caudal de intrusión. Así como se ha llegado a un mayor conocimiento de la fuga, se busca utilizar estos elementos para identificar nuevas características del evento de la intrusión a través de los fallos.

### **3.4 Modelo de Intrusión en Estado Permanente**

Para realizar el modelo intrusión y obtener resultados relacionados a la teoría FAVAD, se propone la simulación del evento de la intrusión a través de diversos tipos de fallos. Estos escenarios se modelan en estado permanente, de la misma forma en que se hace para la fuga.

#### **3.4.1 Antecedentes del modelo de intrusión**

Así como la bibliografía es profusa en el análisis de fugas, el problema de la intrusión, tiene menos desarrollo al respecto. De manera general, el cálculo del caudal de intrusión se ha hecho con el valor teórico de  $N = 0,50$  y con ello se verifican los volúmenes de entrada; por ejemplo para el programa de computo SURGE (Kirmeyer *et al.*, 2001) y también para los resultados experimentales de Boyd *et al.* (2004, a y b). Se han obtenido valores de 0,60 a partir de simulaciones numéricas (López *et al.*, 2007b) desarrollando un escenario en el

cual se realizan eventos de fuga e intrusión. El exponente en la intrusión generalmente se considera constante para los modelos numéricos.

Como un antecedente propio del modelo de intrusión, se ha realizado un trabajo previo en el que se ha generado una intrusión para bajas presiones por medio de un tubo de Venturi y que ha servido de referente para la construcción del modelo definitivo de intrusión en estado permanente.

#### **3.4.1.1 Modelo mediante tubo de Venturi**

El conjunto hidráulico propuesto para construir este modelo previo se basó en una composición considerando un tubo de Venturi en el cual se ha practicado un orificio en el estrangulamiento del tubo con el que se permite generar la intrusión de forma controlada a partir de la caída de presión que aporta éste accesorio (López *et al.*, 2008).

El funcionamiento del modelo físico es el siguiente, el caudal en la tubería es impulsado por medio de un equipo de bombeo. Al inicio de la tubería principal se presenta una válvula con la cual se controla el caudal que se desea introducir al sistema, a continuación se presenta el medidor del caudal con el cual será establecida la condición de frontera a la entrada del sistema en la modelación numérica. Se tiene un primer transductor para el registro de la presión aguas arriba del orificio. Se pasa por una transición de tubería circular a tubería rectangular ya que el Venturi fue construido en el laboratorio, en secciones rectangulares. En la zona del estrechamiento se presenta el orificio circular y el segundo transductor con el que se registra la presión negativa. Para simular la fuente del fluido exterior se construyó un depósito a una altura establecida con respecto a la tubería, el cual se conecta a la zona del orificio.

Aguas abajo del orificio se instaló un tercer transductor. Finalmente la tubería tiene una descarga libre hacia un tanque de recirculación.

El esquema se presenta en la Figura 3.4, en la que se detalla cada una de las partes principales del diseño de la experiencia.

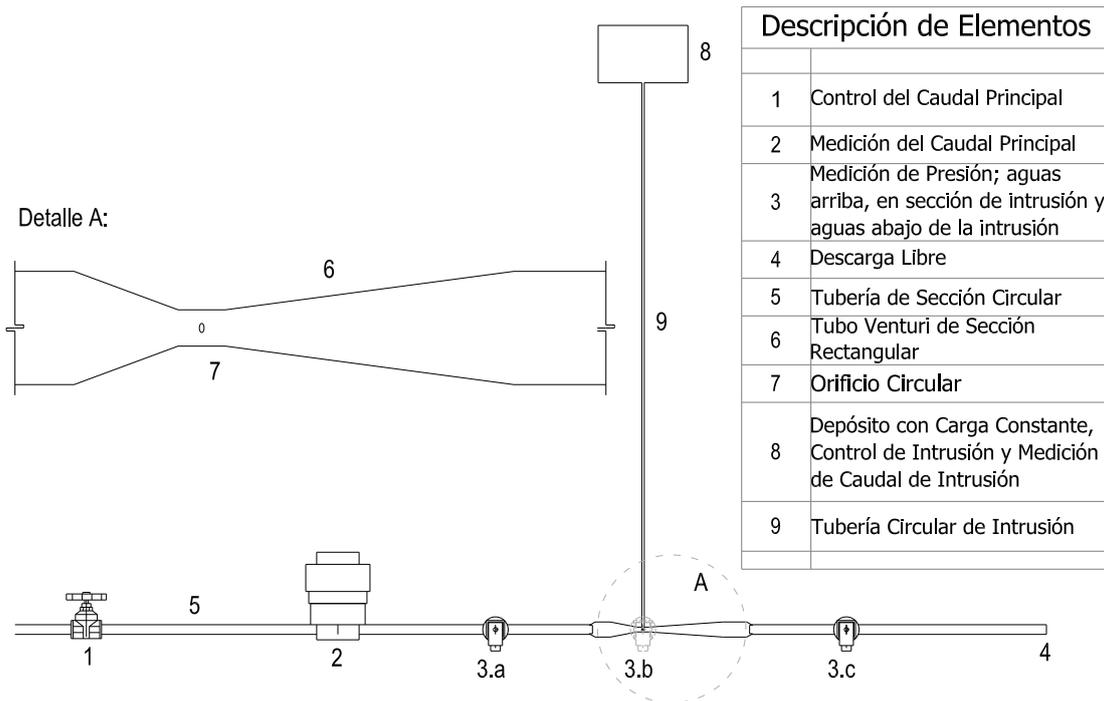


Figura 3.4 Descripción del modelo Venturi para intrusión

De esta forma se construyó el dispositivo de laboratorio (Figura 3.5) que cumple con los objetivos de diseño. El registro de las mediciones se realiza mediante el programa Labview™.

Se han realizado simulaciones para un rango de caudales generados a partir de la válvula instalada aguas arriba del sistema. Para cada caudal en la conducción, se registraron las presiones y se midió el caudal de intrusión de manera volumétrica.

Los resultados que se han obtenido de las simulaciones experimentales se utilizaron para la modelación computacional del fenómeno. Se ha digitalizado el esquema de funcionamiento y mediante el programa Fluent™ se realiza la simulación numérica.

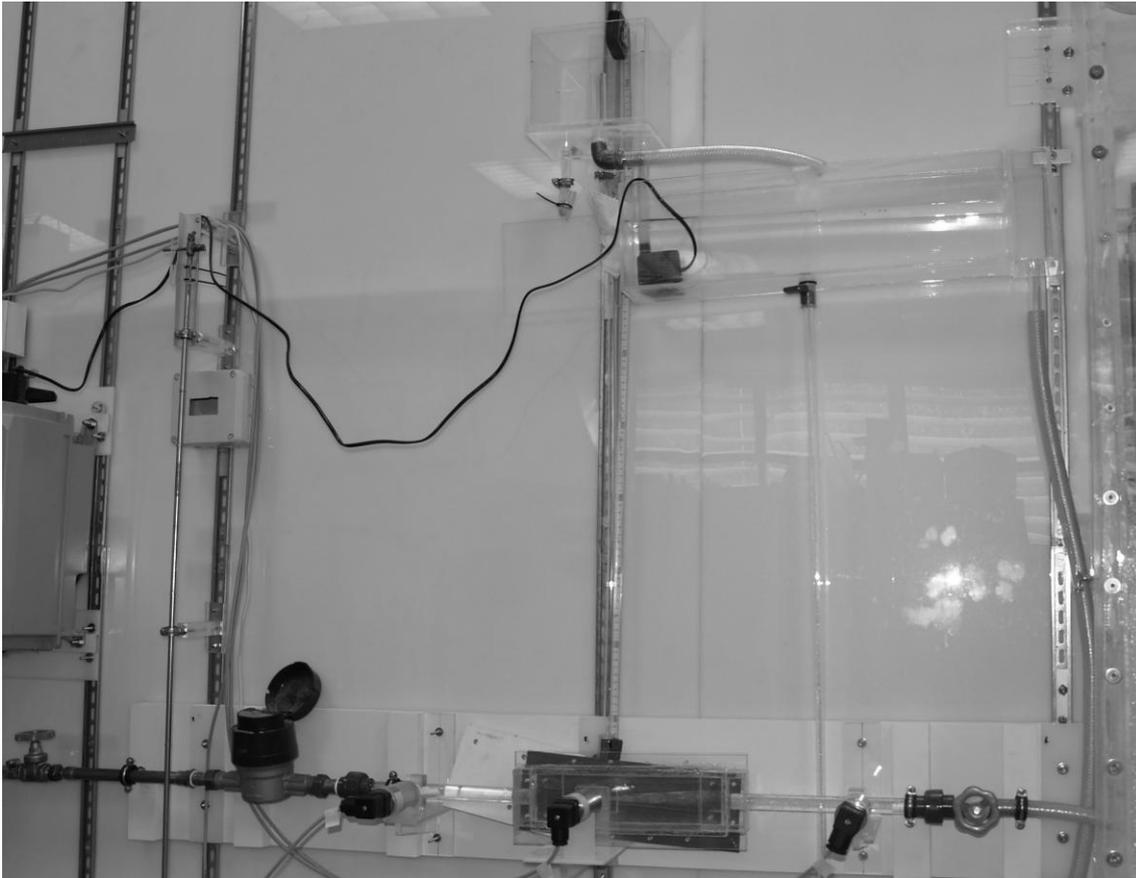


Figura 3.5 Modelo físico de la intrusión a través de un tubo de Venturi

El volumen de control se muestra en la Figura 3.6. El modelo de turbulencia que se utilizó fue *RNG* de  $k-\varepsilon$ . Entre otros porque considera en su ecuación un término que mejora sensiblemente la exactitud para los flujos que se filtran rápidamente. Resuelve con mayor exactitud el fenómeno de los vórtices en el flujo. Proporciona una fórmula analítica para los números turbulentos de Prandtl y además presenta una teoría en la que se obtiene una fórmula

diferencial para la viscosidad efectiva que considera los efectos de números pequeños de Reynolds. El modelo se simuló en régimen permanente.

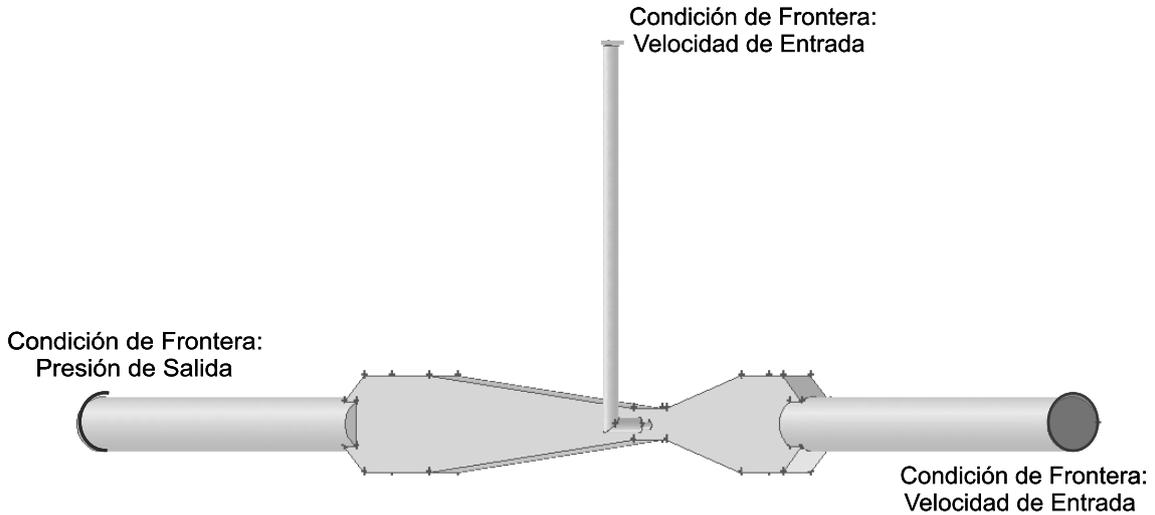


Figura 3.6 Volumen de control del modelo Venturi

Finalmente, con los modelos físico y numérico, se obtuvo una primera aproximación de generar intrusión en un régimen de presiones permanente en una conducción. Los ajustes se muestran en las figuras: Figura 3.7 y Figura 3.8.

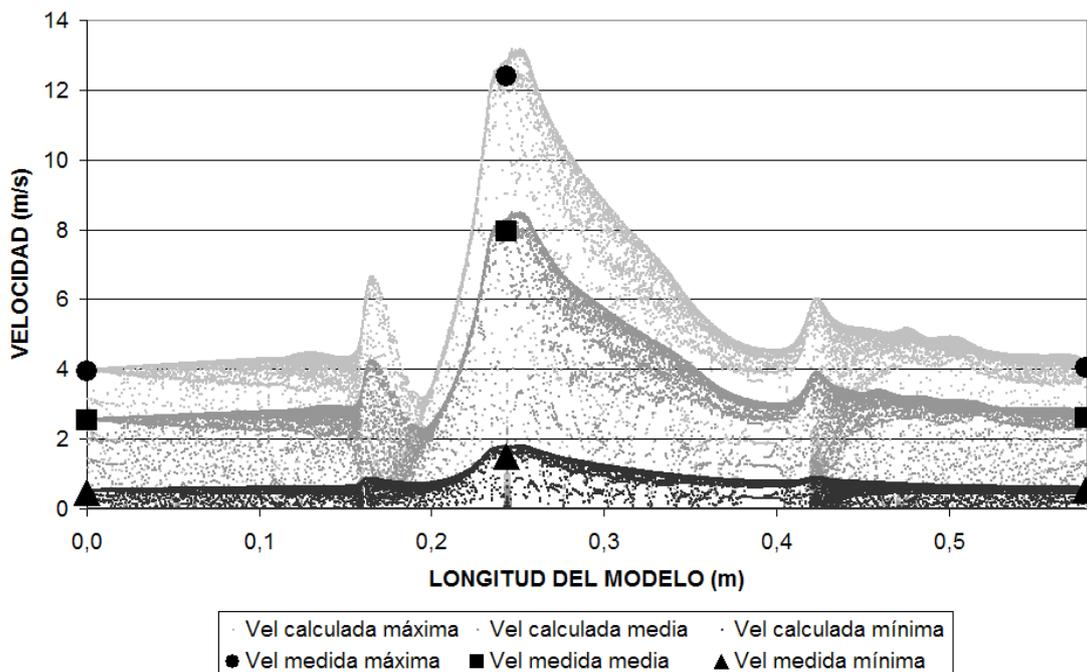


Figura 3.7 Ajuste de la velocidad en el modelo Venturi

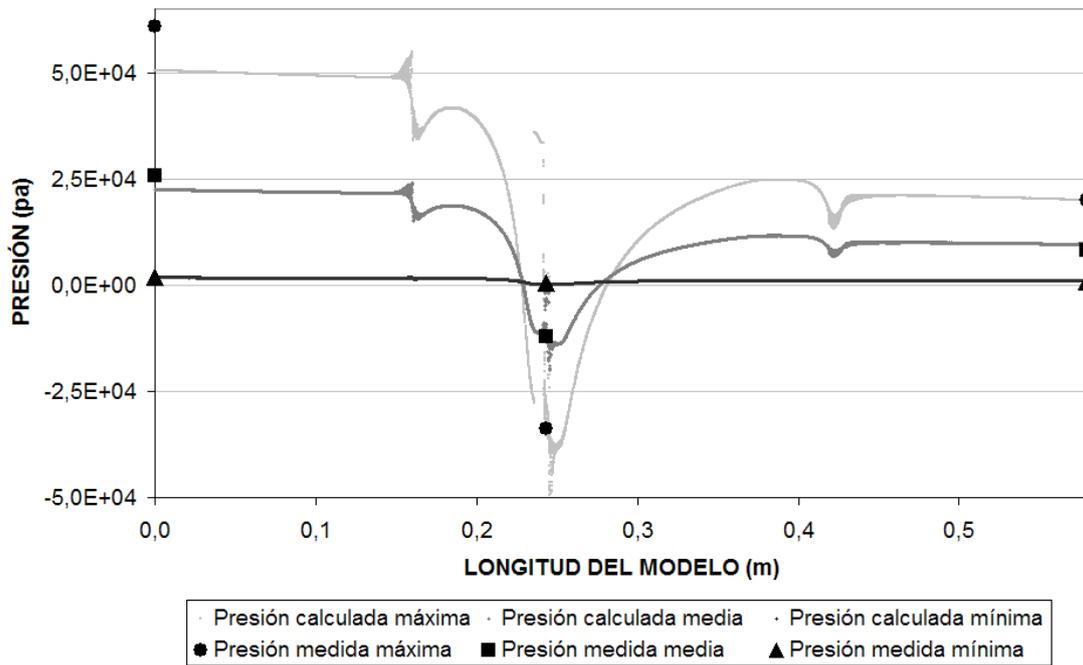


Figura 3.8 Ajuste de la presión en el modelo Venturi

Con los ajustes alcanzados en el modelo se obtuvo un valor del exponente  $N$  mayor a 2,5; generado para un rango de caudales de intrusión entre 45 y 60 l/h. La diferencia promedio entre ambos modelos fue del orden de 8,2 l/h; en términos del evento de intrusión es equivalente a un caudal de fondo indetectable. Estos resultados se generaron con una variante en la forma de lograr la presión negativa, y esta fue a partir de la variación de la sección de la conducción, a partir de esta propuesta surgieron nuevas ideas para obtener un modelo más próximo a lo que podría generarse en campo.

Tras haber realizado esta propuesta de modelación en situación de presión negativa mediante el tubo de Venturi y de sus resultados alcanzados, se propuso construir un nuevo modelo de intrusión con el cual poder generar una bajada de presión manteniendo la sección de la conducción constante, logrando el modelo de la intrusión en estado permanente que se describe a continuación.

### 3.4.2 Prototipo de la intrusión

La intrusión patógena que se modela se basa en la combinación de factores que han sido descritos en el Capítulo 2. En principio, un fallo en una conducción de agua, aunado a un régimen de presiones bajas o negativas en el interior de la tubería. En el exterior se propone un nivel de agua por encima de la tubería, con el cual se representaría a la fuente contaminante (Figura 3.9). Con estas premisas, el modelo hidráulico puede realizarse estimando el impacto del tipo de fallo en el volumen del agua que pueda introducirse durante un evento de presión negativa. El conjunto hidráulico propuesto para caracterizar el evento de intrusión se plantea de forma que el modelo se asemeje al prototipo que se muestra en la Figura siguiente.

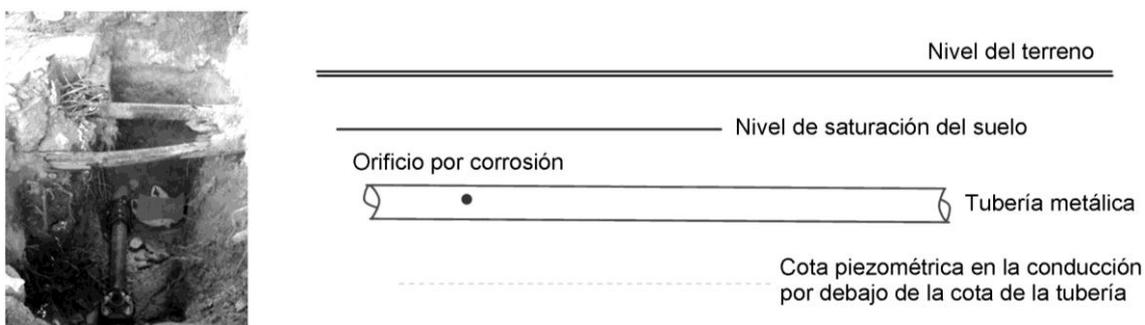


Figura 3.9 Esquema de la intrusión en estado permanente

A continuación se describe el modelo físico y el procedimiento realizado para la intrusión en diversos escenarios para los tipos de fallos que se han mencionado en el capítulo anterior.

### 3.4.3 Modelo experimental

Se ha desarrollado un modelo físico en el que se dan las circunstancias de presión negativa de forma controlada. Junto con el defecto constitutivo en el material de la conducción que representa el fallo para diversas geometrías. Por

el defecto se genera la entrada de caudal desde un depósito en el que se encuentra la tubería a modelar y con el cual se genera la intrusión. Se simulan diversos fallos: circulares, longitudinales y transversales.

El proceso de intrusión se realiza en estado permanente. La presión negativa es constante dentro de la conducción en la zona del fallo. La carga exterior sobre el fallo se mantiene también constante. El esquema del modelo físico se muestra en la Figura 3.10, en la que se detalla cada una de las partes principales del experimento.

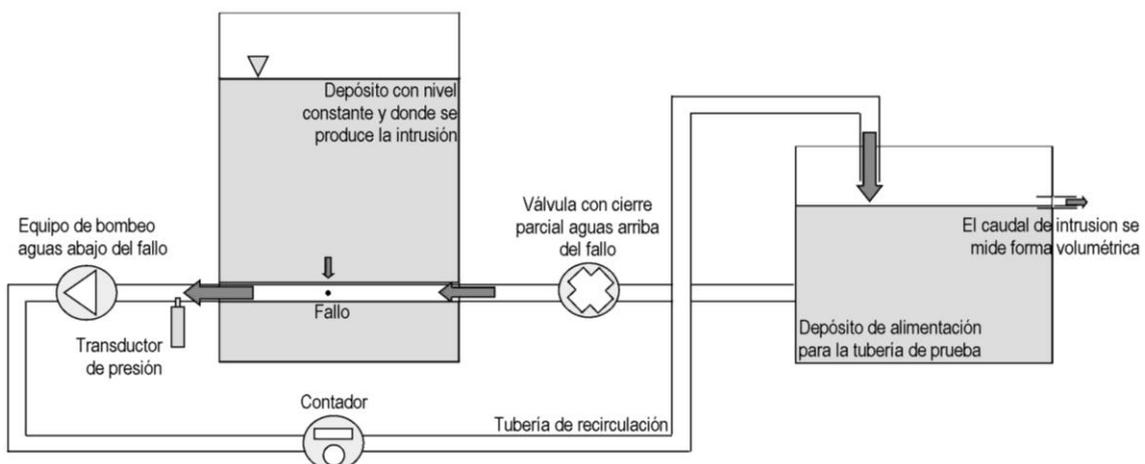


Figura 3.10 Diseño del modelo físico de la intrusión en estado permanente

En base a las variaciones y relaciones de caudal y presión; se pueden considerar satisfactorias las leyes de similitud geométrica. Además de que se cumplen con las leyes de similitud cinemática y dinámica debido a los rangos en los que se realizan los escenarios en regímenes de número de Reynolds, del orden de  $3,0 \times 10^4$ .

Las características de la tubería que representa la conducción de agua son las siguientes: tubería de PVC-U *PN* 16, de diámetro nominal  $DN = 32\text{mm}$ , con espesor,  $e = 2,4\text{mm}$ .



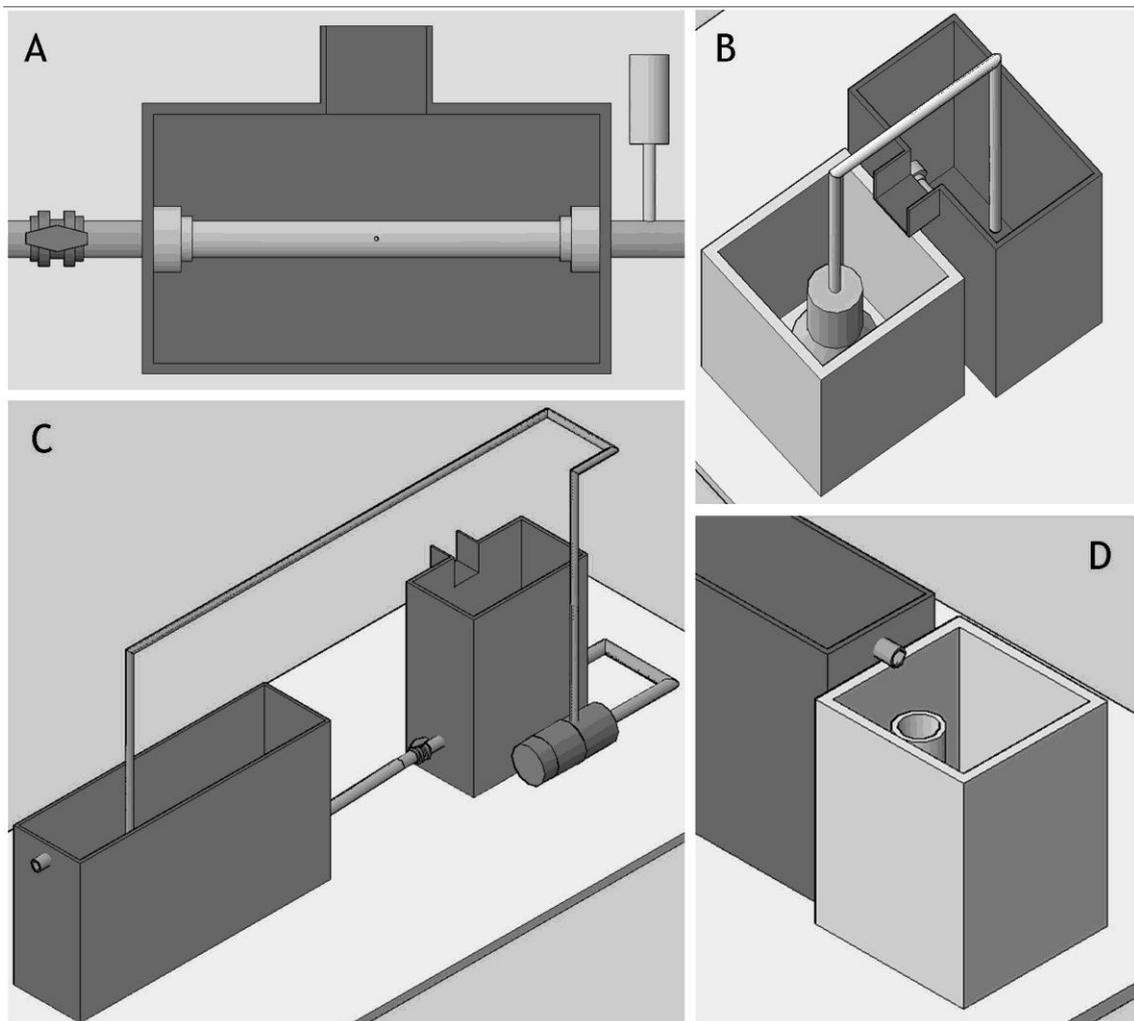


Figura 3.12 Detalles del modelo físico de intrusión permanente

El mecanismo para que se genere la intrusión se realiza mediante la combinación del equipo de bombeo y la apertura parcial de una válvula que se encuentra aguas arriba del fallo (Figura 3.12, C); con esta combinación se genera presión negativa en el tramo antes del equipo de bombeo donde se localiza el fallo. El fluido que se introduce por el fallo hacia la conducción llega hasta el depósito de alimentación. Debido a que este caudal es un excedente del sistema de recirculación, éste es vertido para cuantificar el caudal que se introduce por el fallo (Figura 3.12, D).

En la Figura 3.13 A se muestra el modelo experimental construido en laboratorio. En la imagen B se muestra la válvula aguas arriba del fallo y en el fondo se observa el equipo de bombeo. En la imagen C se muestra el sistema de recirculación del depósito en donde está la tubería con el fallo. En la imagen D se observa la tubería con el fallo dentro del depósito. En la imagen E se muestra como se produce el caudal de fuga por uno de los fallos a ensayar y finalmente en la imagen F se observa la medición de los datos de presión y caudal durante el ensayo, los cuales son captados mediante Labview™ para su posterior tratamiento.

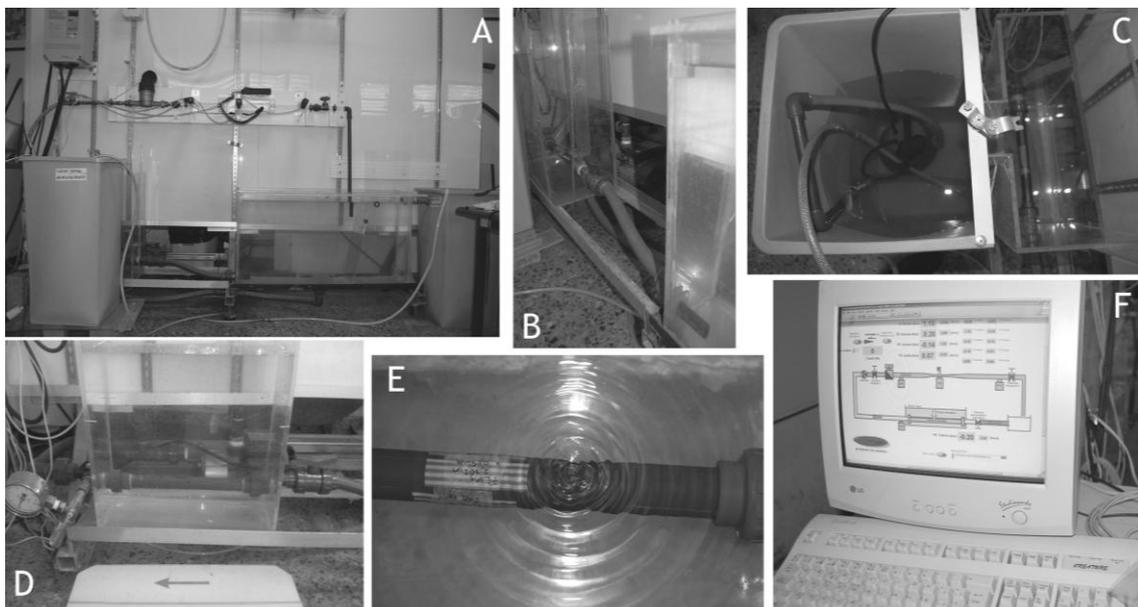


Figura 3.13 Modelo experimental del dispositivo de intrusión

Las presiones negativas se registran aguas abajo del fallo mediante un transductor de presión. El caudal total, que es la suma de los caudales tanto de circulación de la tubería principal como del que se introduce; se contabiliza por medio de un contador que se ubica después del equipo de bombeo y antes de la descarga al depósito de alimentación de la conducción. La medición de la presión y del caudal total se registran utilizando el programa Labview™.

### 3.4.4 Tipo de fallos a ensayar

El objetivo de modelar diversos tipos de fallos es el de representar las principales formas geométricas de las que se han obtenido información en el caso de las fugas mediante la teoría FAVAD. En este sentido los fallos representativos son de tipo circular, longitudinal y transversal.

#### 3.4.4.1 Dimensionado de los fallos circulares

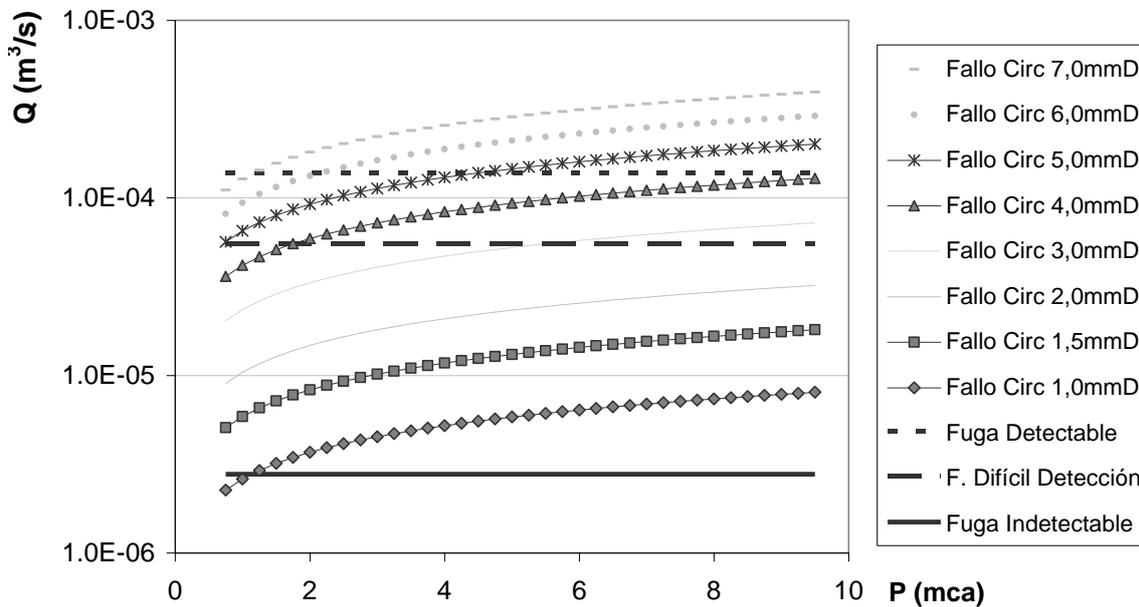
Las dimensiones de los fallos se determinaron en base a la clasificación de los tipos de fugas (Tabla 3.1), adaptada de Mckenzie (1999). Los fallos circulares son los primeros en dimensionarse y se hace en base al tipo de fuga que se genera según el caudal de pérdida y su forma de detección.

Tabla 3.1 Clasificación de las fugas

Tipo de fuga	$q_L$ ( $m^3/s$ )	$q_L$ (l/s)
Fuga indetectable	$q_L < 2,8 \times 10^{-6}$	0,003
Fuga reportada, difícil detección	$2,8 \times 10^{-6} < q_L < 5,5 \times 10^{-5}$	0,003 - 0,05
Fuga reportada, fácil detección	$5,5 \times 10^{-5} < q_L < 1,4 \times 10^{-4}$	0,05 – 0,15
Fuga reportada	$1,4 \times 10^{-4} < q_L$	0,15

A partir de la ecuación de descarga a través de orificios se calcula un rango de caudales para fallos circulares de diversos diámetros en un rango de presión de 0 a 10mca (Figura 3.14). El valor máximo de 10mca se ha determinado debido a que el evento de intrusión se da a presiones negativas en la tubería y considerando el límite para este modelo entorno a la presión de vapor. El coeficiente de descarga que se usa es 0,75 y está basado en los

resultados obtenidos por Lambert (2001), para una descarga en una sección con diámetro de 1mm y valores de número de Reynolds alrededor de 2.000.



De esta manera se contrastan los caudales de los orificios circulares con los caudales de fuga. Considerando que en la intrusión se podrían tener dimensiones equivalentes para las fugas reportadas de difícil y fácil detección. En este sentido, los fallos circulares representarán caudales de pequeñas y grandes dimensiones.

Se eligen los diámetros de los orificios para los rangos de los distintos tipos de caudales fugados. Los diámetros de 1,0 y 1,5mm representan el caudal de las fugas reportadas y de difícil detección para las presiones de trabajo en el modelo. El diámetro de 4,0mm representa el caudal para las fugas reportadas de fácil detección. El diámetro de 5,0mm se sitúa en la frontera entre fuga de fácil detección y fuga reportada, el límite es la presión de 4,5mca. Los fallos circulares que se modelaron en el experimento son los siguientes (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Datos de los fallos circulares

Tipo de Fallo	Diámetro (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )
circular	1,0	0,8
	1,5	1,8
	4,0	12,6
	5,0	19,6

#### 3.4.4.2 Dimensiones de los fallos longitudinales y transversales

Los fallos longitudinales y transversales se dimensionaron en base a los diámetros de los orificios circulares con el objetivo de mantener una relación entre ambos tipos de geometría.

Se usa la ecuación de los diámetros equivalentes de Huebscher (Koch, 2008) obtenida de forma empírica para secciones rectangulares [4]. Con el diámetro equivalente de un conducto circular se obtiene la misma pérdida de presión para una sección equivalente rectangular.

$$d_{eq} = 1,55 \frac{A^{0,625}}{P_m^{0,25}} \quad [4]$$

Se busca construir dos fallos longitudinales y dos transversales de pequeñas y grandes dimensiones para cada tipo de fallo. Para ello se deben tomar en cuenta dos consideraciones:

1. La primera consideración es el perímetro de la tubería, para el diámetro exterior de 32,0mm; el perímetro es 100,5mm. Por lo que se propone que el fallo transversal sea como máximo la mitad del perímetro exterior (50,3mm) y por lo tanto el fallo longitudinal también, para tener condiciones similares. Comparando con los fallos circulares, las

dimensiones teóricas propuestas para los fallos de grandes dimensiones serían las siguientes (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Ancho de fallo para una longitud de 50,3mm

<b>d<sub>equiv</sub> (mm)</b> <b>Huebscher</b>	<b>Ancho de fallo</b> <b>(mm)</b>
<b>1,0</b>	0,06
<b>1,5</b>	0,12*
<b>4,0</b>	0,58
<b>5,0</b>	0,83

\* Ancho objetivo para hacer los cortes

- La segunda consideración es que el ancho del fallo se realiza con un cúter con espesor de laminilla de 0,34mm. El corte se hace calentando el tubo y el aparato de corte. El ancho del fallo varía según la temperatura con la que se realiza el corte, al tiempo de contacto de la tubería con el cúter y a la velocidad de enfriamiento. Por lo cual, el ancho máximo del fallo es el espesor del cúter y el ancho mínimo dependería de los factores antes mencionados. En la Tabla 3.4 se presentan relaciones teóricas en base a los anchos que podría presentar el fallo construido experimentalmente.

Tabla 3.4 Longitud de los cortes con anchos teóricos (mm)

<b>d<sub>equiv</sub> (mm)</b> <b>Huebscher</b>	<b>Ancho teórico de fallo (mm)</b>			
	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,34</b>
<b>1.0</b>	23	7	4*	3*
<b>1.5</b>	68 <sup>+</sup>	22	11	9
<b>4.0</b>	929	293	149	121
<b>5.0</b>	1.685	531	270	219

\* Longitudes objetivo para hacer los cortes en base a la segunda consideración

<sup>+</sup> Desde esta relación se excede los 50,3mm

Teniendo en cuenta estas dos consideraciones se hicieron los cortes con el objetivo de que los fallos fueran lo más apegado a las condiciones hidráulicas de los fallos circulares, donde los fallos de grandes dimensiones no fueran mayores que 50mm y los de pequeñas dimensiones fueran entre 4 y 3mm con el

mayor espesor posible del cúter. Finalmente, las dimensiones reales fueron medidas con un juego de galgas con una aproximación de 0,05 por 1mm para el ancho de los fallos y con un vernier para obtener la longitud del corte (ver Anexo 2).

Las características de los fallos longitudinales y transversales son las que se presentan en la Tabla 3.5. Se obtiene los diámetros equivalentes, los cuales son similares con los que se contabiliza un caudal de fuga de difícil detección para el rango de presión establecido previamente.

Tabla 3.5 Datos de los fallos longitudinales y transversales

<b>Tipo de Fallo</b>	<b>Longitud máxima (mm)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>d<sub>equiv</sub> definitivo<sup>+</sup> (mm)</b>
Longitudinal menor	4,0	1,1*	1,0
Longitudinal mayor	44,5	6,3	1,6
Transversal menor	3,1	1,4*	1,2
Transversal mayor	48,3	10,2	2,1

\* Área es sobre la superficie de la tubería

<sup>+</sup> Se calculó con el ancho medio

Después de realizar una serie de pruebas para generar los fallos, los resultados finales se presentaron con diámetros equivalentes entre 1 y 2mm. Por lo que la equivalencia se obtuvo para los diámetros de pequeñas dimensiones.

Con la justificación de las dimensiones de los fallos a modelar en el evento de intrusión en estado permanente, se tienen ocho fallos de tres geometrías diferentes. Cuatro fallos circulares, dos fallos longitudinales y dos fallos transversales. Los fallos circulares de 1,0; 1,5; 4,0; y 5,0mm de diámetro. Dos cortes longitudinales de 4,0mm y 44,5mm; y dos cortes transversales de 3,1mm y 48,5mm. Los fallos longitudinales y transversales se muestran en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Fallos longitudinales y transversales

### 3.4.5 Ensayos experimentales del modelo análogo al de fugas

El objetivo del modelo experimental es obtener la relación entre la presión negativa y el caudal de intrusión análogo a como se obtiene el caudal de las fugas en la teoría FAVAD. Por lo cual se requiere de un rango de presiones negativas que como límites se tiene, por un lado la carga externa que en el modelo experimental se mantiene en 0,37mca y por otro, la presión de vapor dentro de la conducción.

Dependiendo del fallo se realizaron entre cuatro y siete escenarios de presión negativa, trabajando entre valores de -0,9 hasta -7,0mca. Para cada escenario se hicieron entre 7 y 15 lecturas, en cada una se midió el caudal de intrusión de forma volumétrica. Con este número de ensayos se verifica que la medición que se realiza sea la adecuada en cada escenario.

El procedimiento que se siguió en los ensayos se muestra en la Tabla 3.6. Cada ensayo se considera parte de un muestreo aleatorio así como los escenarios de presión para cada fallo. La cantidad de ensayos que se hacen en el modelo experimental son adecuados para establecer normas estadísticas básicas para tomar en cuenta los resultados de los mismos.

Tabla 3.6 Procedimiento del modelo de intrusión análogo al de fugas

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
1	Para iniciar el ensayo, se arranca el equipo de bombeo del sistema principal
2	Se regula la válvula de globo para el escenario de presión negativa a ensayar
3	Se regula el sistema de recirculación del depósito de intrusión en base al tamaño del fallo para mantener un nivel constante y un caudal poco turbulento en el depósito de intrusión
4	Habiendo dejado transcurrir un tiempo para que se establezca el flujo en la tubería principal, se inicia el proceso para obtener el caudal de intrusión
5	Se comienza a contar el tiempo en el que es captado el caudal de intrusión y se registran las temperaturas de los depósitos tanto de alimentación general como de intrusión
6	Se registra el tiempo que ha durado el llenado del recipiente
7	Se registran 20 instantes de medición con el programa Labview™ para la presión y el caudal en la conducción

Los datos capturados son procesados para obtener las relaciones potenciales para el evento de intrusión. Las tablas siguientes (Tabla 3.7 y Tabla 3.8) muestran los rangos en los que se han realizado los ensayos experimentales (en los anexos 3 y 4 se detallan los resultados de cada ensayo).

Tabla 3.7 Síntesis de los escenarios para fallos circulares

Parámetro	D 1,0	D 1,5	D 4,0	D 5,0
Escenarios	5	7	5	4
Ensayos	7	10	15	8
P max (mca)	-1,4	-1,1	-1,0	-2,3
P min (mca)	-5,2	-5,7	-3,4	-7,0
t min (s)	480,1	16,0	55,0	240,2
t max (s)	609,5	35,2	91,2	732,6
q intr min	$3,7 \times 10^{-6}$	$6,8 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$
q intr max	$7,1 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$

\*El caudal de intrusión (q intr) está en m<sup>3</sup>/s

Tabla 3.8 Síntesis de los escenarios para fallos alargados

Parámetro	L 4,0	L 44,5	T 3,1	T 48,5
Escenarios	4	3	4	5
Ensayos	10	12	10	12
P max (mca)	-2,4	-1,5	-2,4	-0,9
P min (mca)	-6,0	-2,4	-5,3	-2,8
t min (s)	270,3	600,5	420,3	30,3
t max (s)	496,6	1180,8	512,4	52,2
q intr min	$7,7 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-6}$	$6,7 \times 10^{-5}$
q intr max	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-4}$

\*El caudal de intrusión (q intr) está en m<sup>3</sup>/s

### 3.4.6 Resultados del modelo de intrusión permanente

En el modelo experimental se han obtenido relaciones del caudal de intrusión con respecto al incremento de la presión negativa que se genera en la tubería para cada uno de los fallos propuestos, los resultados se observan en la Figura 3.16. En el Anexo 5 se muestran validaciones del modelo experimental.

El valor del exponente resultante entre las presiones negativas y los caudales de intrusión ( $N$ ) ronda el valor de 0,50 para los ocho fallos ensayados. El menor  $N$  es 0,45 y el mayor es 0,63. Los orificios circulares de 5 y 4mm de diámetro y el fallo transversal de 48mm presentan caudales de intrusión entre 200 y 400l/h, siendo estos caudales análogos al de fugas reportadas de fácil detección. En un segundo grupo de fallos se encuentran los fallos circulares de 1

y 1,5mm de diámetro, así como el fallo longitudinal de 4mm y el transversal de 3mm, con caudales de intrusión entre 20 y 50l/h, estos caudales son similares a los de fugas reportadas de difícil detección. Finalmente el fallo longitudinal de 44,5mm da valores de caudal de intrusión entre 3 y 5l/h, mostrando un comportamiento equivalente al de una fuga indetectable.

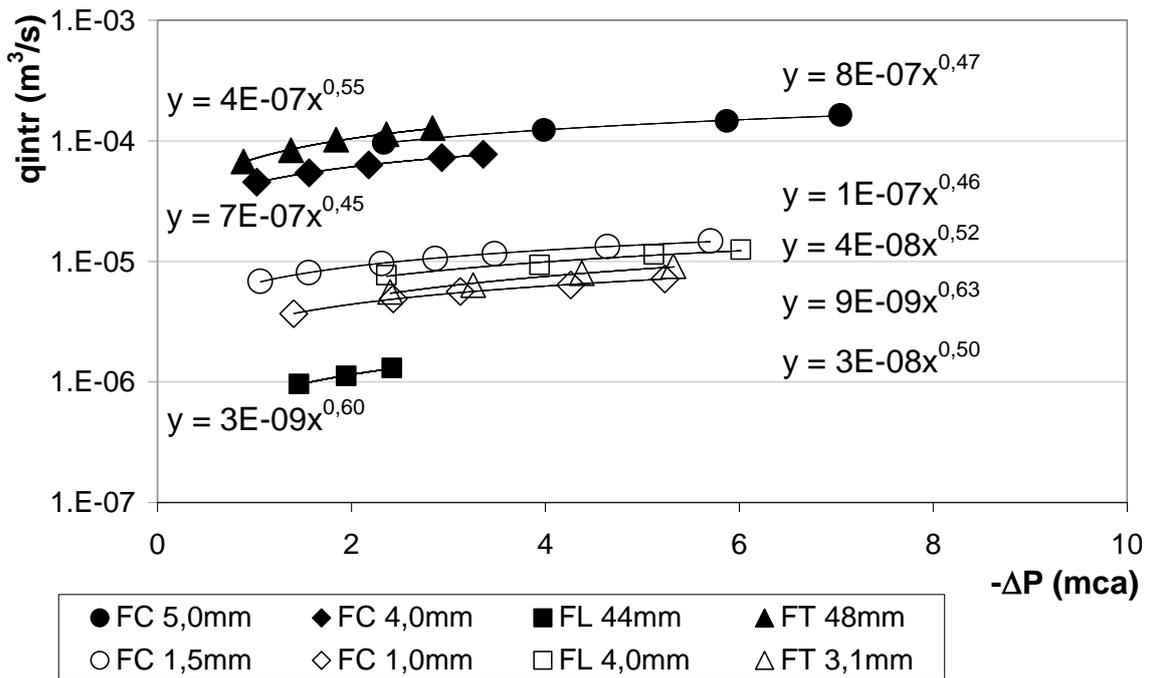


Figura 3.16 Relación potencial para caudales de intrusión en fallos

En cuanto a la relación de los diámetros equivalentes, los fallos de pequeñas dimensiones (FL 4,0mm y FT 3,0mm) presentan un resultado acorde con los fallos circulares. Con respecto a los fallos de grandes dimensiones (FL 44mm y FT 48mm) los resultados se obtienen en sentidos opuestos, en el caso del fallo longitudinal el caudal es menor al que podría obtenerse con su diámetro equivalente y por el contrario en el fallo transversal el caudal es mayor al que se obtendría con su diámetro equivalente. Esto nos hace concluir que en estos fallos se ha experimentado una variación en su área durante el evento de intrusión, aunque no podría relacionarse con la teoría FAVAD debido a que el

exponente que se obtiene en ambos fallos presentan valores de 0,6 para el fallo longitudinal y de 0,55 para el fallo transversal.

### 3.5 La Relación Potencial, Intrusión vs Fugas

De acuerdo con los resultados del modelo de la intrusión, se observa que los efectos en el exponente  $N$  son mínimos para los rangos de presión en que se ha trabajado. En la Figura 3.17 se muestra una comparativa del valor del exponente para los eventos de fuga y de intrusión.

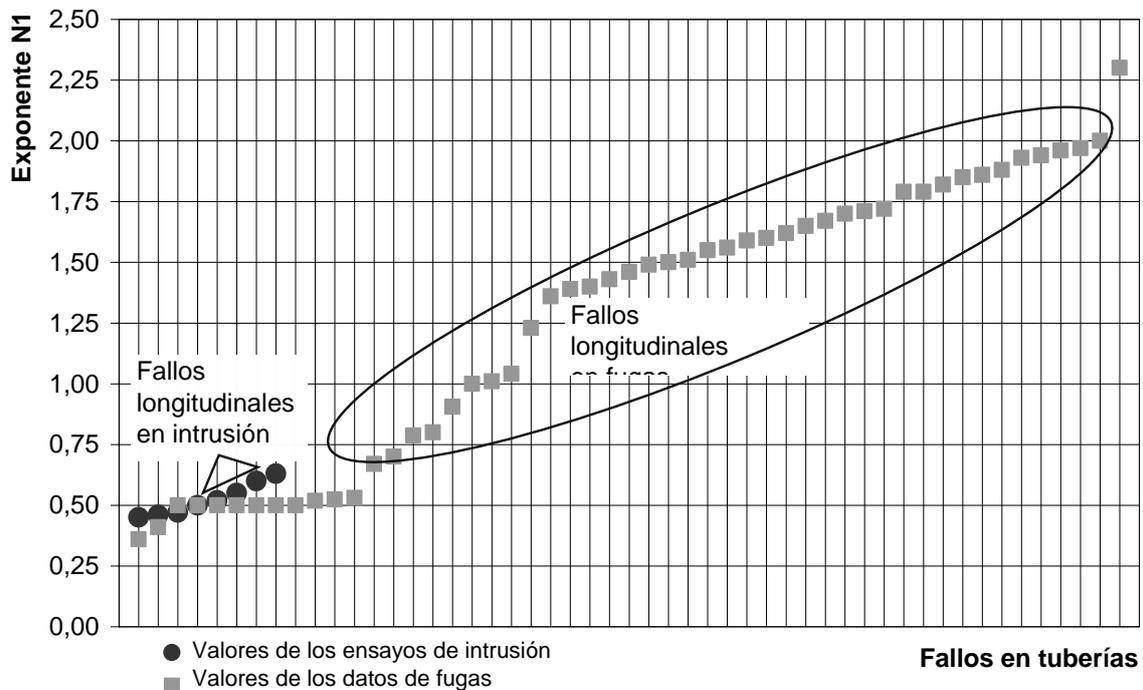


Figura 3.17 Exponentes de modelos de intrusión y de fuga

Las tres geometrías ensayadas (circular, longitudinal y transversal) obtienen valores de exponente alrededor de 0,50 (Figura 3.18). Que en el caso de los modelos de fuga, este valor se obtenía de forma general para los pequeños orificios además de algunos casos de fallos transversal; en ese sentido, los fallos simulados en la intrusión, presentan este tipo de caracterís-

ticas si lo relacionamos con el diámetro equivalente de los fallos longitudinales y transversales. No obstante, el fallo longitudinal de grandes dimensiones es el que muestra el efecto contrario al de fugas. En el caso de la intrusión el potencial se mantiene cercano a 0,5 y no muestra un incremento como en el caso de las fugas.

El trabajo sugiere que este tipo de flujo puede ser representado mediante la relación hidráulica de caudales a través de orificios; sin embargo la teoría FAVAD, no representa como tal el efecto que ocurre durante la intrusión. Aún cuando se ha observado que el caudal resultante está afectado para los fallos longitudinales y transversales por una posible modificación del área durante la intrusión.

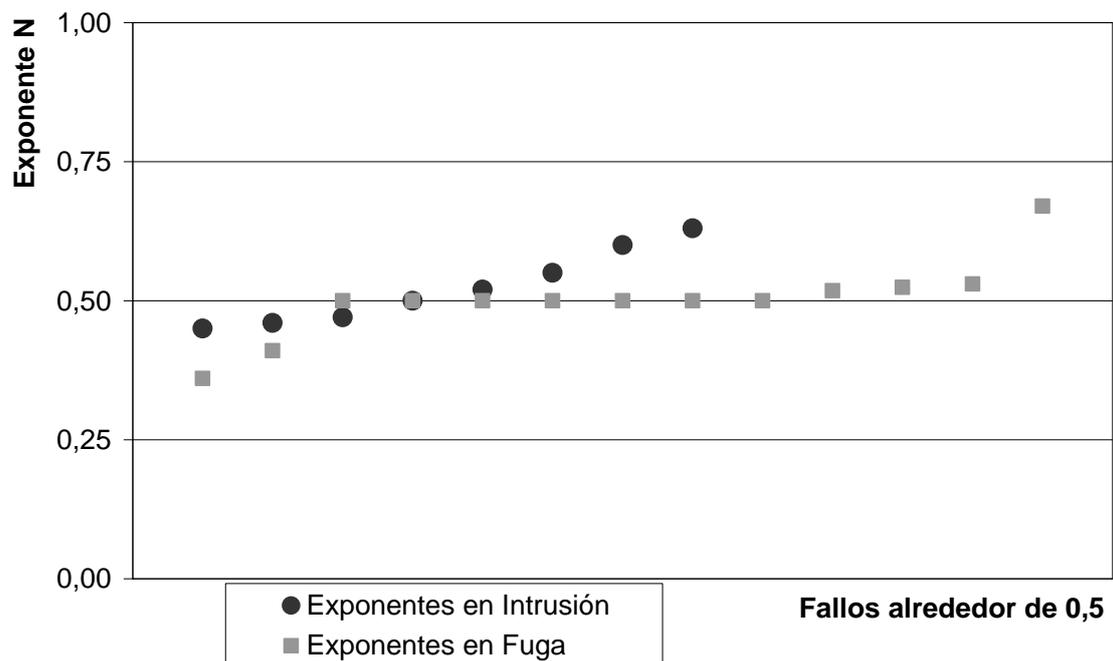


Figura 3.18 Valores de exponentes resultantes del modelo de intrusión

Con respecto a los diámetros equivalentes se constata que la geometría del fallo genera una alteración considerable en el caudal de intrusión

relacionada con la presión negativa que se ejerce en la pared de la tubería y en el propio fallo. La forma de éste juega un papel importante en la entrada de flujo exterior. Se consigue menos caudal de entrada con formas más alargadas y se aumenta el caudal cuando la sección es transversal a la tubería. En base a esto se propone una metodología para determinar la variación de las aperturas del fallo durante el evento de intrusión.

### 3.6 Variación de los fallos durante la intrusión

En tuberías plásticas, los fallos lineales tienden a deformarse cuando ésta está sometida a carga de trabajo. En base a la teoría FAVAD esta deformación se capta mediante el exponente de la relación potencial entre el caudal y la presión. En el modelo físico realizado para el caso de la intrusión las variaciones del exponente fueron entre el -5% y +25% del valor de 0,50.

Se propone estimar cuanto ha sido la variación de las áreas de los fallos longitudinales y transversales en base al coeficiente de descarga análogo al de los fallos circulares, considerando el número de Reynolds que se presenta para los caudales de intrusión.

Primero se calculó el coeficiente que llamaremos de intrusión ( $C_{di}$ , análogo al coeficiente de descarga) para los fallos circulares. A partir de la Ecuación [5], se obtiene  $C_{di}$  en función del caudal de intrusión, el área y el diferencial de la presión de intrusión.

$$C_{di} = \frac{Q}{A \cdot \sqrt{2g\Delta P}} \quad [5]$$

Se grafica  $C_{di}$  con el Número de Reynolds correspondiente a cada caudal de intrusión obteniendo lo siguiente (Figura 3.19).

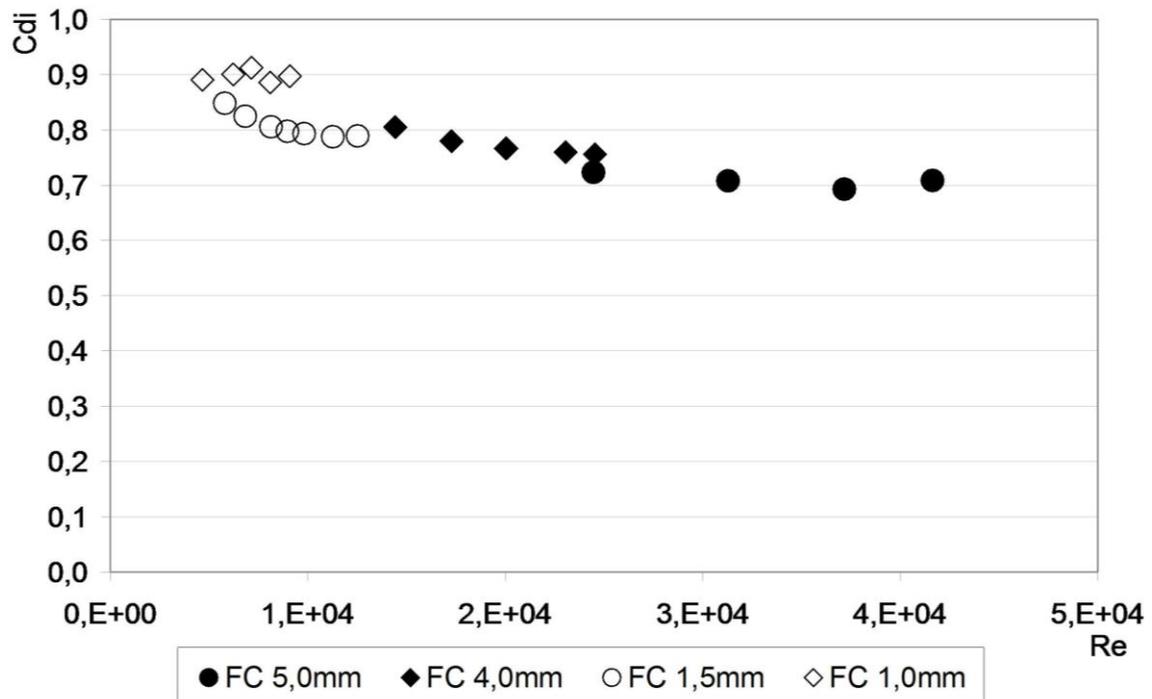


Figura 3.19 Coeficiente de descarga de los fallos circulares

Los orificios de 5; 4 y 1,5mm presentan valores entre 0,8 y 0,7. Para valores pequeños de Reynolds el coeficiente de descarga tiende a crecer. Para el caso del orificio de 1mm el coeficiente de descarga presenta un comportamiento lineal, manteniendo valores alrededor de 0,9.

A partir del área medida en los fallos longitudinal y transversal se obtiene un ancho equivalente para obtener una geometría rectangular. Con el área rectangular se calcula el diámetro hidráulico con la ecuación de Huebscher [4]. En la Tabla 3.9 se muestran las características calculadas de los fallos y el número de Reynolds para cada escenario.

Tabla 3.9 Características de los fallos y Número de Reynolds

Tipo de fallo	L (m)	A med* (m <sup>2</sup> )	B equiv (m)	Pm (m) - Dif <sup>+</sup>	Dh (m)	Esc	V <sub>intrusión</sub> (m/s)	Re
FL 04	0,004	1,12×10 <sup>-6</sup>	2,8 ×10 <sup>-4</sup>	8,56×10 <sup>-3</sup>	9,73×10 <sup>-4</sup>	1	6,9	6.677
				-		2	8,3	8.121
				0,0%		3	10,2	9.881
						4	11,2	10.852
FL 44	0,044	6,25×10 <sup>-6</sup>	1,4×10 <sup>-4</sup>	8,93×10 <sup>-2</sup>	1,59×10 <sup>-3</sup>	1	0,15	244
				-		2	0,18	284
				0,2%		3	0,21	331
FT 03	0,003	1,37×10 <sup>-6</sup>	4,4×10 <sup>-4</sup>	7,15×10 <sup>-3</sup>	1,15×10 <sup>-3</sup>	1	4,1	4.693
				-		2	4,6	5.356
				4,1%		3	5,8	6.713
						4	6,7	7.686
FT 48	0,048	1,02×10 <sup>-5</sup>	2,1×10 <sup>-4</sup>	9,70×10 <sup>-2</sup>	2,10×10 <sup>-3</sup>	1	6,6	13.937
				-		2	8,2	17.278
				0,3%		3	10,1	21.170
						4	11,2	23.484
						5	12,5	26.355

\* El área equivalente de sección rectangular (L × B) es igual al área medida

+ Se muestra la variación del perímetro mojado medido con el del área rectangular propuesta

A partir de estos datos se calcula un  $C_{di}$  equivalente al  $C_{di}$  resultante de los fallos circulares. El  $C_{di}$  equivalente se obtiene en base al Número de Reynolds que se ha calculado para cada fallo y haciendo variar el ancho (B) equivalente. Se presentan los siguientes resultados (Tabla 3.10).

Tabla 3.10  $C_{di}$  equivalente de los fallos longitudinales y transversales

Tipo de fallo	$C_{di}$ Objetivo	B nuevo (m)	Escenario	V <sub>intrusión</sub> (m/s)	Re	$C_{di}$ Ajustado
FL 04	0,81	3,47×10 <sup>-4</sup>	1	5,5	6.138	0,81
			2	6,7	7.465	0,77
			3	8,2	9.084	0,82
			4	9,0	9.976	0,83
FL 44	0,90	4,58×10 <sup>-6</sup>	1	4,7	881	0,88
			2	5,5	1.027	0,89
			3	6,4	1.194	0,93
FT 03	0,003	3,31×10 <sup>-4</sup>	1	5,4	4.693	0,78
			2	6,1	5.356	0,76
			3	7,7	6.713	0,83
			4	8,8	7.686	0,86

			1	3,1	10.503	0,75
			2	3,9	13.020	0,75
FT 48	0,048	$4,46 \times 10^{-4}$	3	4,7	15.954	0,79
			4	5,3	17.697	0,77
			5	5,9	19.861	0,79

Las áreas de los fallos calculadas con el ajuste de  $C_{di}$  trabajando a presión negativa en la tubería presentan las siguientes modificaciones (Tabla 3.11).

Tabla 3.11 Variación del área respecto al  $C_{di}$  ajustado

Tipo de fallo	Variación (%)	Observaciones
FL 04	+24	El área ajustada es mayor en una cuarta parte respecto al área medida en la superficie de la tubería. Debido a las dimensiones del fallo, probablemente la apertura en el interior del fallo no sea equivalente a la que se observa en la superficie.
FL 44	-97	Con el ajuste de $C_{di}$ , el área podría estarse cerrando casi en su totalidad durante la simulación debido a la longitud y a lo angosto del fallo
FT 03	-24	Al igual que el fallo FL 04, la variación en la medición pueda deberse a la diferencia que se presenta entre el área en la superficie de la tubería y el área en el interior del fallo.
FT 48	+112	El resultado presentado por este fallo con el ajuste del coeficiente muestra que el área durante el evento de intrusión puede ser mucho mayor.

Esta metodología se ha implementado para contabilizar cuánto podrían variar los fallos en base al ajuste del coeficiente de descarga. En el caso de la variación de los fallos de grandes dimensiones el área de intrusión puede variar con la carga de la presión de intrusión debido a que estos tienden a tener una deformación por la longitud y anchura de la apertura. Mientras que los fallos de pequeñas dimensiones se pueden considerar como rígidos; sin que sean alterados por la carga de presión debido a la sección pequeña que presentan respecto al espesor de la tubería.

### 3.7 La Intrusión con un Medio Exterior Poroso

Además de realizar trabajos en condiciones donde el medio exterior es agua, también se ha realizado una prueba para observar la relación potencial de intrusión que se presenta cuando el medio exterior está compuesto por un medio poroso y saturado. Esto es importante porque el prototipo será mucho más cercano a las condiciones en las que se presentan las instalaciones. La relación de la intrusión con el medio poroso es un tema en el que se muestran menos aportaciones de manera experimental en este aspecto (Collins *et al.*, 2010).

La prueba se realiza con el fallo circular de 1,0mm de diámetro; El material granular es arena de composición granulométrica (anexo 6-a) como se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Granulometría mayoritaria del medio poroso

Tamiz UNE (mm)	Pasa en muestra total (%)	Material entre tamices (%)
20	100	-
12,5	97,0	3,0
10	95,8	1,2
6,3	91,2	4,6
5	88,7	2,4
2	30,0	58,8
1,25	0,3	29,6

La mayoría del material se encuentra entre los tamices de 5 y 1,25mm (88,4%). Realizando el procedimiento planteado para la modelación física se obtienen resultados de la simulación con el medio poroso saturado y se muestran junto con la simulación del fallo de 1,0mm de diámetro (Figura 3.20). Se observa la disminución del caudal y de la relación potencial de intrusión.

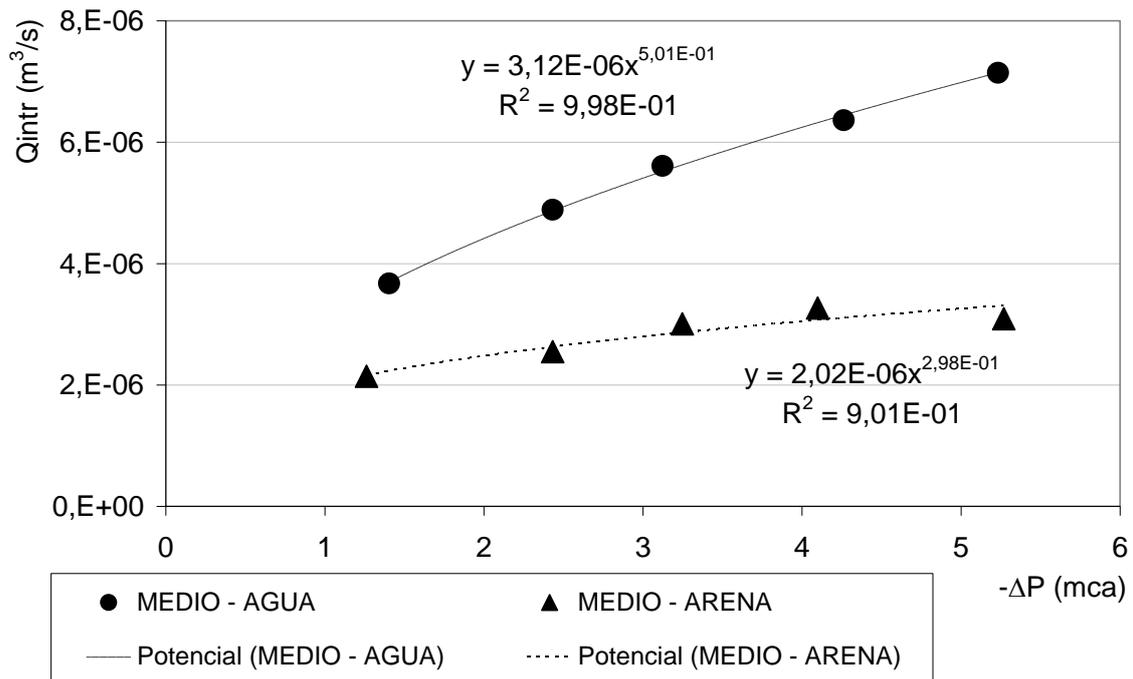


Figura 3.20 Relación potencial con el modelo del medio poroso

Con respecto a los resultados en el medio poroso, se comparan con los resultados sin suelo en base a la relación potencial entre la presión dentro de la tubería con el caudal de intrusión debido a que el fenómeno hidrodinámico que interesa es el que se presenta en el fallo de la tubería. De esta manera, se observa una disminución del exponente de 0,50 a 0,30.

Las ecuaciones potenciales obtenidas se comparan en el rango de:  $x_{min}=1,4mca$   $x_{máx}=5,2mca$ ; si integramos las ecuaciones potenciales resultantes:

$$y = 3,12 \times 10^{-6} x^{0,5}$$

$$y = 2,02 \times 10^{-6} x^{0,3}$$

En base a los resultados, el área bajo la curva de la ecuación del medio poroso representa un 44% del área bajo la curva del ensayo con agua. La disminución del caudal de intrusión es considerable.

De esta forma se han realizado las simulaciones experimentales en el modelo físico de la intrusión en estado permanente. Se ha ensayado ocho fallos diferentes para representar los caudales equivalentes a fugas de fácil y difícil detección. Además se han ensayado fallos longitudinales y transversales, proponiendo una alternativa para la verificación de la variación del área de intrusión durante la simulación. Finalmente se ha realizado un escenario con material poroso en el exterior para representar de mejor manera las condiciones que se presentan en campo.

La modelación experimental será representada de forma numérica con el objetivo de obtener los modelos representativos de intrusión y con ello plantear diversos eventos con la modelación numérica validada a partir de las simulaciones experimentales.

### **3.8 Aplicación del Modelo CFD**

En esta etapa del modelo se realizan simulaciones numéricas con dos objetivos. El primero es obtener escenarios diversos con las consideraciones planteadas en el modelo experimental. El segundo es definir un modelo numérico para la representación de las simulaciones en estado no permanente.

Las simulaciones numéricas se realizan mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, siglas en inglés) con el programa comercial Cd-Adapco™.

#### **3.8.1 Dinámica de fluidos computacional**

El modelo matemático de CFD está basado en la solución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Resuelve las ecuaciones de conservación

de masa [6] y cantidad de movimiento [7] considerando fenómenos turbulentos. Los flujos turbulentos requieren de un tratamiento específico de las ecuaciones de la mecánica de fluidos, la predicción de las características del flujo se realiza mediante diferentes aproximaciones.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad [6]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad [7]$$

donde  $u_i$  es la componente unidimensional de velocidad,  $p$  es la presión,  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\rho$  es la densidad. La solución de estas ecuaciones proporciona campos de presión y velocidad al ser desarrolladas por medio de la dinámica de fluidos. La mayoría de los flujos se presentan en regímenes turbulentos, realizar esta representación de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento requiere de tratamientos como los que se describen a continuación.

Los métodos de Simulación Numérica Directa (DNS, siglas en inglés) representan los movimientos turbulentos a pequeña escala para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes por lo que requieren de una discretización suficientemente fina.

Las Simulación de Grandes Turbulencias (LES, siglas en inglés) se han desarrollado para reducir la capacidad de cálculo al no incluir las pequeñas turbulencias, la aproximación se basa en que las grandes turbulencias son normalmente anisótropas y dependen de la geometría del campo de flujo (Ruiz, 2004).

Por otro lado, se han desarrollado diversos tipos de modelos para representar la turbulencia media. En este sentido se realiza un enfoque a una escala de tiempo superior que el del movimiento turbulento, calculando entonces este movimiento promediando las ecuaciones de flujo. Dependiendo del tipo de problema y los objetivos de la modelación se ajusta uno u otro modelo.

En el presente caso de estudio se utilizan los modelos basados en las Ecuaciones Promediadas de Navier-Stokes (RANS, siglas en inglés) en cortos intervalos de tiempo; para las aplicaciones en hidráulica, como es en este caso para flujos incompresibles a presión donde se buscan obtener resultados basados en el balance de masa y en campos de velocidades, este tipo de modelos son suficientes para la representación de la hidrodinámica aplicada (Gualtieri *et al.*, 2009). Para considerar de la turbulencia, los valores de la velocidad se aplican como la suma de un valor medio más una componente fluctuante o pulsátil [8], la cual es la llamada descomposición de Reynolds. Hacer el promedio de Reynolds se reduce el número de grados de libertad del problema, puesto que los pares que constituyen las tensiones de Reynolds se relacionan con nuevas variables.

$$u_i = \overline{U}_i + u_i' \quad [8]$$

En la cual el valor  $i$  representa la componente en la dirección  $i$ , la componente promediada representa el valor medio y la componente tildada representa el valor fluctuante. Esta variable fluctuante es diferente para cada instante de tiempo por lo que hace complejo al sistema de ecuaciones al introducir un mayor número de incógnitas. Por lo que las ecuaciones de

conservación de masa y cantidad de movimiento quedan de la siguiente forma; [9] y [10].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{U}_i) = 0 \quad [9]$$

$$\frac{\partial \rho(\bar{U}_i + u_i')}{\partial t} + (\bar{U}_j + u_j') \frac{\partial [\rho(\bar{U}_i + u_i')]}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial (\bar{U}_i + u_i')}{\partial x_j} \right] + F_{x_i}^{ext} \quad [10]$$

donde  $g_i = (0, 0, -g)$ .

Para conocer las velocidades medias, ya sea de forma euleriana (a partir de un período de tiempo establecido en un punto dado) o lagrangiana (en una línea de flujo en un instante dado) se debe promediar el sistema de ecuaciones con respecto al tiempo, por lo que el valor medio de las componentes fluctuantes se hace cero, por lo que el sistema de ecuaciones queda de la siguiente forma; [11] y [12].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho(\bar{U}_i) = 0 \quad [11]$$

$$\frac{\partial \rho(\bar{U}_i)}{\partial t} + (\bar{U}_j) \frac{\partial \rho(\bar{U}_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho(\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} = \rho g_{x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) + F_{x_i}^{ext} \quad [12]$$

El sistema de ecuaciones actual presenta un producto resultado de las componentes fluctuantes promediado, por lo que se genera una variable independiente más en el sistema ( $\bar{U}_i$ ,  $p$  y  $\overline{u_i' u_j'}$ ) provocando lo que se conoce como problema de cierre (López, 2001). El producto promediado de las velocidades fluctuantes se conoce como tensiones (cinéticas) de Reynolds y representa el transporte de cantidad de movimiento provocado por las fluctuaciones turbulentas de la velocidad.

Las ecuaciones que se establecen para solucionar el problema se expresan en términos de variables promediadas, ignorando las componentes fluctuantes de los campos de velocidad instantáneos se han desarrollado dos formas básicas de modelos de turbulencia basados en el concepto de viscosidad turbulenta, se pueden distinguir modelos de una o de dos ecuaciones (Wilcox, 2002).

Para abordar este problema se introducen algunas ecuaciones algebraicas con las que se obtiene el mismo número de ecuaciones que de incógnitas. Dependiendo del conjunto de ecuaciones que se añadan, tendremos soluciones de cierre de primer orden (una ecuación más) o de segundo orden (Hanjalić, 2004).

Una solución se hace en base a la analogía entre los esfuerzos viscosos y los esfuerzos turbulentos de las componentes de las tensiones de Reynolds. Así, éstos últimos pueden ser expresados mediante términos de un coeficiente de viscosidad efectiva o aparente ( $K_{ij}$ ).

$$-\overline{u_i' u_j'} = K_{ij} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} \quad [13]$$

Por lo que al realizar la analogía con la expresión newtoniana para la viscosidad real, quedan representadas las componentes fluctuantes y todos los términos en [11] y [12] referidos a valores medios. Por lo que los modelos de cierre de primer orden suponen que las variaciones turbulentas de las magnitudes consideradas se relacionan directamente con la velocidad media de la misma forma que lo hacen las tensiones newtonianas con el concepto de la viscosidad.

Esta solución para el problema de cierre no es la única y se presentan otras soluciones más complejas. Entre ellas se presentan hipótesis de cierre que proponen ecuaciones adicionales para el conocimiento de términos no lineales de las componentes de Reynolds. Entre las más comunes y en la cual se basa el modelo de turbulencia que se utiliza en este trabajo es mediante el cierre de segundo orden  $k-\varepsilon$ , (Launder y Spalding, 1972) donde la energía cinética turbulenta se define como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_j'} \quad [14]$$

A partir de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y mediante el concepto propuesto por Boussinesq donde los esfuerzos turbulentos son proporcionales a los gradientes de velocidad medios, análogo a los esfuerzos viscosos en flujos laminares. Se desarrolla la expresión [15] para considerar las tensiones de Reynolds.

$$\overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad [15]$$

donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker y  $\nu_t$  es la viscosidad aparente o turbulenta que se define en la expresión [16]

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad [16]$$

Donde  $C_\mu$  se obtiene de forma empírica y tiene un valor aproximado a 0,09.  $\varepsilon$  es una nueva variable, llamada disipación de energía cinética turbulenta o disipación viscosa y se expresa como se muestra en [17]

$$\varepsilon = \nu \frac{\overline{\partial u_i' \partial u_j'}}{\partial x_i \partial x_j} \quad [17]$$

De esta manera queda cerrado el sistema de ecuaciones en la propuesta de segundo orden  $k-\varepsilon$  [18] y [19].

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} (\overline{u_i' u_j'}) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial [(v_t / \sigma_k) \partial \varepsilon / \partial x_j]}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad [18]$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -(\overline{u_i' u_j'}) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial [(v_t / \sigma_\varepsilon) \partial k / \partial x_j]}{\partial x_j} - \varepsilon \quad [19]$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes empíricas con valores de 1,44 y 1,92 respectivamente.  $\sigma_k$  presenta un valor de 1 y  $\sigma_\varepsilon$  es otra constante que normalmente presenta valores entre 1 y 1,3 (López, 2001); para el caso del modelo “*Realizable k-ε*” que se usará para la modelación en este trabajo se utiliza el valor de 1,2.  $\sigma_\varepsilon$  en zonas cercanas a la pared se define como se muestra en la ecuación [20]

$$\frac{1}{\sigma_\varepsilon} = \frac{C_\mu^{1/2} (C_2 - C_1)}{K^2} \quad [20]$$

$K$  es la constante de Von-Karman equivalente a 0,4.

Con este sistema de ecuaciones se obtienen los valores medios de las velocidades y los términos no lineales de las tensiones de Reynolds. Como se ha mencionado, en el presente trabajo se utiliza una variación del modelo  $k-\varepsilon$  descrito en los párrafos anteriores. El modelo “*Realizable k-ε*” es una variante en el programa STAR-CCM+ (2008) el cual se utiliza para la modelación en CFD de este trabajo. Este modelo fue desarrollado por Shih *et al.* (1994),

contiene una propuesta en la ecuación de transporte para la tasa de disipación turbulenta  $\varepsilon$ . Además, se propone que el coeficiente  $C\mu$  esté en función del caudal medio y de las propiedades de la turbulencia, el cual se asume como constante en el modelo  $k-\varepsilon$  estándar. Con esta modificación se permite que el modelo satisfaga ciertas limitaciones matemáticas en las tensiones normales consistentes con la física de la turbulencia. Esta modificación ha sido contrastada con observaciones experimentales en capas límite (STAR-CCM+, 2008). Con respecto a las dos capas (*two-layer model*), se propuso por Rodi (1991), en este modelo se divide la aproximación de la subcapa viscosa en dos capas numéricas. En la adyacente a la pared,  $\varepsilon$  y  $\mu_t$  son funciones de la distancia con ésta misma. Los valores de  $\varepsilon$  en la capa cercana a la pared son mezclados suavemente con los valores calculados de la solución de la ecuación de transporte lejos de ella. La ecuación de la energía cinética turbulenta se resuelve en todo el flujo, lo que permite el uso de mallas finas para la subcapa viscosa.

Las expresiones propuestas para el transporte en el modelo “*Realizable k-ε*” descrita en STAR-CCM+ (2008) se muestran en las expresiones [21] y [22]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (v - v_g) \cdot da = \\ & = \int_A \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \cdot da + \int_V [G_k + G_b - \rho(\varepsilon + Y_M)] dV \end{aligned} \quad [21]$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varepsilon dV + \int_A \rho \varepsilon (v - v_g) \cdot da = \\ & = \int_A \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \cdot da + \int_V \left[ C_{\varepsilon 1} S \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 3} G_b - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \right] dV \end{aligned} \quad [22]$$

Donde  $G_k$  es la producción turbulenta y  $G_b$  es la producción de energía debida a la flotación,  $Y_M$  es la disipación por dilatación y  $C_{\varepsilon 2}$  es una constante con valor de 1,9 y  $C_{\varepsilon 3}$  toma el valor de 1 para  $G_b \geq 0$  ó 0 cuando  $G_b < 1$ . Mientras que  $C_\mu$  se obtiene mediante la expresión [23]

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^{(*)} \frac{k}{\varepsilon}} \quad [23]$$

El cual se obtiene a partir de  $U^{(*)} = \sqrt{(S:S - W:W)}$  donde  $S$  y  $W$  son tensores de tensión y rotación;  $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$  y  $A_0$  es equivalente a 4,0.

En este caso además se utilizará el modelo de transporte llamado “*Passive scalar*” (STAR-CCM+, 2008). Se describe en la ecuación [24]. Por lo que la ecuación de conservación toma la siguiente forma general:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \oint_A \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \phi \right] \cdot d\mathbf{a} + \int_V S_\phi dV \quad [24]$$

donde  $\sigma$  es el número molecular de Schmidt y  $\sigma_t$  es el número turbulento de Schmidt. El número molecular es una propiedad del material, mientras que el número turbulento se asume con un valor constante de 0,9; consistente con el número turbulento de Prandtl utilizado para la energía.  $S_\phi$  es un término de fuente adicional.

En las paredes puede utilizarse una condición de frontera de Neumann [25] o una condición tipo Dirichlet.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_w = 0 \quad [25]$$

La representación numérica del medio poroso en el modelo CFD se hace con la relación llamada “*Porous Source*” (STAR-CCM+, 2008), donde las propiedades de la porosidad se especifican a partir de la ecuación [26].

$$F_p = -P \cdot v \quad [26]$$

donde  $P$  es el tensor de la resistencia porosa, y  $v$  es la velocidad a través del medio. El tensor  $P$  se expresa de la siguiente manera [27]

$$P = P_v + P_i |v| \quad [27]$$

donde  $P_v$  es el tensor de resistencia debida a la viscosidad lineal y  $P_i$  es el tensor de resistencia inercial (cuadrático).

Por lo que se deben definir estos dos parámetros que determinan las características del medio poroso utilizado en nuestro caso para validar el modelo y posteriormente realizar escenarios con material poroso exterior que se usa en campo.

La metodología a seguir por los códigos CFD pueden presentar los pasos que a continuación se describen:

1. Planteamiento formal de las ecuaciones de gobierno del flujo sobre todos los volúmenes en que ha sido definida la malla.
2. Discretización de estas ecuaciones, lo cual implica la sustitución de aproximaciones de diferencias finitas para los términos que están siendo integrados en el interior de los volúmenes de control. En este momento se tiene un sistema de ecuaciones algebraico.

3. Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método numérico.
4. Tratamiento de los datos de salida mediante procesos de calibración y validación de las experiencias realizadas.

En estos casos, En el modelo se distinguen tres etapas principales (López *et al.*, 2005), como se muestra en la Figura 3.21.

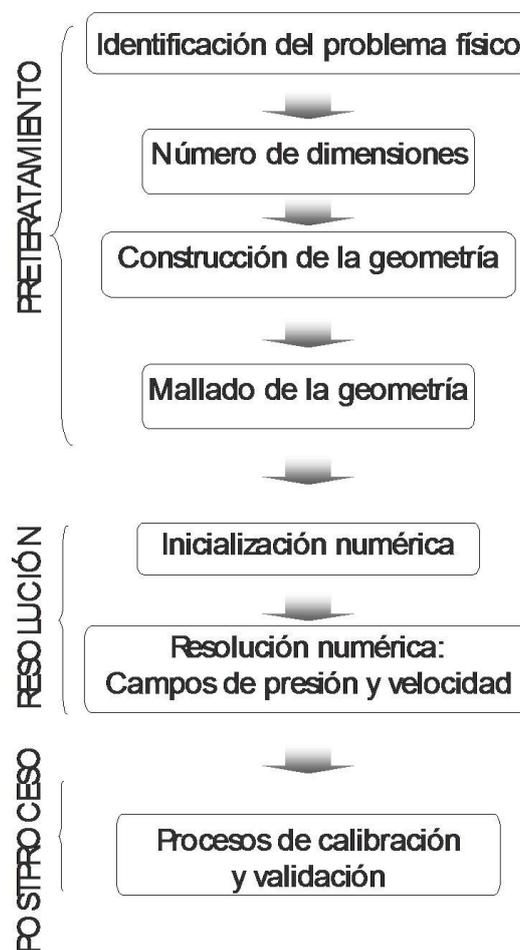


Figura 3.21 Metodología para el modelado con CFD

El método numérico se resuelve con la técnica de volúmenes finitos (López *et al.*, 2005). La solución para un problema de flujo se calcula en los nodos dentro de las celdas. La precisión del resultado depende de la propia

definición de los nodos. La parte del tiempo se invierte en la definición de la malla. Hay que encontrar el óptimo entre el menor número de nodos y la precisión en los resultados, tomando en cuenta el coste y tiempo de computación para estar en el punto óptimo de gestión de recursos.

A continuación se realiza la aplicación del modelo CFD al modelo de intrusión en estado permanente, describiendo cada parte del proceso de modelación numérica.

### 3.8.2 CFD aplicado a la Intrusión permanente

La aplicación del modelo CFD se describe para los escenarios del fallo circular de 4mm. Se hará la validación de los resultados y se realizarán las verificaciones necesarias para obtener un modelo adecuado. La metodología empleada se describirá para este fallo; además se ha realizado para los fallos circular de 1mm; los fallos longitudinal y transversal, de 44 y 48mm respectivamente. Así como la representación numérica de los escenarios con el medio poroso. Por lo que se realizarán cinco ensayos como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Ensayos de intrusión en estado permanente

<b>Escenario</b>	<b>Fallo</b>	<b>Dimensión (mm)</b>	<b>Medio Exterior</b>
1	circular	4	líquido
2	circular	1	líquido
3	longitudinal	44	líquido
4	transversal	48	líquido
5	circular	1	poroso

En cuanto a las características del fluido (Tabla 3.14) se trabaja con los valores por defecto debido de la proximidad con los valores de temperatura medida del agua durante los ensayos experimentales. La temperatura media en

la tubería fue de 25,5°C; mientras que la temperatura del agua exterior media fue de 22,7°C. Durante los ensayos, la diferencia de temperaturas entre el agua de la tubería con el agua en el exterior variaba entre 0,6°C y 4,8°C; tanto el agua en la tubería como en el exterior se incrementaban con el tiempo del ensayo, la de la tubería aumentaba más rápido debido al equipo de bombeo de mayores dimensiones, por ello la diferencia de las temperaturas medias.

Tabla 3.14 Características del agua para el modelo numérico

Temperatura del Agua	Densidad, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad Dinámica, $\mu$ (N·s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad Cinemática, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
20	998,2	$1,102 \times 10^{-3}$	$1,003 \times 10^{-6}$
25	997,0	$0,890 \times 10^{-3}$	$0,893 \times 10^{-6}$
Valores por defecto	997,561	$0,887 \times 10^{-3}$	$0,889 \times 10^{-6}$

\*Metcalf y Eddy, Inc. Ingeniería Aguas Residuales. Mc Graw Hill 3ª edición (1995)

El volumen de control considera un tramo de tubería en donde se presenta el fallo y una zona exterior de donde se ingresa el caudal de intrusión (Figura 3.22). La tubería tiene un diámetro interior medido de 0,0272m con un espesor de pared de 0,0024m.

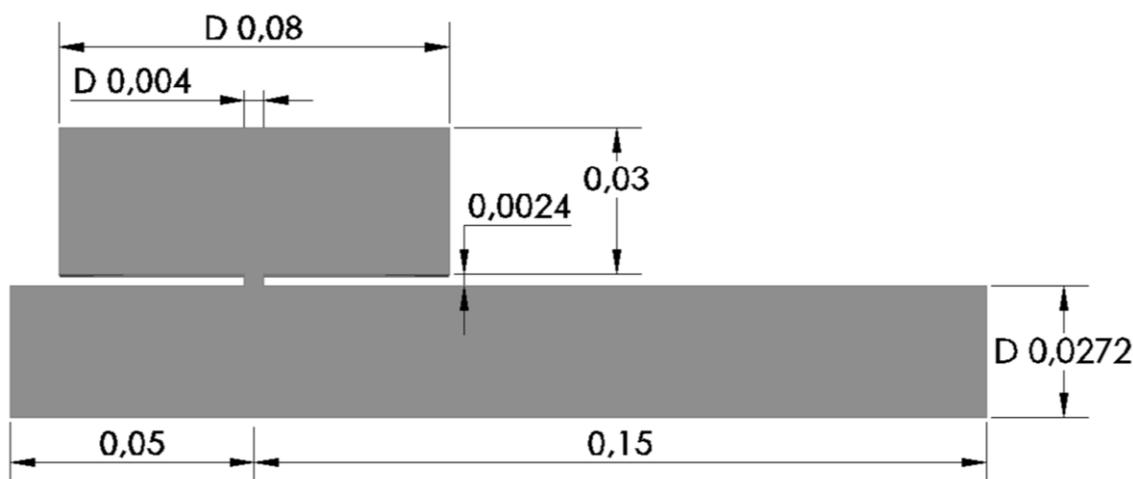


Figura 3.22 Geometría del volumen de control (cotas en metros)

Para establecer las extensiones del volumen de control se han realizado diversas pruebas, en las que finalmente se han ajustado valores para la optimización del propio volumen y su mallado. El tramo de tubería se simula en 0,20m; hacia aguas arriba del fallo se definió una distancia de 0,05m y hacia aguas abajo del fallo de 0,15m. El exterior de la tubería presenta una altura de 0,03m con un diámetro de 0,08m.

Se usan cinco tipos de condiciones de contorno, dos entradas de fluido, una salida de caudal, fronteras de pared y una cara simétrica a lo largo de la tubería (Figura 3.23).

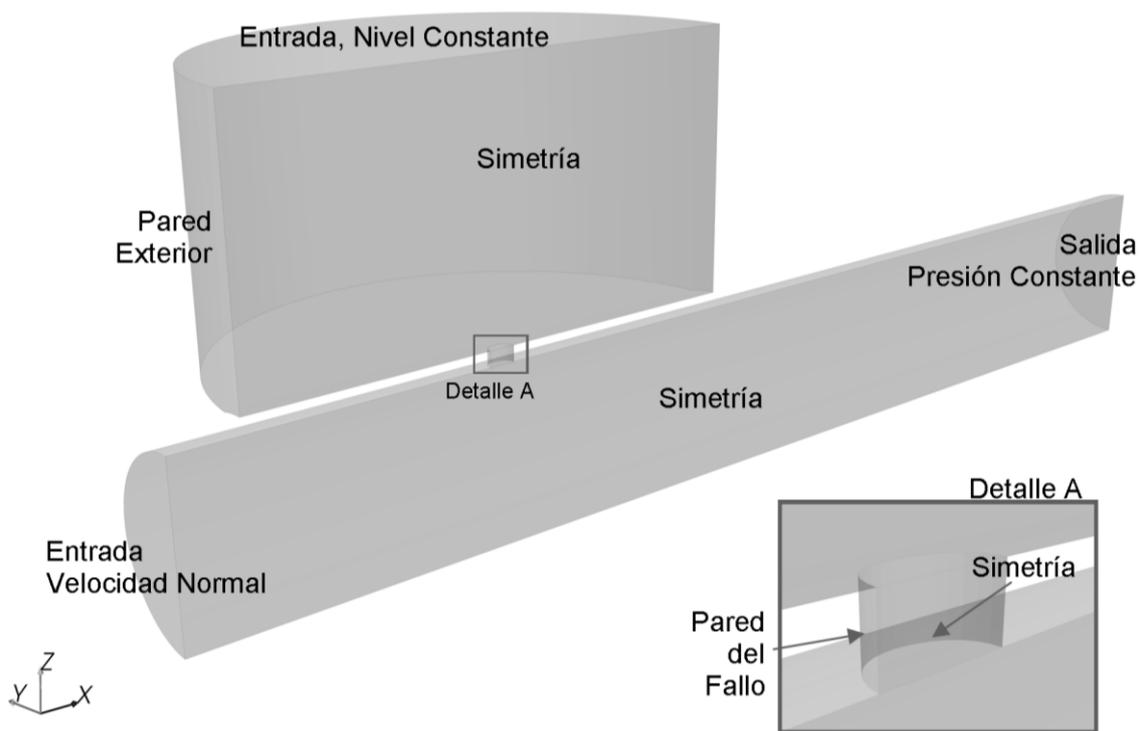


Figura 3.23 Fronteras del volumen de control (fallo circular 4mm)

Una entrada está en la tubería y representa el caudal que circula en ella, se especifica con velocidad normal a la frontera (*Velocity Inlet*). La entrada del medio exterior se encuentra en la parte superior de la región exterior y está representada con una frontera de carga (*Stagnation Inlet*), ésta representa el

nivel de la superficie libre del agua en el depósito que contiene la tubería. La frontera de salida está representada con una carga de presión (*Pressure Outlet*), toma el valor de la presión de trabajo de intrusión. La frontera de pared se ha utilizado en tres elementos: la tubería, el fallo y el exterior (*type Wall*). En la pared de la tubería y en el fallo, se especifica un método de esfuerzo cortante como de no deslizamiento; en el cual el flujo cercano a la pared es laminar (tratamiento "*all y+ wall treatment*"). Mientras que la pared en el exterior es de tipo deslizamiento.

La turbulencia en las fronteras de entrada y salida se especifican con la intensidad de la turbulencia y la longitud de escala de la misma. En flujos totalmente desarrollados la intensidad de la turbulencia tiene valores entre 1 y 10%; en los valores cercanos a 1% la turbulencia es baja. De manera empírica la intensidad de turbulencia [28] puede obtenerse a partir del número de Reynolds (Fluent, 2005; Multiphysics, 2008). En base a la los caudales ensayados experimentalmente y por los Número de Reynolds obtenidos en el flujo en la tubería, la intensidad de turbulencia esta alrededor de 4,5%.

$$I_T = 0,16 Re^{-1/8} \quad [28]$$

La longitud de escala de la turbulencia también puede ser calculada para las fronteras. En base a la longitud característica de la sección transversal del flujo [29]

$$L_T = 0,07D_H \quad [29]$$

La longitud de la turbulencia en la tubería tiene un valor de 0,0019m. Mientras que en la frontera superior variará dependiendo del fallo que se simule, en el caso del fallo de 4mm de diámetro es 0,0056m. Teniendo definido

el volumen de control y las fronteras, el siguiente paso es definir la malla. La discretización espacial requiere que el dominio esté dividido por pequeños elementos. En el caso del código Cd-Adapco™ los elementos pueden ser de tipo hexaédrico, tetraédrico y poliédrico. Para prácticamente todas las simulaciones se ha elegido trabajar con los elementos son de tipo hexaédrico, aunque se han realizado diversas pruebas.

Para elegir el mallado se han realizado diversos ensayos haciendo variar la densidad de la malla para evaluar tanto la independencia de los resultados como el tamaño del archivo y en consecuencia el tiempo de cálculo. Entre los escenarios finales de malla se definen las características con las que se ha construido el mallado para el fallo circular de 4mm y que servirá de base para los demás escenarios de fallo. En la Tabla 3.15 se presentan las características de cada malla.

Tabla 3.15 Características de las mallas en el modelo permanente

<b>Malla No.</b>	<b>Longitud mínima (m)</b>	<b>Longitud tope (m)</b>	<b>Remallado en fallo (m)</b>	<b>Remallado Secundario (m)</b>	<b>Tamaño de archivo (MB)</b>
1	0,005	0,010	0,0004	0,0007	7,71
2	0,003	0,008	0,0004	0,0005	9,63
3	0,003	0,007	0,0003	0,0005	12,9
4	0,002	0,005	0,0002	0,0003	25,8
5	0,001	0,003	0,0001	0,0002	88,0
DEFINITIVO	0,002	0,010	0,0002	0,0004	21,4

La malla definitiva para el volumen de control con fallo de 4mm de diámetro presenta las siguientes características: 109.113 elementos; 322.197 caras interiores y 121.559 vértices (Figura 3.24). En la pared de la tubería y del fallo se malla con capa límite.

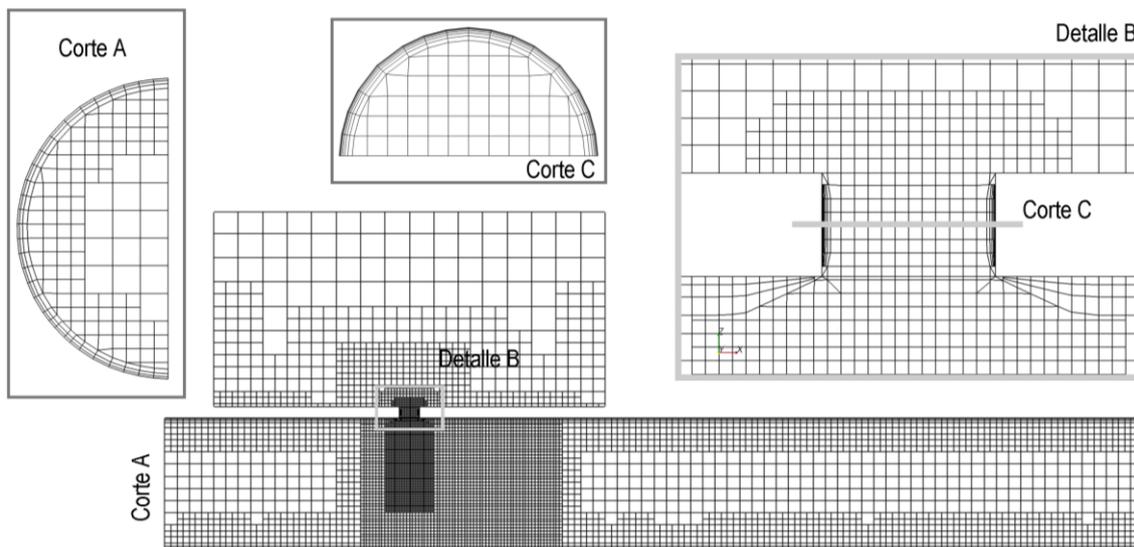


Figura 3.24 Discretización del volumen de control

Habiendo definido el esquema discreto. Se eligen los modelos para hacer la representación numérica. Se simula en estado permanente en tres dimensiones, fluido con densidad constante, resolviendo el flujo de forma segregada en segundo orden, se incluye un modelo que simula un trazador (*Passive scalar*) con el cual se le da seguimiento al fluido exterior en la simulación. En la Tabla 3.16 se muestran los coeficientes del modelo "*Realizable  $k-\varepsilon$  two-layer*". El tratamiento que se da en las fronteras de pared es "*All  $y+$  Wall Treatment*", la cual es una aproximación híbrida para los valores  $y+$ .

Para identificar el flujo de intrusión desde el medio exterior de la tubería, se trabaja con la variable que actúa como trazador, la cual se presenta en un rango de 0 a 1. El valor de 1 representa el 100% de la variable escalar pasiva en la masa de flujo que lo contenga; mientras que el valor de 0 significa que no se tiene contenido de ésta variable en el fluido. Esta variable se ha especificado para las fronteras de carga en la superficie libre y las paredes del exterior. Por lo que además del seguimiento del fluido exterior, nos proporciona el valor del trazador en la mezcla final entre el caudal de intrusión y el caudal de la tubería.

Tabla 3.16 Coeficientes del modelo *Realizable k-ε two-layer*

<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>
<i>Two-Layer ReY*</i>	60,0
<i>Two-Layer ΔReY</i>	10,0
$C_\mu$	0,09
$C_{1\varepsilon}$	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,9
$C_t$	1,0
<i>Ceta</i>	50,0
$\sigma_k$	1,0
$\sigma_\varepsilon$	1,2
<i>Sarkar</i>	2,0
<i>Secondary Gradients</i>	On

Para dar por solucionado la simulación numérica se consideran los siguientes criterios:

1. Criterio de convergencia mediante el balance de masa. Éste debe ser menor de  $1 \times 10^{-6}$  kg/s en las últimas 100 iteraciones (Figura 3.25) o al menos estable en sus valores más próximos a cero.
2. Criterio de estabilidad en los residuos de las variables. Los residuos tienen que mantener un comportamiento asintótico al eje  $x$  al menos en las últimas 200 iteraciones (Figura 3.26). Además los residuos de las variables de continuidad y de turbulencia deben ser menores a  $1 \times 10^{-3}$ .

Cumpliendo estas condiciones, las simulaciones del modelo se dan por finalizadas con una convergencia estable.

A partir del balance de masa se obtiene el caudal de intrusión. El cual es el objetivo principal de la modelación para los diversos escenarios propuestos. Se obtiene el caudal de intrusión en el fallo y se compara con los datos experimentales.

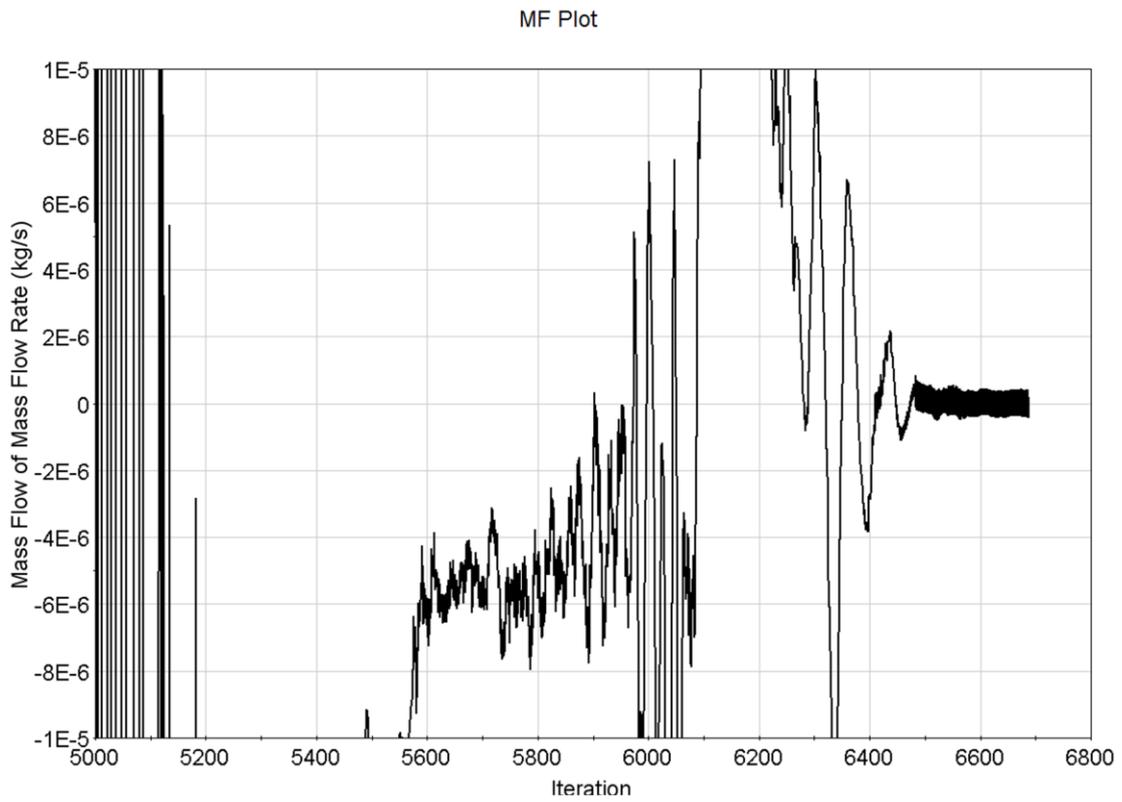


Figura 3.25 Gráfica del balance de masa

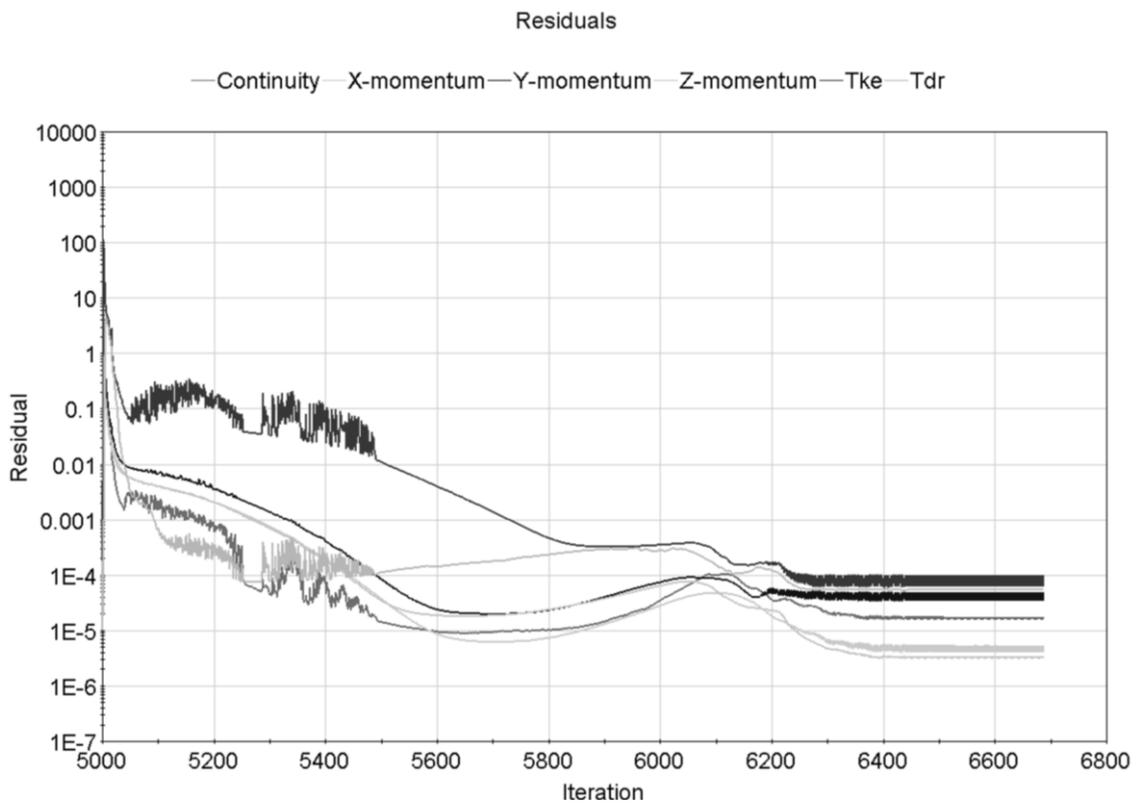


Figura 3.26 Gráfica de los residuos de las variables en el CFD

Esta metodología mostrada se realiza para los diversos tipos de fallos descritos en la Tabla 3.13.

### 3.8.3 Representación del Medio poroso en el CFD

Con respecto a la modelación del medio poroso se trabaja para representar la simulación realizada en la experimentación. Se modifica el volumen de control y se hace el volumen exterior independiente de la conducción incluyendo una interface en el fallo.

Los variables que requiere el modelo CFD para representar el medio poroso son las que se derivan del tensor de resistencia porosa en base a las características del material utilizado en el modelo experimental.

A lo largo del tiempo se han desarrollado una serie de correlaciones para representar al medio poroso a partir del tensor de resistencia (McDonald *et al.*, 1979). La correlación básica que se utiliza es la ecuación de Ahmed y Sunada, una de las formas en las que se presenta esta ecuación es como se muestra a continuación [30].

$$-\frac{\text{GradP}}{\mu V_0} = \alpha + \beta \frac{\rho V_0}{\mu} \quad [30]$$

donde, GradP es el gradiente de presión a través del espesor poroso.  $\mu$  es la viscosidad cinemática,  $\rho$  es la densidad del fluido.  $V_0$  es la velocidad del flujo en la dirección perpendicular a la sección del medio poroso.  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros en función del medio poroso y se obtienen de forma empírica a partir de las relaciones [31] y [32].

$$\alpha = \frac{A_{ER}(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot D_{eq}^2} \quad [31]$$

$$\beta = \frac{B_{ER}(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2 \cdot D_{eq}} \quad [32]$$

La ecuación más utilizada para determinar estos parámetros es la ecuación modificada de Ergun, donde los coeficientes  $A_{ER}$  y  $B_{ER}$  toman un valor de 150 y 1,75 respectivamente.  $\varepsilon$  es la fracción de vacío del medio,  $D_{eq}$  es una longitud característica del medio. Una forma de determinar  $D_{eq}$  es mediante el diámetro de la esfera media  $\bar{D}_{vs}$  [33].

$$D_{eq} \equiv \bar{D}_{vs} \equiv 6 \frac{v_p}{s_p} \equiv \phi_s \cdot \bar{D}_v \quad [33]$$

donde  $v_p$  y  $s_p$  es el volumen y la superficie de la partícula, respectivamente.  $\bar{D}_v$  es el diámetro de una esfera hipotética en base al volumen medio de las partículas reales, y  $\phi_s$  es la esfericidad, la cual es la relación del área de la superficie de la esfera hipotética con el área promedio de la superficie real de las partículas.

Cuando la granulometría es variada se considera la ecuación [34] para obtener un  $D_{eq}$  representativo del medio poroso.

$$D_{eq} = \frac{1}{\sum_i V_i / D_{eqi}} \quad [34]$$

donde  $V_i$  es la fracción del volumen del material del tamaño de la partícula  $D_{eqi}$ .

Los parámetros a determinar considerando la ecuación modificada de Ergun son los que se presentan en las siguientes relaciones [35] y [36]:

$$P_i = \beta \cdot \rho = \frac{1,75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2 \cdot D_{eq}} \cdot \rho \quad [35]$$

$$P_v = \alpha \cdot \mu = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot D_{eq}^2} \cdot \mu \quad [36]$$

Tomando en cuenta estas consideraciones, para poder aplicar el modelo de medio poroso en el CFD, se han realizado simplificaciones tales como considerar  $D_{eq}$  en base a la granulometría medida de la arena utilizada y usando la ecuación [34], el diámetro obtenido ha sido 1,8mm. Se ha medido la porosidad en muestras representativas del medio poroso, estas mediciones se han realizado de forma indirecta, sin tomar la muestra del modelo experimental, la porosidad varió entorno a 0,38. En la Tabla 3.17 se muestran los valores de los tensores en base a las características del fluido y del medio poroso.

Tabla 3.17 Tensores de porosidad

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
$\alpha$	$3,24 \times 10^8$	-
$\beta$	$1,10 \times 10^4$	-
Porosidad del medio	0,38	-
$D_{eq}$	0,0018	m
$P_i$	$1,10 \times 10^7$	$\text{kg/m}^4$
$P_v$	$2,88 \times 10^5$	$\text{Kg/m}^3 \cdot \text{s}$

Finalmente, en el modelo CFD se trabaja con los tensores  $P_i$  y  $P_v$  de resistencia inercial y por viscosidad lineal, respectivamente.

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos mediante representación numérica con CFD para los escenarios de intrusión tanto con el medio exterior líquido y con la simulación del medio poroso.

### **3.9 Resultados del Modelo CFD en Estado Permanente**

Los resultados se muestran presentando el ajuste de los caudales que circulan por la tubería y los caudales de intrusión a partir del balance de masa para los escenarios de los fallos circulares de 4 y 1mm; además de los fallos longitudinal y transversal, de 44 y 48mm respectivamente y del fallo de 1mm con el medio poroso.

#### **3.9.1 Resultados para el fallo circular de 4mm**

Los resultados del fallo circular de 4mm se muestran con los caudales de circulación en las fronteras de entrada y de salida, así como el de intrusión para los cinco escenarios simulados (Figura 3.27).

En la Figura se observan los datos puntuales que se han medido durante la modelación experimental, por un lado el caudal “ $Q$  que sale en tubo” es el caudal total que ha sido medido con el contador. El caudal “ $q$  de intrusión física” es el caudal que se ha medido de forma volumétrica durante las simulaciones. Finalmente, el caudal “ $Q$  que entra en tubo” es la diferencia entre los dos caudales anteriores. En la simulación numérica los caudales de entrada y salida son los que se miden en las fronteras de la conducción y el caudal de intrusión es el equivalente al que se mide en la frontera de la superficie libre; los tres en términos de flujo de masa.

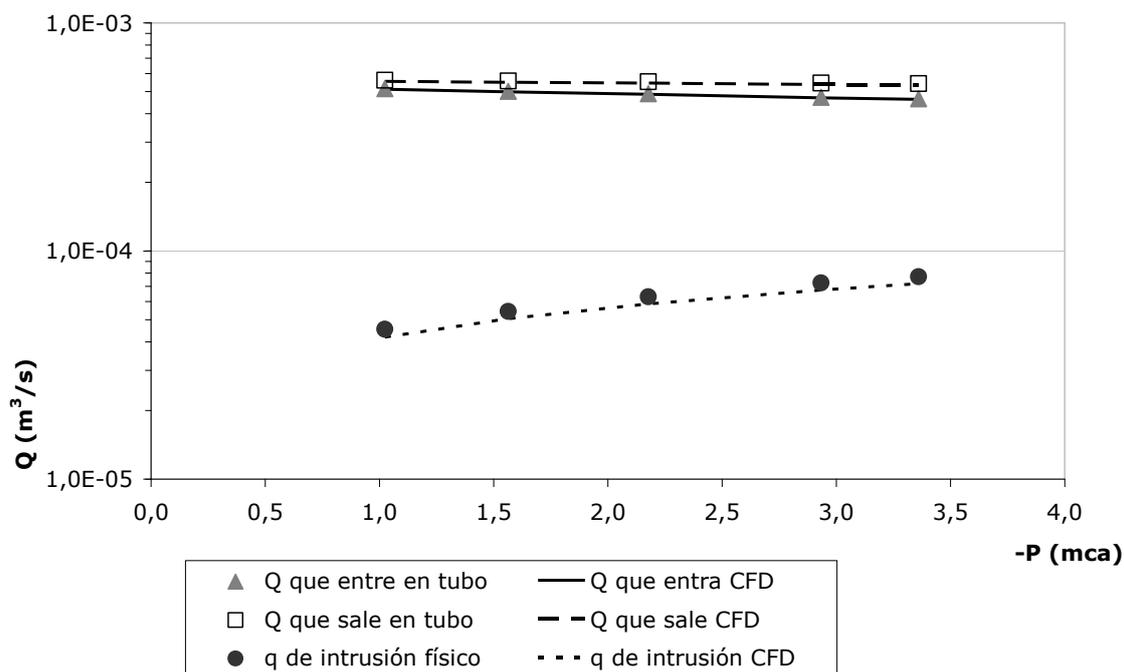


Figura 3.27 Ajuste del caudal en el modelo CFD para el orificio circular de 4mm

En la Tabla 3.18 se presentan el ajuste entre los datos experimentales y los resultados numéricos para cada escenario de presión; para obtener el ajuste se considera al caudal físico con un valor del 100% y a partir de ahí se obtiene la proporción del caudal numérico. Para el caudal de intrusión el ajuste promedio es de 92,9 y para el caudal de salida se obtiene un ajuste promedio del 98,7%.

Tabla 3.18 Resultados de los escenarios del fallo circular de 4mm

Esc presión (mca)	Q intr Físico (m³/s)	Qintr cfd (m³/s)	Ajuste intr (%)	Q sale Físico (m³/s)	Q sale cfd (m³/s)	Ajuste sale (%)
-0,7	$4,54 \times 10^{-5}$	$4,19 \times 10^{-5}$	<b>92,38</b>	$5,60 \times 10^{-4}$	$5,54 \times 10^{-4}$	<b>98,85</b>
-1,2	$5,43 \times 10^{-5}$	$5,04 \times 10^{-5}$	<b>92,93</b>	$5,56 \times 10^{-4}$	$5,49 \times 10^{-4}$	<b>98,78</b>
-1,8	$6,30 \times 10^{-5}$	$5,86 \times 10^{-5}$	<b>93,00</b>	$5,52 \times 10^{-4}$	$5,45 \times 10^{-4}$	<b>98,68</b>
-2,6	$7,24 \times 10^{-5}$	$6,74 \times 10^{-5}$	<b>93,04</b>	$5,45 \times 10^{-4}$	$5,37 \times 10^{-4}$	<b>98,57</b>
-3,0	$7,71 \times 10^{-5}$	$7,19 \times 10^{-5}$	<b>93,23</b>	$5,41 \times 10^{-4}$	$5,33 \times 10^{-4}$	<b>98,54</b>

Una forma de evaluar la convergencia del modelo numérico con respecto al modelo experimental de forma conjunta es a partir del criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe (Krause et al, 2005). Siendo éste uno de los criterios que se

utilizan con mayor frecuencia para evaluar modelos hidrológicos, en los cuales se comparan caudales medidos y simulados. Con ello se busca evaluar el modelo numérico con respecto al modelo experimental en el conjunto de los cinco escenarios simulados para cada tipo de fallo. De esa manera se proporciona una estimación cuantitativa de la capacidad del modelo numérico.

El criterio de Eficiencia ( $E$ ) propuesto por Nash-Sutcliffe en 1970 se define de la siguiente manera: uno menos la suma de la diferencia entre los valores observados y calculados al cuadrado, normalizados por la varianza de los valores observados durante el período de investigación (Krause et al, 2005) y es calculado con la ecuación [37].

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [37]$$

La eficiencia  $E$  puede presentar valores entre  $-\infty$  y  $1$ , Una eficiencia de  $1$  ( $E=1$ ) representa un ajuste perfecto del modelo a los datos observados. Básicamente, cuanto más cerca el modelo de eficiencia es  $1$ , más exacto es el modelo. En el artículo de Moriasi *et al.* (2007) se menciona que una simulación de un modelo puede juzgarse como “satisfactoria” cuando la eficiencia  $E$  es mayor a  $0,5$ . Mientras que una eficiencia menor a cero ( $-\infty < E < 0$ ) se produce cuando la media observada es una mejor predicción que el modelo numérico. Cabe señalar que este criterio puede utilizarse para describir cuantitativamente la precisión de diversos modelos, siempre y cuando se presenten datos observados para comparar los resultados del mismo.

Sustituyendo los datos en la ecuación mostrada anteriormente se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.19 para el fallo circular de 4mm.

Tabla 3.19 Resultados de Eficiencia N-S para FC 4mm

Parámetro	Valor
Caudal de intrusión	0,854
Caudal de salida	-0,086

En base a la Eficiencia de Nash-Sutcliffe, el modelo numérico en el caudal de intrusión reproduce los resultados de forma eficiente debido a que presenta un valor mayor que 0,5. Mientras que el caudal a la salida el modelo numérico es ineficiente aún cuando la diferencia entre los caudales medidos y observados en promedio presentan una diferencia de 1,3% para cada escenario.

En el modelo numérico se puede observar el comportamiento del flujo de intrusión dentro de la conducción. A partir la variable escalar (*Passive scalar*) se puede mostrar el transporte de la intrusión dentro de la conducción. En la Figura 3.28 se observa la diferencia del flujo de intrusión para los escenarios de presión máxima (-0,7mca; a la izquierda de la Figura) y mínima (-3,0mca; a la derecha de la Figura) con el fallo circular de 4mm.

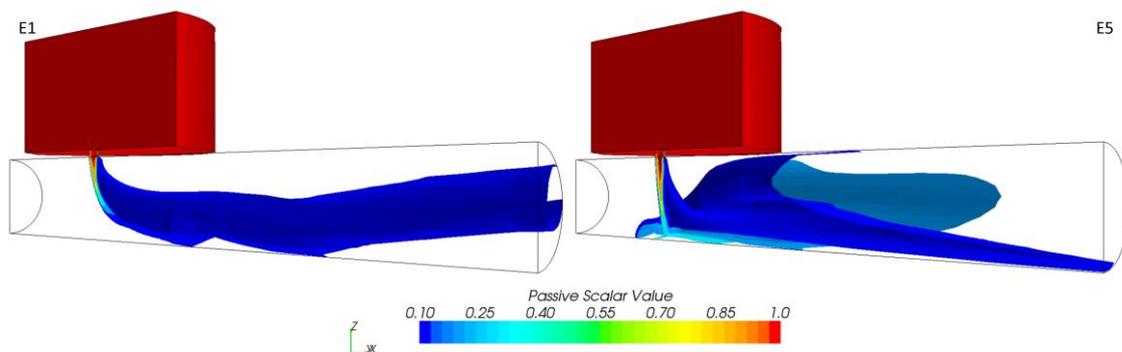


Figura 3.28 Transporte de la intrusión con el fallo circular de 4mm

La variable (*Passive scalar*) representa un trazador. Esta variable se ha especificado para el medio exterior. En la Figura anterior el trazador presenta un rango de 0,1 a 1. El valor de 1 representa el fluido exterior sin mezcla, mientras que el valor de 0,1 representa la frontera donde el fluido exterior es el 10% del flujo. Con ello se observa la pluma y el transporte en la intrusión.

El caudal de intrusión en los escenarios del fallo de 4mm representa el 8; 9 y 13% del caudal total de circulación de la conducción para las presiones medidas de -0,7; 1,2 y -3,0mca respectivamente.

### 3.9.2 Resultados para el fallo circular de 1mm

Con respecto al fallo circular de 1mm los resultados se presentan en el mismo formato, la Figura 3.29 muestra el ajuste que se ha obtenido con el modelo numérico.

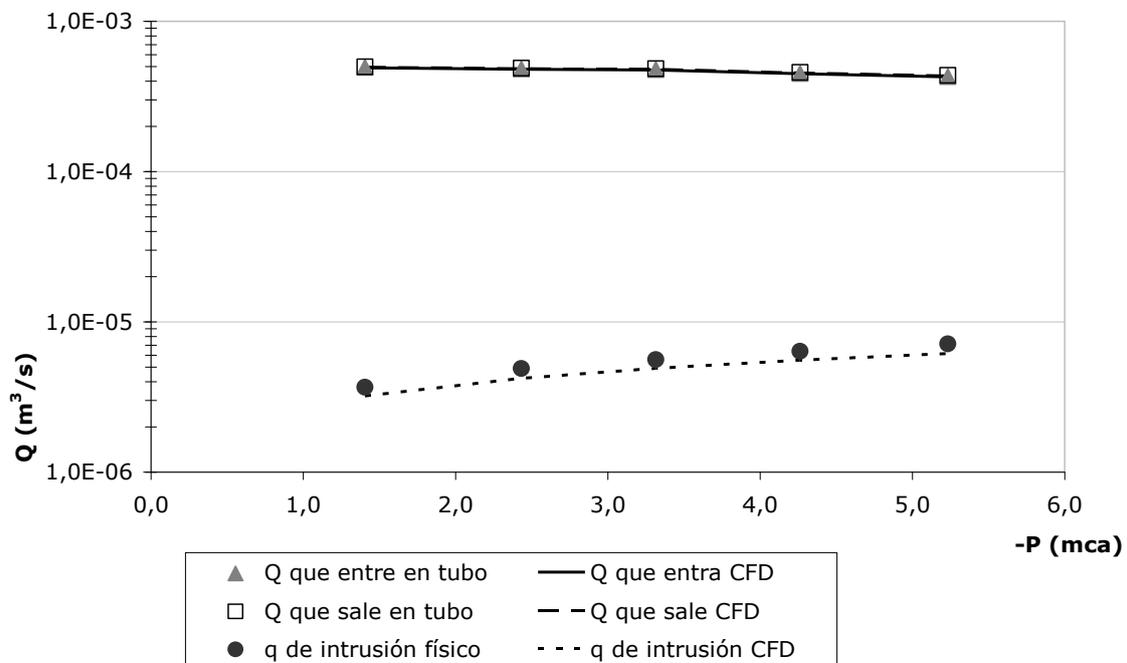


Figura 3.29 Ajuste del caudal en el modelo CFD para el orificio circular de 1mm

El ajuste de los resultados numéricos respecto a los físicos para el fallo circular de 1mm es el siguiente. En el caudal de intrusión presenta un ajuste promedio de 86,8% y en el caudal de salida de 99,3%. En la Tabla 3.20 se muestra el ajuste para cada escenario de presión.

Tabla 3.20 Resultados de los escenarios del fallo circular de 1mm

Esc presión (mca)	Q intr Físico (m <sup>3</sup> /s)	Qintr cfd (m <sup>3</sup> /s)	Ajuste intr (%)	Q sale Físico (m <sup>3</sup> /s)	Q sale cfd (m <sup>3</sup> /s)	Ajuste sale (%)
-1,0	3,67×10 <sup>-6</sup>	3,22×10 <sup>-6</sup>	<b>87,54</b>	4,98×10 <sup>-4</sup>	4,94×10 <sup>-4</sup>	<b>99,31</b>
-2,1	4,89×10 <sup>-6</sup>	4,20×10 <sup>-6</sup>	<b>86,03</b>	4,87×10 <sup>-4</sup>	4,83×10 <sup>-4</sup>	<b>99,26</b>
-3,0	5,61×10 <sup>-6</sup>	4,90×10 <sup>-6</sup>	<b>87,36</b>	4,83×10 <sup>-4</sup>	4,79×10 <sup>-4</sup>	<b>99,26</b>
-3,9	6,36×10 <sup>-6</sup>	5,55×10 <sup>-6</sup>	<b>87,22</b>	4,57×10 <sup>-4</sup>	4,53×10 <sup>-4</sup>	<b>99,24</b>
-4,9	7,14×10 <sup>-6</sup>	6,15×10 <sup>-6</sup>	<b>86,05</b>	4,36×10 <sup>-4</sup>	4,33×10 <sup>-4</sup>	<b>99,18</b>

Con respecto al criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.21 para el fallo circular de 1mm.

Tabla 3.21 Resultados de Eficiencia N-S para FC 1mm

Parámetro	Valor
Caudal de intrusión	0,604
Caudal de salida	0,975

El análisis del criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe para el fallo circular de 1mm presenta valores satisfactorios en los caudales tanto de la tubería como el de intrusión a través del fallo. Como se puede observar en la frontera de salida el criterio es sensible a los resultados en conjunto, ya que en promedio la diferencia entre los resultados numéricos con respecto a los experimentales es en promedio de 0,75%; un poco más de la mitad de lo que se obtuvo para el fallo circular de 4mm y en esta frontera la eficiencia es satisfactoria.

Las configuraciones del transporte del fluido exterior se muestran en la Figura 3.30, se presenta la diferencia entre los escenarios de presión máxima

(E1; izquierda de la Figura) y mínima (E5; derecha de la Figura). En este caso el rango de valores del trazador en la Figura es de 0,001 a 1,0.

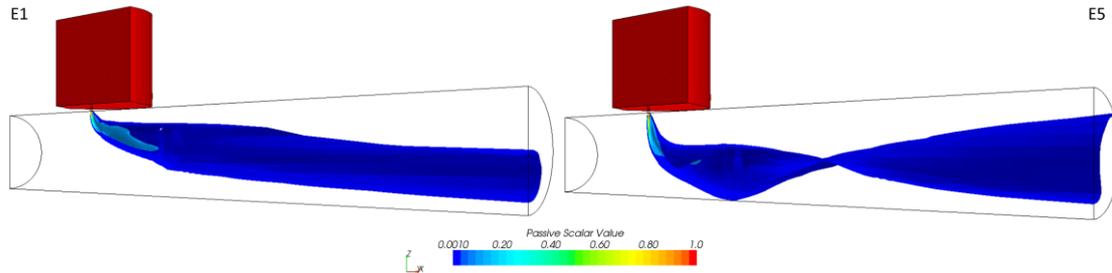


Figura 3.30 Transporte de la intrusión con el fallo circular de 1mm

El caudal de intrusión representa el 0,7; 1,0 y 1,4% del caudal total para las presiones de -1; -3 y -5mca registrados en la tubería. Comparando con el fallo de 4mm la intrusión es al menos 10 veces menor en el fallo del 1mm.

### 3.9.3 Resultados para el fallo transversal de 48mm

Con respecto al fallo transversal de 48mm se ha simulado el modelo numérico con el área medida y con el área calculada mediante la aproximación del  $C_{di}$  ajustado. En la Figura 3.31 se muestran los ajustes de los caudales de simulación en ambas modelaciones.

Como se puede observar, Los caudales de intrusión numéricos presentan una comprobación del modelo experimental y de la modificación del área del fallo durante la intrusión. El caudal que se obtiene cuando se hace la simulación con el fallo calculado a partir de  $C_{di}$  se aprecia con un mejor ajuste que con el fallo medido. Esto corrobora, los resultados de la intrusión experimental. Al ensayar este fallo, en condiciones de operación el área ha sido afectada por la presión de intrusión.

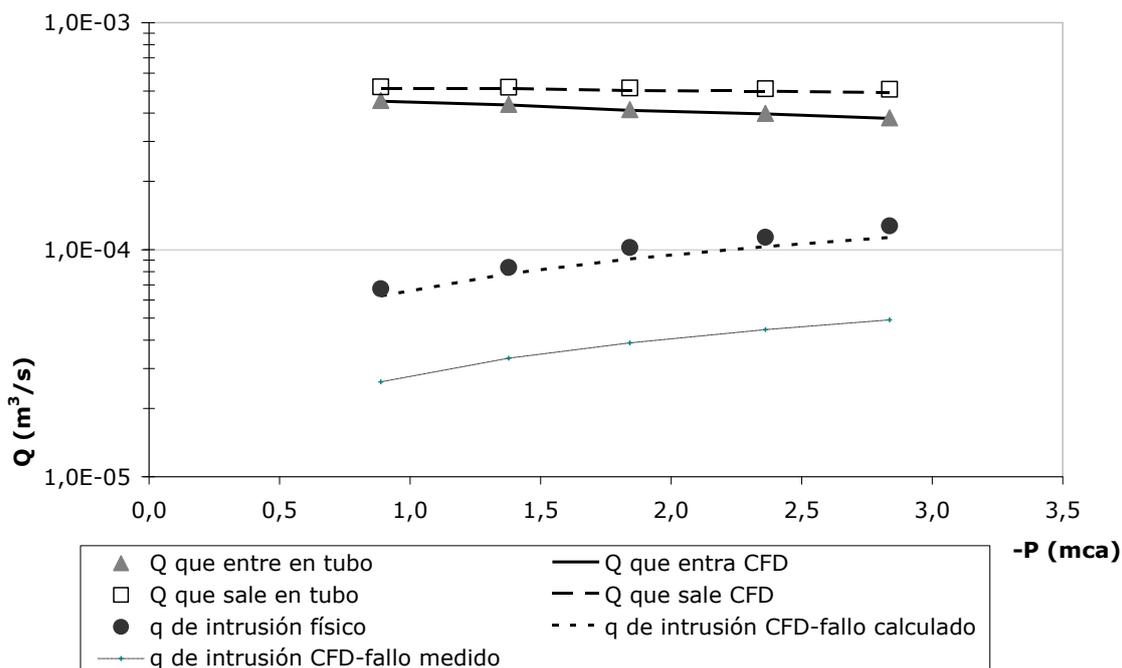


Figura 3.31 Ajuste del caudal en el modelo CFD para el fallo transversal de 48mm

El caudal de intrusión con el modelo corregido en el área del fallo, el ajuste es del 91,2%; en el caudal de salida es de 97,7%. En el caso de la simulación con el área del fallo medida el caudal de intrusión correspondería a un 38,9% y por lo tanto, el caudal de salida sería un 87,8%. En la Tabla 3.22 se presentan los ajustes para cada escenario simulado en el caso del área calculada.

Tabla 3.22 Resultados de los escenarios del fallo transversal de 48mm - calculado

Esc presión (mca)	Q intr Físico ( $m^3/s$ )	Qintr cfd ( $m^3/s$ )	Ajuste intr (%)	Q sale Físico ( $m^3/s$ )	Q sale cfd ( $m^3/s$ )	Ajuste sale (%)
-0.5	$6,73 \times 10^{-5}$	$6,24 \times 10^{-5}$	<b>92,78</b>	$5,21 \times 10^{-4}$	$5,13 \times 10^{-4}$	<b>98,53</b>
-1.0	$8,34 \times 10^{-5}$	$7,85 \times 10^{-5}$	<b>94,04</b>	$5,20 \times 10^{-4}$	$5,12 \times 10^{-4}$	<b>98,53</b>
-1.5	$1,02 \times 10^{-4}$	$9,10 \times 10^{-5}$	<b>89,05</b>	$5,16 \times 10^{-4}$	$5,02 \times 10^{-4}$	<b>97,34</b>
-2.0	$1,13 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	<b>90,96</b>	$5,12 \times 10^{-4}$	$4,99 \times 10^{-4}$	<b>97,52</b>
-2.5	$1,27 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-4}$	<b>88,96</b>	$5,08 \times 10^{-4}$	$4,92 \times 10^{-4}$	<b>96,78</b>

Con respecto al criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.23 para el fallo transversal de 48mm calculado.

Tabla 3.23 Resultados de Eficiencia N-S para FT 48mm - calculado

Parámetro	Valor
Caudal de intrusión	0,790
Caudal de salida	-5,356

En el modelo numérico del fallo transversal de 48mm se obtienen resultados satisfactorios de eficiencia en el caudal de intrusión; no obstante, el caudal de salida presenta un resultado no eficiente en el conjunto del modelo. Como se ha venido mencionando la sensibilidad del criterio en este caso se aprecia más, la diferencia entre los valores numérico respecto a los medidos fue de 2,26%. Con los resultados numéricos se puede corroborar el ajuste del área a partir del análisis realizado con el  $C_{di}$  realizado de manera satisfactoria.

En la Figura 3.32 se muestran los escenarios del fallo transversal para los valores del trazador con los escenarios de la presión mínima (E1, Izquierda) y presión máxima simulada (E5, derecha).

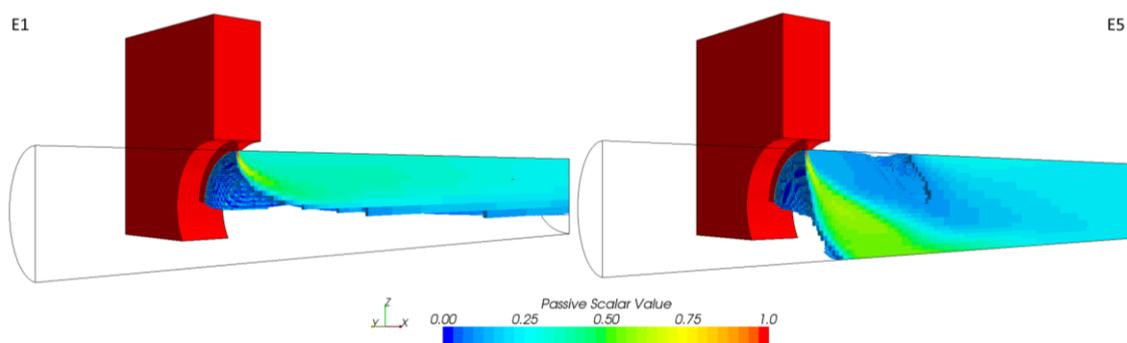


Figura 3.32 Transporte de la intrusión con el fallo transversal de 48mm

En el fallo transversal de 48mm el caudal de intrusión con respecto al caudal total que circula por la tubería representa el 12; 15 y 23% para las presiones de -0,5; -1,0 y -2,5mca medidas en la conducción.

Con respecto al fallo circular de 4mm se presenta una intrusión que se incrementa al menos en un 50% en el fallo transversal para el mismo rango de presiones medidas en ambos fallos.

Al comparar con el fallo circular de 1mm, la intrusión en el fallo transversal de 48mm representa al menos 20 veces el caudal que se presenta de intrusión en el fallo circular de 1mm. Con estos resultados se puede observar la capacidad de intrusión del fallo transversal y además considerando que el área bajo condiciones de intrusión negativa se ve favorecido para incrementar la capacidad de intrusión.

#### **3.9.4 Resultados para el fallo longitudinal de 44mm**

Con respecto al fallo longitudinal de 44mm se ha simulado el modelo numérico considerando el área del fallo medida. Como se había observado en los resultados experimentales, el caudal de intrusión medido resultó ser más bajo de lo esperado. Eso se verificó con el ajuste que se realizó por medio del  $C_{di}$ , el ancho de fallo estimado para que se obtuviera ese caudal se reducía de un ancho medido de 0,14mm a un ancho estimado de 0,0046mm.

El modelo numérico se ha simulado con el área del fallo medida. En el caso del ancho de fallo estimado, la discretización en la zona del fallo no fue posible reproducirla con las condiciones de computo actuales (Procesador Intel (R) Dual CPU T3400 @2.16GHz 2.17GHz. Memoria (RAM) 3,00GB). Por lo que se

presentan los resultados de la simulación para el fallo medido, el ajuste se observa en la Figura 3.33.

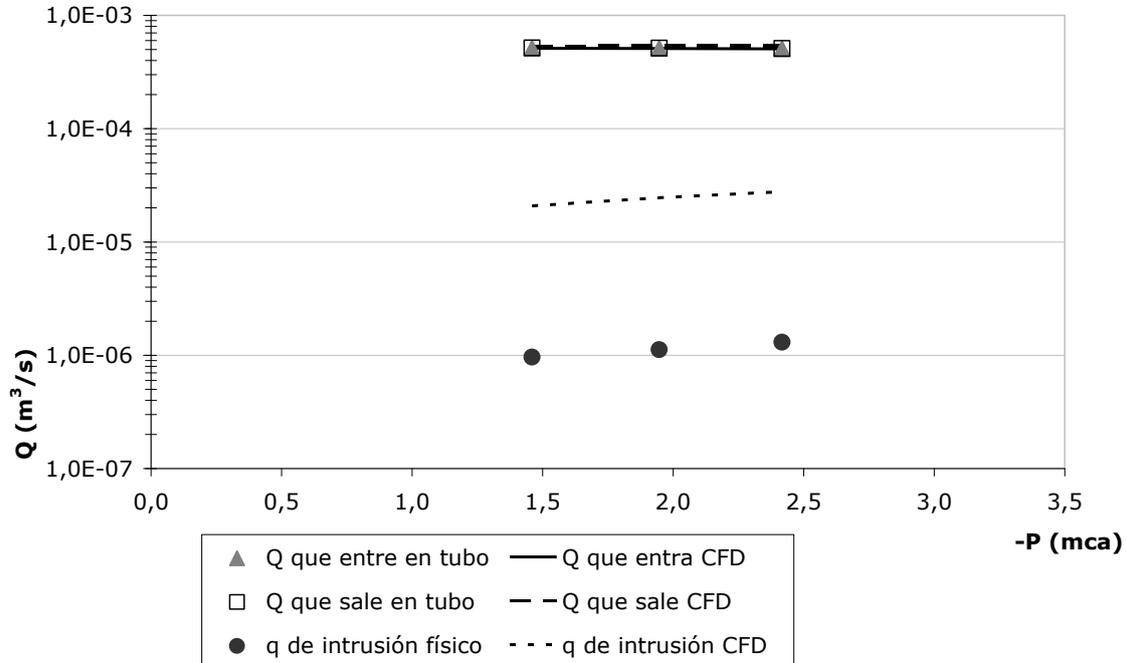


Figura 3.33 Ajuste del caudal en el modelo CFD para el fallo longitudinal de 44mm

Como se puede observar en la Figura anterior, los resultados obtenidos en el modelo CFD con el área del fallo medida muestran un caudal de intrusión mayor que el que fue medido de forma experimental. El caudal medido queda por debajo en dos órdenes de magnitud. Estos resultados se esperaban debido a como se habían obtenido los resultados del  $C_{di}$  en el que se planteaba que el área del fallo en condiciones de intrusión se cerraba. En la Tabla 3.24 se muestra de forma numérica el desajuste.

Tabla 3.24 Resultados de los escenarios del fallo longitudinal de 44mm

Esc presión (mca)	Q intr Físico (m3/s)	Qintr cfd (m3/s)	Ajuste intr (%)	Q sale Físico (m3/s)	Q sale cfd (m3/s)	Ajuste sale (%)
-1,1	$9,61 \times 10^{-7}$	$2,08 \times 10^{-5}$	<b>2168</b>	$5,15 \times 10^{-4}$	$5,32 \times 10^{-4}$	<b>103,2</b>
-1,6	$1,12 \times 10^{-6}$	$2,46 \times 10^{-5}$	<b>2193</b>	$5,14 \times 10^{-4}$	$5,34 \times 10^{-4}$	<b>103,9</b>
-2,1	$1,30 \times 10^{-6}$	$2,78 \times 10^{-5}$	<b>2130</b>	$5,10 \times 10^{-4}$	$5,33 \times 10^{-4}$	<b>104,6</b>

Con respecto al criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe se mostrarán los resultados, que en general se esperan como no satisfactorios. En la Tabla 3.25 se muestran los valores del criterio de eficiencia para el fallo longitudinal de 44mm para el área medida.

Tabla 3.25 Resultados de Eficiencia N-S para FL 44mm

Parámetro	Valor
Caudal de intrusión	-28.073
Caudal de salida	-90,661

Como se esperaba, el modelo no es satisfactorio. En el análisis que se había realizado al finalizar los resultados experimentales, se describía que el fallo durante las simulaciones prácticamente se cerraba. Con el modelo numérico se corrobora que el fallo con el área medida el caudal resultante no equivale al caudal medido, entre otras cosas se verifica esta información.

En la Figura 3.34 se muestra la intrusión mediante el trazador en un rango de 0,001 a 1 para los escenarios de presión máxima (E1, izquierda) y presión mínima (E3, derecha) para el fallo longitudinal con el área medida.

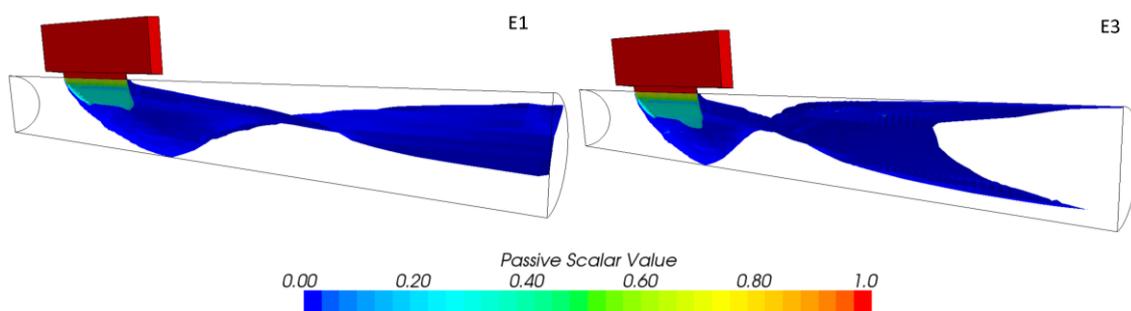


Figura 3.34 Transporte de la intrusión con el fallo longitudinal de 44mm

Para el fallo longitudinal los caudales de intrusión con respecto al caudal total se presentan en base a los resultados experimentales. El porcentaje de intrusión respecto al caudal total es de 0,19; 0,22 y 0,26% para rangos de presión en la conducción de -1,1; -1,6 y -2,1mca. Estos valores son comparables

con los que presenta el fallo circular de 1mm debido al escaso caudal que se ha presentado en la intrusión. En el mismo rango de presiones medidas en ambos fallos en la conducción; el caudal en el fallo de 1mm se presenta una intrusión con rangos entre 3 y 4 veces más que el caudal de intrusión del fallo longitudinal de 44mm.

En la Figura 3.35 se muestran los resultados de todos los escenarios modelados. Se muestra el porcentaje que representa el caudal de intrusión con respecto a los caudales totales registrados en la conducción después del fallo.

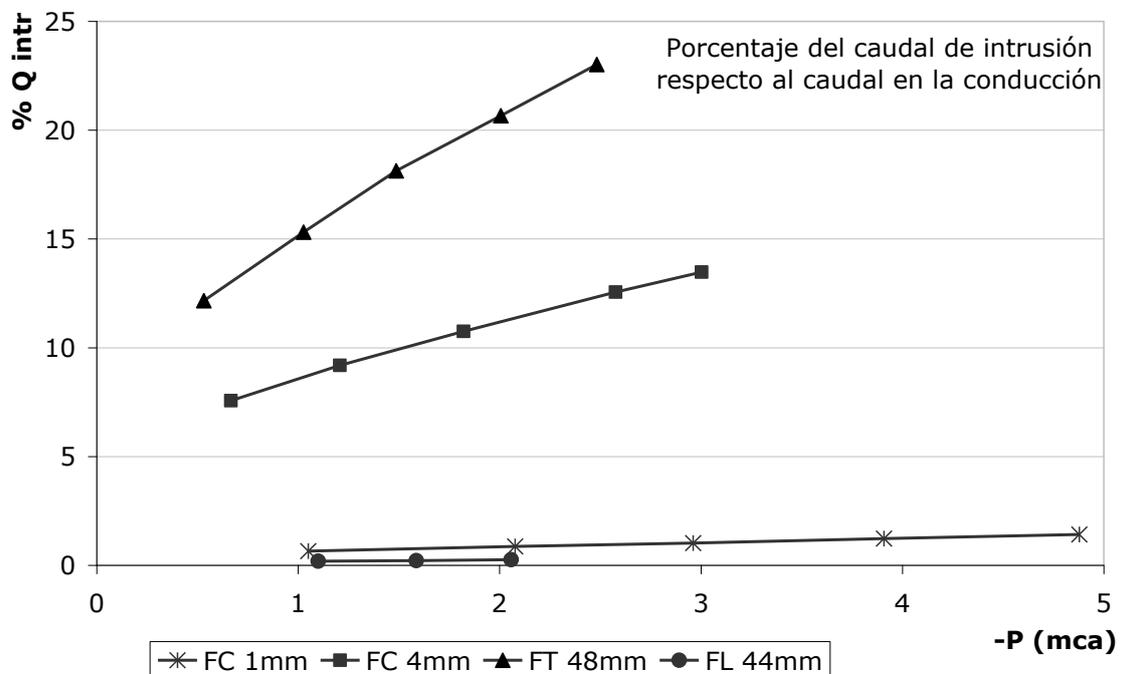


Figura 3.35 Caudal de intrusión respecto al Caudal total en la conducción

El rango del caudal total registrado para las presiones de -0,5 a -3,0mca ronda entre los  $5,5 \times 10^{-4}$  y  $4,8 \times 10^{-4}$  por lo que se considera que los porcentajes de intrusión pueden ser verificados de esta manera.

### 3.9.5 Resultado para el fallo circular de 1mm en medio poroso

Se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con el fallo circular de 1mm simulado con el medio poroso en la Figura 3.36.

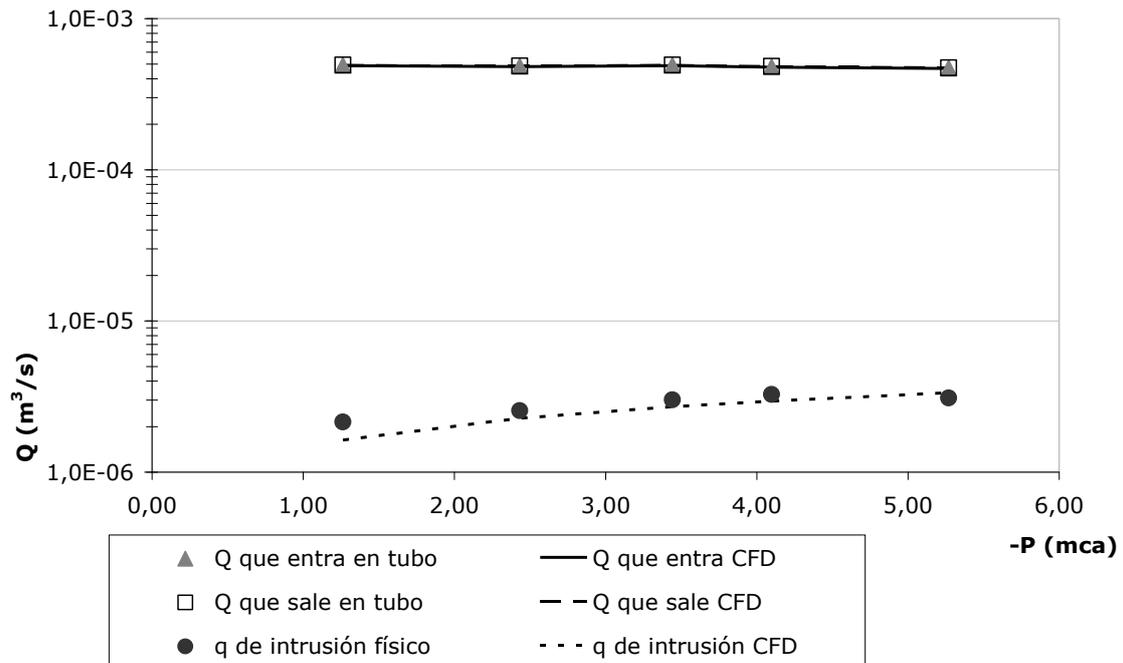


Figura 3.36 Resultados CFD para el fallo circular de 1mm con medio poroso

De forma numérica se muestran los ajustes en cada escenario de presión en la Tabla 3.26. El ajuste se presenta adecuado en tres escenarios. Los escenarios en los para la presión máxima y mínima tienen una mayor diferencia que los otros tres escenarios.

Tabla 3.26 Resultados de los escenarios del fallo circular de 1mm en medio poroso

Esc presión (mca)	Q intr Físico (m³/s)	Qintr cfd (m³/s)	Ajuste intr (%)	Q sale Físico (m³/s)	Q sale cfd (m³/s)	Ajuste sale (%)
-0,9	$2,14 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$	<b>76,07</b>	$4,93 \times 10^{-4}$	$4,90 \times 10^{-4}$	<b>99,34</b>
-2,1	$2,55 \times 10^{-6}$	$2,27 \times 10^{-6}$	<b>89,20</b>	$4,86 \times 10^{-4}$	$4,83 \times 10^{-4}$	<b>99,38</b>
-3,1	$3,01 \times 10^{-6}$	$2,70 \times 10^{-6}$	<b>89,98</b>	$4,94 \times 10^{-4}$	$4,91 \times 10^{-4}$	<b>99,38</b>
-3,7	$3,27 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^{-6}$	<b>90,28</b>	$4,84 \times 10^{-4}$	$4,81 \times 10^{-4}$	<b>99,38</b>
-4,9	$3,09 \times 10^{-6}$	$3,34 \times 10^{-5}$	<b>108,1</b>	$4,73 \times 10^{-4}$	$4,71 \times 10^{-4}$	<b>99,50</b>

En promedio, los valores del caudal en la intrusión se ajustan en un 90,7%; aunque dos valores escenarios se encuentran fuera de este rango. En la salida el ajuste es de 99,4%.

Haciendo la aplicación del criterio de Eficiencia de Nash-Sutcliffe, los resultados se muestran en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27 Resultados de Eficiencia N-S para FC 1mm - poroso

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Caudal de intrusión	0,296
Caudal de salida	0,843

Se observa que en conjunto que los resultados son suficientes para la representación del medio poroso. En la Figura 3.37 se muestran los escenarios del fallo transversal para los valores del trazador con los escenarios de la presión mínima (E1, Izquierda) y presión máxima simulada (E5, derecha); En este caso el rango del trazador en las figuras es de 0,01 a 1.

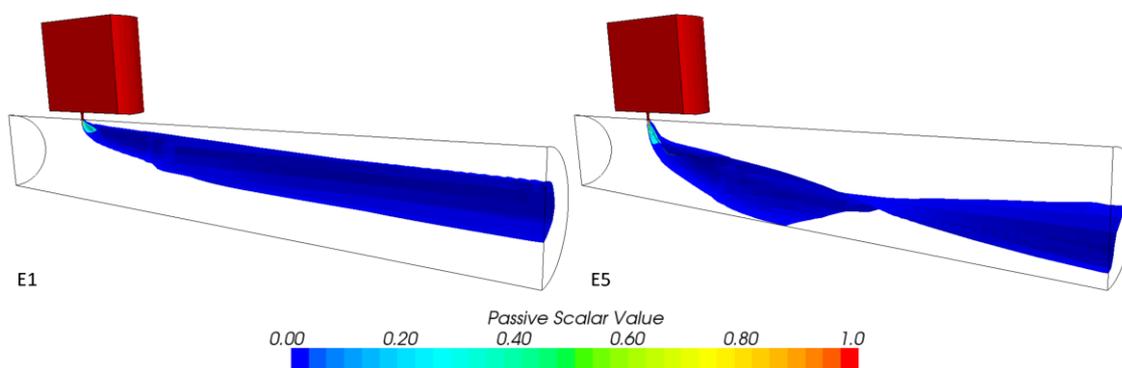


Figura 3.37 Transporte de la intrusión con el fallo de 1mm con medio poroso

El porcentaje del caudal de intrusión respecto al caudal total de circulación en la conducción incluyendo el medio poroso, representa el 0,3; 0,6 y 0,7% para presiones en la conducción de -1; -3 y -5mca. Lo que significa una reducción del caudal de intrusión entorno al 50% comparada con el fallo circular

de 1mm; los mismos escenarios de modelación pero con la diferencia de que en el exterior se tenga un medio poroso.

De esta forma se han presentado los resultados de la modelación en cada una de los escenarios de intrusión mediante la aplicación de CFD.

Finalmente se han realizado los modelos en estado permanente en dos aspectos principales:

Por un lado, la representación de la analogía de la fuga y el ajuste con los trabajos dedicados a éste concepto mediante la modelación experimental.

Por otro lado, se han realizado los modelos mediante CFD, los cuales se han validado para los diversos tipos de fallos; además se realiza la simulación con medio poroso en el exterior, lo cual genera una representación adecuada en muchas situaciones en campo para la intrusión.

En los fallos circulares de 1 y 4mm los caudales de intrusión se ajustan de manera adecuada a los medidos en el experimento. Con respecto al criterio de eficiencia, el caudal en la intrusión es satisfactorio en ambos fallos. No obstante en la frontera de salida el criterio de eficiencia es satisfactorio para el fallo circular de 1mm, mientras que para el fallo circular de 4mm el criterio no lo es, aún cuando la diferencia entre los caudales de salida medidos y calculados es en promedio de 1,3%.

Con respecto al fallo transversal, en el modelo CFD se ha validado la posible variación que pudiera existir en el área del fallo debida a la presión de intrusión. Al realizar los escenarios con el área de fallo medida, los resultados mostraron una diferencia muy amplia. Cuando se realizó el modelo con el área calculada en base a los resultados de  $C_{di}$  los ajustes en los caudales de intrusión

fueron adecuados. Por lo cual los cambios que puede tener el fallo debida a la presión de intrusión, resulta una aportación importante cuando se están considerando volúmenes pequeños que pueden ser altamente contaminantes en relación con el caudal de circulación de las conducciones.

Con respecto al modelo del fallo longitudinal se confirmó que el caudal experimental medido representa un caudal para un área mucho menor que el área del fallo medida. La diferencia en los caudales de intrusión resultó de dos órdenes de magnitud en el CFD y como se había analizado en los resultados experimentales, el fallo prácticamente se cierra cuando está sometido a la presión de intrusión.

Dependiendo del tipo de fallo y del rango de presiones negativas que se puedan alcanzar dentro de la conducción, los porcentajes de intrusión pueden alcanzar valores del 23% con rangos de presión negativa de 2,5mca ó por el contrario valores de 0,18% con presiones negativas de 1,1mca. Por lo que considerar estos valores cuantitativos de intrusión puede ser significativo a la hora de evaluar transporte de contaminantes en las conducciones.

Con respecto al modelo numérico para medios porosos se requiere los parámetros particulares para cada tipo de suelo, los cuales se deben evaluar dependiendo sus características físicas y de acomodo en el escenario en campo. Se puede observar que usando este modelo para medios porosos es posible realizar la simulación del medio exterior de la tubería y tener resultados fiables. Con respecto a la comparación de la cantidad de caudal de intrusión dentro de la conducción considerando o no un medio poroso exterior se puede observar que el caudal de intrusión se reduce alrededor del 50% cuando se tiene un medio poroso; tomando en cuenta las características del suelo en particular que se ha utilizado en la modelación.

Con el uso del modelo CFD, además de corroborar ese tipo de condiciones físicas, también permite incluir condiciones hidrodinámicas en diferentes medios. En este sentido se ha validado el modelo y se conoce el rango en el cual se podrían ajustar los resultados en base a las condiciones numéricas planteadas.

A continuación se realizan las simulaciones experimentales de la intrusión durante un evento transitorio y su respectiva representación numérica mediante la técnica de CFD e incluyendo el modelo numérico que reproduce el transitorio de presión.

# **CAPÍTULO 4**



## **4 LA INTRUSIÓN EN UN TRANSITORIO DE PRESIÓN**

En este capítulo se muestra el caso en que la presión negativa se induce por medio de un transitorio de presión generado por el cierre de una válvula aguas arriba, esta simulación es equivalente a una parada de equipo de bombeo. En tuberías enterradas y en zonas donde el terreno se encuentre saturado, cuando la presión desciende de forma repentina la intrusión se puede generar de forma factible. El evento hidrodinámico estará formado por caudales de fuga y de intrusión simultáneamente.

La intrusión durante este tipo de eventos se representara de manera detallada. Para lograr este objetivo se generan diversos escenarios de transitorios de presión donde el fallo en la tubería se localiza próximo al origen del transitorio. De esta forma se muestra un evento de intrusión en una de las zonas donde se genera mayor presión negativa durante dicho evento.

El capítulo se divide en cuatro partes. En la primera parte se describe la forma en que se modelan los transitorios de presión con el método de las características. En la segunda se muestra el modelo experimental. En la tercera se muestra la aplicación del método de las características para la representación del modelo experimental implementando la cavitación y el fallo en la conducción. En la cuarta parte se representan las simulaciones mediante el modelo CFD para obtener los resultados de intrusión durante el transitorio.



## 4.1 Los Modelos Hidráulicos en Transitorio de Presión

El origen de los transitorios hidráulicos es provocado por los cambios abruptos en la velocidad del fluido (Kirmeyer *et al.*, 2001), lo que genera una transformación de la energía cinética que arrastra el líquido en energía elástica, esta energía es adquirida por las paredes de la tubería y el propio fluido; lo cual acontece en un fenómeno cíclico con períodos de sobrepresión y depresión (Iglesias *et al.*, 2001).

En las redes de distribución de agua se presentan eventos transitorios de presión debidos a imprevistos durante la operación o por uso extraordinario del agua en la red, como por ejemplo el uso de hidrantes para incendios y los fallos en los accesorios, válvulas o en el suministro eléctrico. Dependiendo del evento transitorio o lo que lo origine, el comportamiento será de una forma u otra.

El evento que se describe en el presente capítulo hace referencia a un transitorio originado aguas arriba de la conducción por medio de un cierre de válvula. Este tipo de eventos desencadena una disminución en la presión debido a la pérdida de caudal provocado por el cierre de la válvula. El evento cíclico de intercambio de energía elástica en forma de presión y energía cinética en forma de velocidad, inicia con una reducción de caudal y por consiguiente una onda de presión negativa. Por lo que el comportamiento del transitorio pueda generar una presión de vapor y en el caso de que se tenga un fallo con un fluido exterior, se presentará un volumen de intrusión.

Los modelos de análisis dinámico (o en régimen transitorio) toman en cuenta la variable temporal de los parámetros y/o las variables que se consideran para su simulación dentro del modelo. La solución normalmente es

de tipo discreto para cada instante de tiempo. Este tipo de modelos dinámicos además se clasifican en modelos de tipo inercial (rígidos y elástico) y no inercial, la diferencia básica entre este tipo de modelos es la consideración o no de la inercia del fluido dentro de la conducción (Fuertes *et al.*, 2002).

En el caso de los modelos no inerciales, la característica dinámica le viene conferida por el hecho de disponer una serie de condiciones de contorno lentamente variables con el tiempo. Lo que significa que cada instante de tiempo representa un modelo estático (entre un instante y otro se actualizan los parámetros), lo que viene representando a los modelos intermedios entre los estáticos y los dinámicos, por lo que son llamados cuasi-estáticos.

Los modelos inerciales consideran la energía generada por cambios de velocidad, motivados por variaciones temporales de las condiciones de contorno. Se llegan a utilizar cuando el análisis considera la generación de cambios importantes en la velocidad del fluido. Los modelos inerciales (golpe de ariete) pueden considerar o no la elasticidad de los materiales, tanto del fluido como de la pared del tubo. Por lo que pueden ser modelos de tipo dinámico inercial rígido y de tipo dinámico inercial elástico.

#### **4.1.1 Golpe de Ariete en Tuberías**

Golpe de ariete es como se denomina a la representación numérica de la variación brusca de la presión producto de un cambio en la velocidad en una conducción a régimen permanente (Ferrer y Aguado, 2007). Como factores principales en la variación de la velocidad están las operaciones en válvulas y las paradas del equipo de bombeo. De esta forma el caudal variará desde la ubicación del accesorio y por ende su velocidad y presión.

Se genera una propagación de onda llamada celeridad, la velocidad de propagación está determinada con la ecuación de Allievi [38].

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad [38]$$

donde,  $c$  es la celeridad de la onda de propagación,  $D$  y  $e$  son el diámetro interior y el espesor de pared de la conducción,  $k$  es una constante que depende del material de la tubería (ej. 0,5 en acero y hormigón armado, 1 en fundición, 34 en PVC, 113 en HDPE y 510 en LDPE)

Durante un transitorio se presenta un valor de presión máximo. Este valor depende del tiempo que transcurre desde el inicio del evento hasta que el caudal que circula por la tubería se restablece. En el caso de que se tenga válvula de retención, el máximo incremento que se genera durante un golpe de ariete será en esta válvula. El incremento de presión máximo se obtiene a través de las siguientes expresiones y depende del tiempo de maniobra. Si la maniobra es lenta, por lo tanto se usa la expresión de Michaud [39]:

$$\Delta H = \pm \frac{2Lv}{gt} \quad si \quad t \geq \frac{2L}{c} \quad [39]$$

En el caso de que la maniobra sea rápida, se usa la equivalente de Allievi [40]:

$$\Delta H = \pm \frac{cv}{g} \quad si \quad t \geq \frac{2L}{c} \quad [40]$$

donde,  $\Delta H$  es el máximo incremento de la presión,  $L$  es la longitud de la tubería,  $t$  es el tiempo que transcurre hasta el restablecimiento del caudal.

Dependiendo del tiempo de parada hay una longitud de tubería ( $L_I$ ) para la que el máximo incremento de presión viene dado por la fórmula de Allievi [41].

$$L_1 = \frac{c \cdot t}{2} \quad [41]$$

si  $L > L_I$  se usa la fórmula de Allievi, para maniobras rápidas, por lo contrario será la ecuación de Michaud.

A continuación se hace la descripción del modelo con el cual se hace la representación numérica del evento de intrusión durante el evento transitorio.

#### 4.1.2 Método de las Características Modificado

El método de las características se presenta con la incorporación de cavitación localizada para eventos transitorios generados aguas arriba de una conducción. En este caso particular, se considera el efecto del fallo en la tubería representado por un orificio circular en caso de que se requiera simular el efecto que su produce cuando las dimensiones del fallo afecta la respuesta de la presión durante el transitorio.

Como se ha mencionado, los transitorios de presión en las tuberías se modelan a partir de las ecuaciones de golpe de ariete mediante la simplificación de las ecuaciones de continuidad y movimiento, las cuales constituyen dos ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas (Chaudhry, 1987; Wylie and Streeter, 1993 y Ramos, 1995). La combinación de los modelos hidráulico y estructural fue descrita por Wiggert *et al.* (1987), en la cual se soluciona el método de las características (MOC) a través de un sistema de cuatro ecuaciones, [42] a [45].

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} D(U) \quad [42]$$

siendo  $U$ :

$$U = \begin{bmatrix} H \\ V \\ \dot{u}_x \\ \sigma_x - \frac{H g v D \rho_F}{2e} \end{bmatrix} \quad [43]$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} \frac{c_F^2}{g} (V - 2v \dot{u}_x) \\ gH \\ -\frac{\sigma_x}{\rho_t} + gZ \\ -\rho_t c_t^2 \dot{u}_x \end{bmatrix} \quad [44]$$

$$D(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{f}{2D} (V - \dot{u}_x) |V - \dot{u}_x| \\ -\frac{f}{8t} (V - \dot{u}_x) |V - \dot{u}_x| \\ 0 \end{bmatrix} \quad [45]$$

donde

$$c_F^2 = \left( \rho_F \left( \frac{1}{K} + (1 - v^2) \frac{D}{E_p e} \right) \right) \quad \text{y} \quad c_t^2 = \frac{E_p}{\rho_t} \quad [46]$$

$c_F^2$  y  $c_t^2$  son la velocidad de onda del fluido y del sólido, respectivamente.  $V$  es la velocidad media,  $p$  es la presión,  $E_p$  es el módulo de elasticidad de Young del material de la tubería,  $c$  es la celeridad de onda,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson,  $e$  es el espesor de la tubería,  $D$  es el diámetro interior de la tubería,  $\rho$  es la densidad de masa,  $\sigma$  es el tensor normal,  $K$  es el módulo del fluido y  $\dot{u}$  es la velocidad estructural.

Para la solución de los transitorios de presión en una dimensión el modelo MOC se utiliza en mayor medida; entre otros por su fácil manejo en la programación y por su eficiencia en los resultados. Las derivadas parciales son reemplazadas por aproximaciones en diferencias finitas donde las condiciones de estabilidad de los pasos de tiempo y espacio están condicionadas por la relación de Courant-Lewy [47].

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq V \pm c \quad [47]$$

Haciendo la transformada de las ecuaciones parciales en una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias válidas para la línea característica, e integrando en el plano  $x-t$ , el esquema de las diferencias finitas puede ser escrito de la siguiente manera [48]:

$$\begin{aligned} C^+ : H_P - H_A + \frac{c}{gA}(Q_P - Q_A) + I^+ &= 0 \\ C^- : H_P - H_B - \frac{c}{gA}(Q_P - Q_B) + I^- &= 0 \end{aligned} \quad [48]$$

$I$  representa las pérdidas por fricción.

En el trabajo de Ramos *et al.* (2004) se presenta una aproximación del efecto de amortiguamiento en los picos de presión a lo largo del tiempo. Este

efecto dinámico puede estar influenciado por el comportamiento no elástico de la tubería y por el efecto de fricción. El objetivo de la técnica propuesta es permitir la caracterización de la disipación de la energía a través de la variación de las cargas máximas y mínimas observadas en el régimen transitorio. Para ello se presentan variaciones en los coeficientes de las ecuaciones características que afectan la transformación de la energía cinética a la energía elástica y viceversa.

Considerando obtener una ecuación genérica aplicable a cualquier sistema Ramos *et al.* (2004) proponen parámetros adimensionales para la carga hidráulica  $h$ , para la pérdida de carga relativa  $\Delta h_0$  y para el caudal relativo  $q$ , [49].

$$h = \frac{H}{\left(\frac{c \cdot Q_0}{g \cdot A}\right)} = \frac{H}{\Delta H_J} \quad \Delta h_0 = \frac{\Delta H_0}{\Delta H_J} \quad q = \frac{Q}{Q_0} \quad [49]$$

donde  $\Delta H_J$  es el pulso de Joukowsky.

En un comportamiento elástico y asumiendo que  $\tau = \frac{t}{(2L/c)}$ , la variación de la carga está dada por [50].

$$h = \frac{h_0}{1 + h_0 \cdot K \cdot \Delta h_0 \cdot (\tau - \tau_0)} \quad [50]$$

donde,  $h_0$  es la carga adimensional en el tiempo  $\tau_0$ .

De acuerdo con este tipo de análisis, cada vez que hay un comportamiento no elástico del sistema (ej. aire atrapado o transitorio en conducciones plásticas), este sería el efecto principal que produciría

amortiguamiento, y la disipación de la energía podría ser evaluada con la relación [51].

$$h = h_0 \cdot e^{-K \cdot \Delta h_0 \cdot (\tau - \tau_0)} \quad [51]$$

Para sistemas donde se combinan efectos elásticos en conducciones plásticas, el amortiguamiento del transitorio puede ser evaluado a través de la ecuación [52].

$$h = \frac{1}{\left( \frac{K_{elas}}{K_{visc}} + \frac{1}{h_0} \right) \cdot e^{K_{visc} \cdot \Delta h_0 \cdot (\tau - \tau_0)} - \frac{K_{elas}}{K_{visc}}} \quad [52]$$

donde,  $K_{visc}$  es el coeficiente de decaimiento plástico y  $K_{elas}$  es el coeficiente de decaimiento para los efectos elásticos.

Para la descripción del comportamiento no elástico del fluido y del material de la tubería se estiman unos coeficientes de decaimiento simples ( $KH$  y  $KQ$ ). Estos coeficientes están basados en las ecuaciones de la disipación de la energía [49] y [50], y que se incluyen como parámetros de disipación [53] en las ecuaciones del MOC modificado.

$$\Delta H = KH \frac{c}{gA} \Delta Q - J \quad [53]$$

$$\Delta Q = KQ \frac{\Delta H - J}{c/(gA)}$$

Donde,  $J$  es el término de pérdida de carga,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $A$  es la sección transversal de la tubería,  $\Delta H$  es la variación de la carga y  $\Delta Q$  es la variación en el flujo.

### 4.1.3 Incorporación de la cavitación y del orificio en el MOC

El modelo de cavitación localizada produce un cambio en la respuesta del sistema transitorio y hace que se ajuste de mejor manera a los eventos transitorios que son generados aguas arriba de la conducción. La incorporación de la cavitación ha sido desarrollada por Ramos *et al.* (2005).

Debido a que la presión durante el transitorio puede tomar valores por debajo de la presión atmosférica, se puede generar presión de vapor y con ello, la formación de burbujas de vapor.

El gas libre (isotérmico e ideal) genera una variación en la velocidad de onda entre el 40 y el 70% de su valor inicial (Ramos *et al.*, 2005). El modelo convencional vapor-líquido asume que la cavitación se forma en una sección de tubería y se considera como una frontera interna en los puntos donde se genera la cavitación.

Para propósitos del modelo, el efecto de la cavitación puntual se puede representar en todas las secciones de la tubería. Por lo que la cavitación se representa con el volumen  $\forall_{i,j}$  [54] en la sección  $i$  de la tubería y para el tiempo  $j$ .

$$\forall_{i,j} = \forall_{i,j-1} + (Q_{Ri,j} + Q_{Ri,j-1} - Q_{Li,j} - Q_{Li,j-1})\Delta t/2 \quad [54]$$

donde,  $Q_R$  y  $Q_L$  son el caudal hacia la derecha y la izquierda de la cavitación, respectivamente.

Esta condición será efectiva durante el tiempo cuando la presión absoluta sea menor que la presión de vapor del líquido. La carga de presión incluyendo la cavitación está dada por la ecuación [55].

$$H_{\nabla} = H_{IC} + \frac{P_{atm}}{\gamma} \quad [55]$$

Por otro lado, el modelo del fallo por donde se genera la intrusión y la fuga puede ser descrito con el análisis del flujo a través de orificios [2] incluyendo situaciones de presión negativa (López *et al.* 2005; Covas *et al.* 2005), las cuales favorecen la entrada de contaminantes.

Los fallos en las conducciones, dependiendo de su magnitud, pueden amortiguar el transitorio de presión. Cuando el fallo genera fuga, ésta se representa con una pérdida de caudal sin pérdida de presión. En el caso de que el fallo trabaje como intrusión, éste se representará con una carga exterior permanente. De acuerdo con Bergant *et al.* (2003) el fallo se puede entonces implementar en el MOC como una condición de frontera interna. La fuga es simulada mediante dos ecuaciones que relacionan a la carga y el flujo de aguas arriba con la carga y el flujo hacia aguas abajo; se presentan a continuación [56].

$$Q_P^+ - Q_P^- - C_d A_0 \sqrt{2g(H_P - H_{XT})} = 0 \quad \text{donde} \quad H_P = H_p^+ = H_p^- \quad [56]$$

donde  $H_{XT}$  es la presión en el exterior del fallo, que para el tipo de evento que estamos representando, esta tendrá un valor diferente a la presión atmosférica.

La frontera interna del modelo numérico esta entonces representada por el modelo de cavitación y el modelo del fallo. De esta manera se especifican las bases con las cuales se realiza la representación numérica del evento transitorio. A continuación se realiza la descripción del modelo experimental.

## 4.2 Modelo Físico de Intrusión Durante el Transitorio

El prototipo del evento de intrusión durante el transitorio de presión se muestra en la Figura 4.1. En términos generales es similar al prototipo descrito en el capítulo anterior, en este caso se tendrá una variación de la presión dentro de la tubería, la intrusión que se genere durante este evento es de interés para tener una cuantificación del potencial del fenómeno de la intrusión patógena durante transitorios de presión.

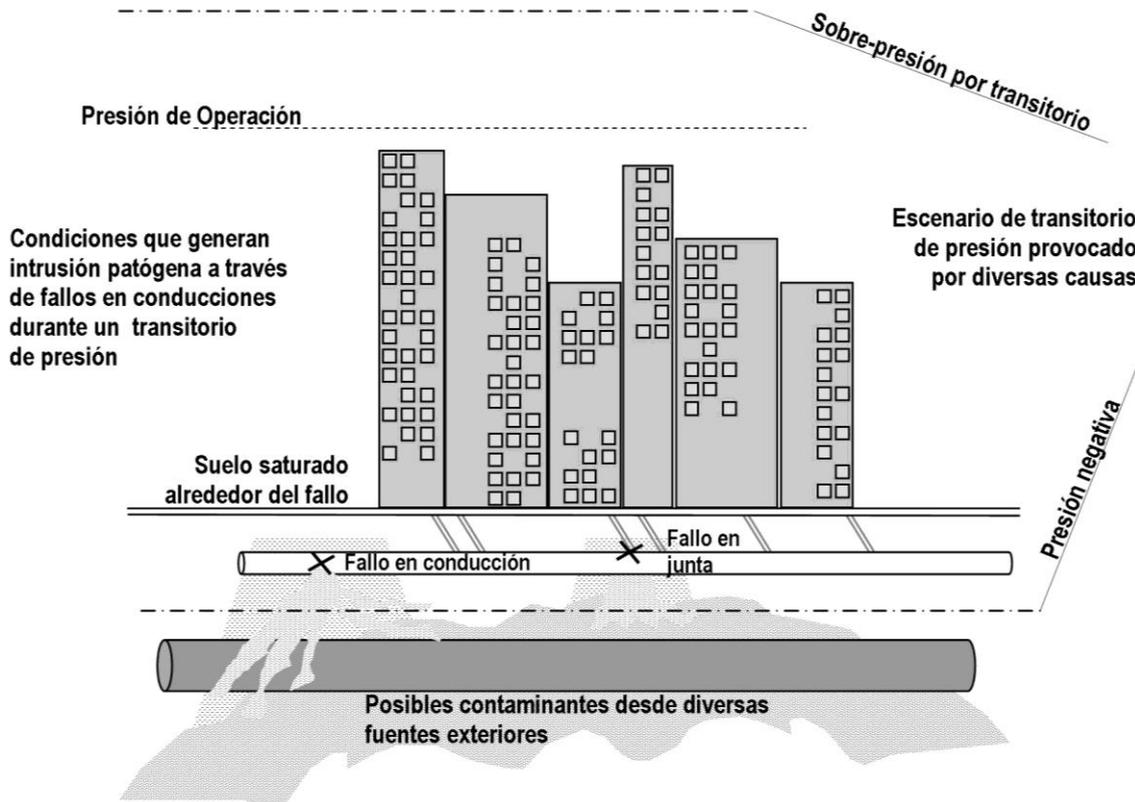


Figura 4.1 Prototipo de la intrusión durante un transitorio

En los párrafos siguientes se hace la descripción de la instalación utilizada para la representación experimental.

### 4.2.1 Instalación del Modelo Experimental

La instalación que se ha utilizado se ubica en el laboratorio del Centro de Estudios de Hidrosistemas (CEHIDRO) del Instituto Superior Técnico de Lisboa. En la Figura 4.2 se observa el conjunto de los componentes del modelo para generar diversos tipos de escenarios. Se realizó una modificación para generar las simulaciones de la intrusión. El accesorio para la intrusión se instaló en la zona donde se localiza el contador justo aguas arriba de la válvula al inicio de la conducción (parte baja de la foto). En el lado derecho de la foto se aprecia el tanque presurizado y en la parte superior de la misma, el depósito donde se tiene una descarga libre. En la foto se muestra la conducción (200m de tubería de PEHD).

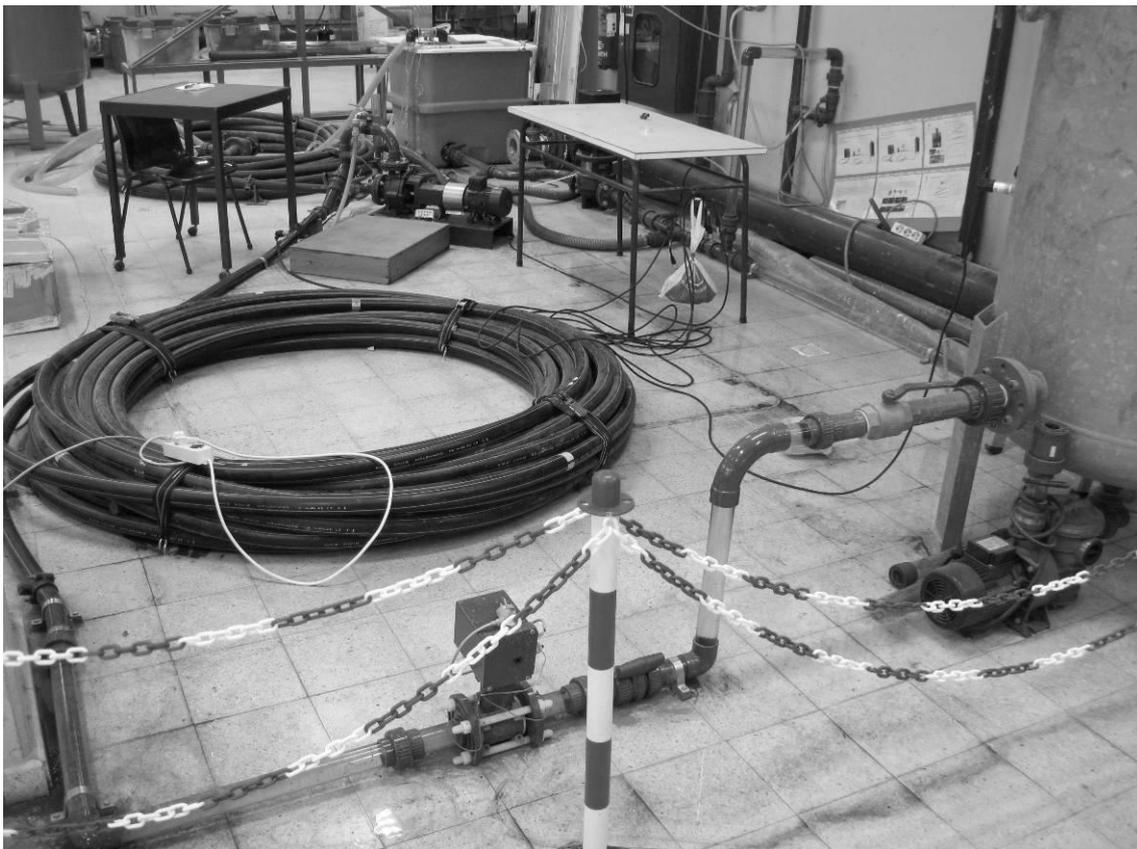


Figura 4.2 Instalación de transitorios de presión de CEHIDRO

El modelo experimental está compuesto por un circuito cerrado, el cual consta de los siguientes elementos. Un tanque presurizado, el cual genera la carga inicial de los ensayos a simular, por lo que se considera como el primer elemento aguas arriba de la instalación. Conectado al tanque presurizado se tiene una tubería de polietileno de alta densidad de diámetro exterior de 0,05m y espesor nominal de 0,003m. La tubería tiene una longitud de 200m y presenta una descarga libre a un depósito (Figura 4.3). Para cerrar el circuito se tiene un equipo de bombeo que lleva el agua desde el depósito en la descarga hacia el tanque presurizado.

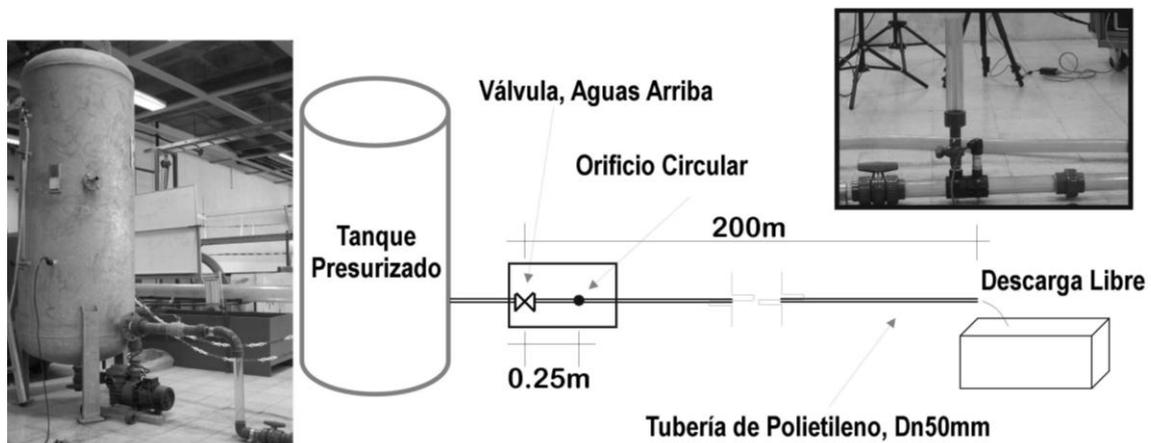


Figura 4.3 Esquema del modelo físico

Se tienen instalados cuatro transductores de presión: en el tanque, al inicio de la tubería justo aguas abajo de la válvula que generará el transitorio, en la tubería a 100m de distancia y al final de la misma. El caudal se mide con un contador al inicio de la conducción y con un vertedor en el depósito de la descarga libre.

Las lecturas de presión se captan mediante el programa Pico Scope™, se registra una lectura cada cinco centésimas de segundo. Se toman los datos desde que comienza el transitorio hasta el final de las oscilaciones experimen-

tales, el tiempo de estos ensayos puede durar entre 10 y 25 segundos. Los transductores miden en un rango de -1 a 24bar (presión relativa). Se obtiene la media de los datos registrados antes de que se genere el transitorio para tener la presión inicial en la conducción.

#### 4.2.2 Ensayos experimentales

El evento transitorio fue generado haciendo un cierre de la válvula aguas arriba de la conducción. Se realizan transitorios incluyendo un orificio circular que simula el fallo y que se encuentra a 0,25m de donde se genera el transitorio (Figura 4.4). El procedimiento se realiza para diversos escenarios, combinando dos tamaños de orificio y tres cargas de presión inicial diferentes. El diámetro de los orificios es de 2 y 4mm de diámetro. Las simulaciones del modelo comienzan con los caudales y presiones constantes, cuando el equipo está listo para hacer mediciones se inicia el transitorio.

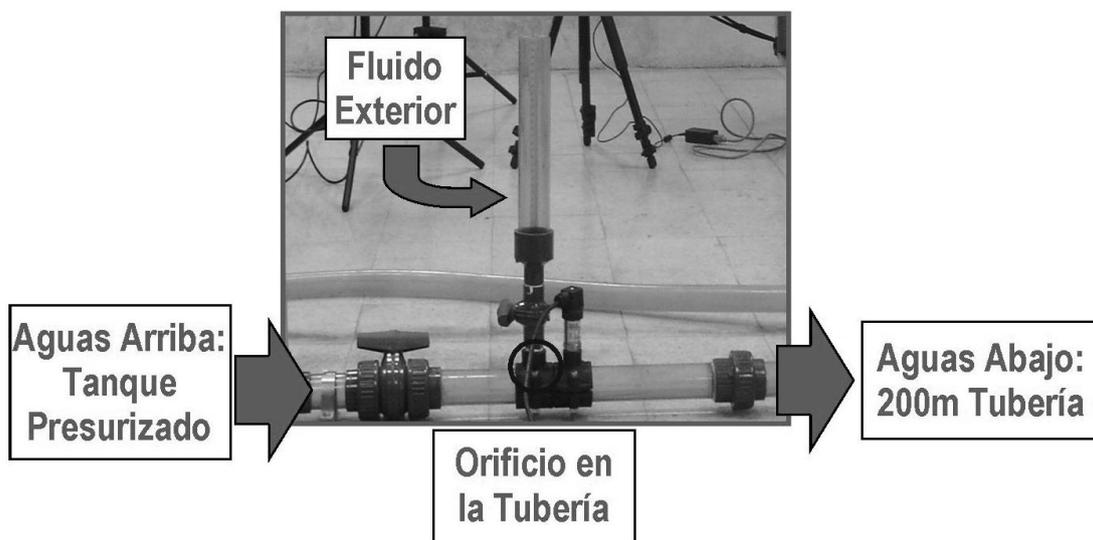


Figura 4.4 Condiciones del modelo experimental

En la Tabla 4.1 se muestran los datos iniciales de los seis escenarios de intrusión que son simulados durante el transitorio. Se ha tenido que medir el

caudal con el vertedor ya que el tramo donde se ubica el contador se ha utilizado para colocar el tramo de tubería con el orificio.

Tabla 4.1 Condiciones iniciales en los escenarios de intrusión

Ensayo	$H_0$ (mca)	h vertedor (cm)	Q (l/s)
E2-1	15,3	8,1	2,58
E2-2	13,5	7,8	2,35
E2-3	9,5	7,3	1,99
E4-1	15,0	8,0	2,54
E4-2	13,1	7,7	2,28
E4-3	9,2	7,2	1,96

En la Tabla se han mostrado los datos para los escenarios en estado permanente, siendo  $H_0$  la presión hidráulica en la tubería antes de la simulación del transitorio.  $h_v$  la altura sobre el vertedor triangular y  $Q$  el caudal de descarga cuando el sistema se encuentra en condiciones permanentes. Con respecto a éste caudal, la medición es mediante el vertedor triangular en la descarga de la tubería al final de la instalación. La altura del agua sobre el vertedor ( $h_v$ ) se capta para obtener el flujo a partir de la ecuación de Kindsvater-Shen [57] estandarizada por ISO-1980, ASTM-1993 y USBR-1997 (LMNO, 2007).

$$Q_v = 4.28C_v \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)(h_v + k)^{5/2} \quad [57]$$

donde,  $Q_v$  es el caudal sobre el vertedor,  $C_v$  el coeficiente de descarga del vertedor,  $\theta$  es el ángulo del vertedor,  $h_v$  es la altura del agua sobre el vertedor y  $k_v$  es el factor de corrección de la carga.

El vertedor se usa en canales abiertos para medir el flujo a partir de la medición de la altura sobre el vértice. Este accesorio es eficiente en flujos pequeños ya que la sección de descarga decrece con la disminución de la carga. Se verifica el caudal que se obtiene con el vertedor y con la formulación elegida

con respecto a ensayos realizados con el contador. Los resultados se muestran en la Figura 4.5.

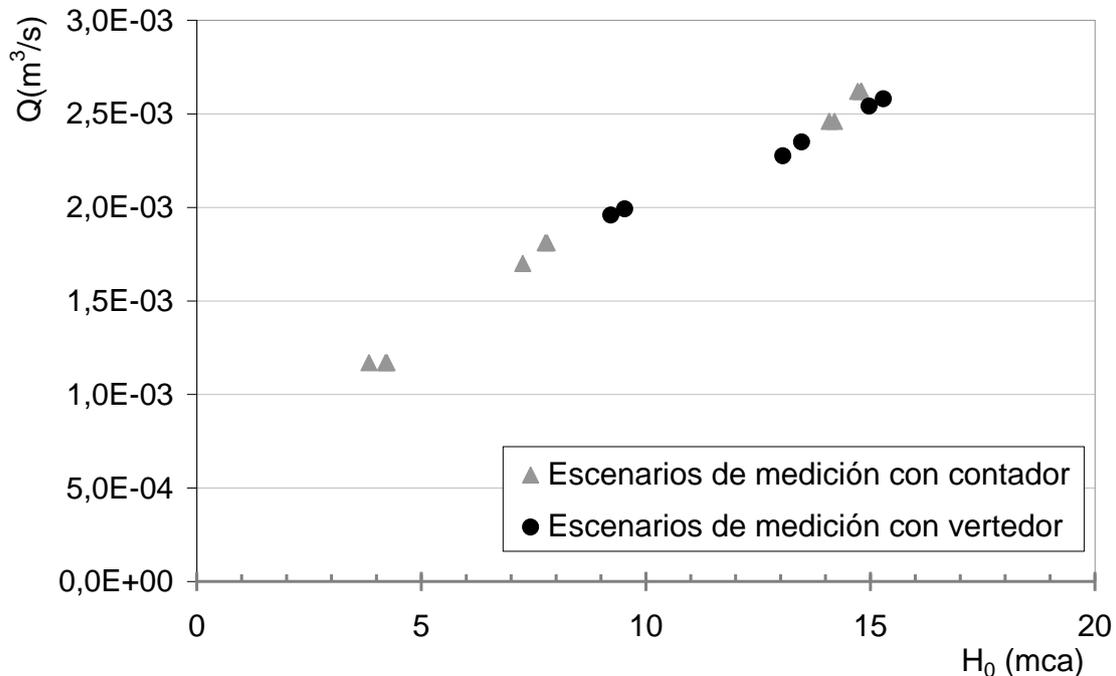


Figura 4.5 Verificación de los caudales medidos con vertedor

Después de las condiciones iniciales estacionarias, se genera el transitorio de presión. Se han hecho videos durante los ensayos experimentales, con ello se puede validar el modelo numérico CFD.

### 4.2.3 Resultados experimentales

Los seis escenarios que se realizaron en el laboratorio se representan mediante las oscilaciones de presión durante el tiempo del evento transitorio. En las figuras siguientes (Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8) se presenta la variación de la presión para los tres escenarios con fallo de 2mm de diámetro.

En cada una de las figuras se muestra la presión que se registran en dos secciones en la conducción. La primera al lado del orificio justo aguas abajo de

la válvula, en las figura se identifica como HFallo. Y la segunda medición que se realiza de la presión se localiza a 100m de la conducción y se define en la figura como H100m.

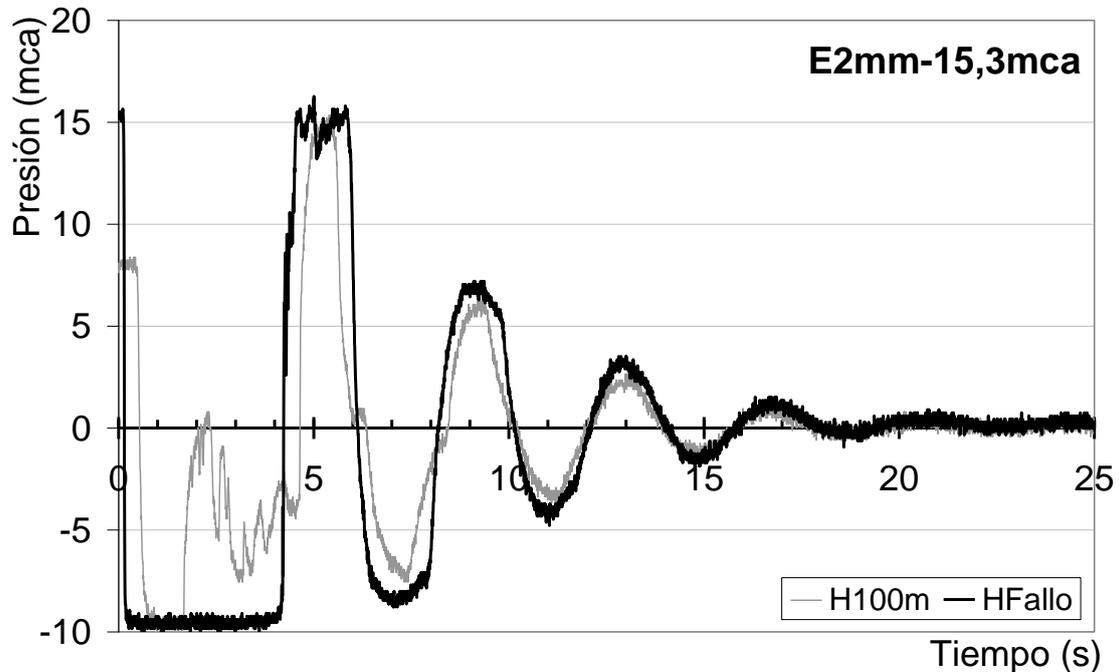


Figura 4.6 Escenario 2-1, H0 15mca. Fallo 2mm

El registro de la presión al lado del orificio (HFallo) muestra el efecto que se produce de cavitación durante los primeros segundos. Durante este tiempo se produce el mayor caudal de intrusión. Debido a que se ha realizado el cierre aguas arriba de la instalación, se produce gradualmente el vaciado de la conducción generando oscilaciones positivas y negativas que se van amortiguando en el tiempo. Cuando la válvula se abre se recupera la presión inicial.

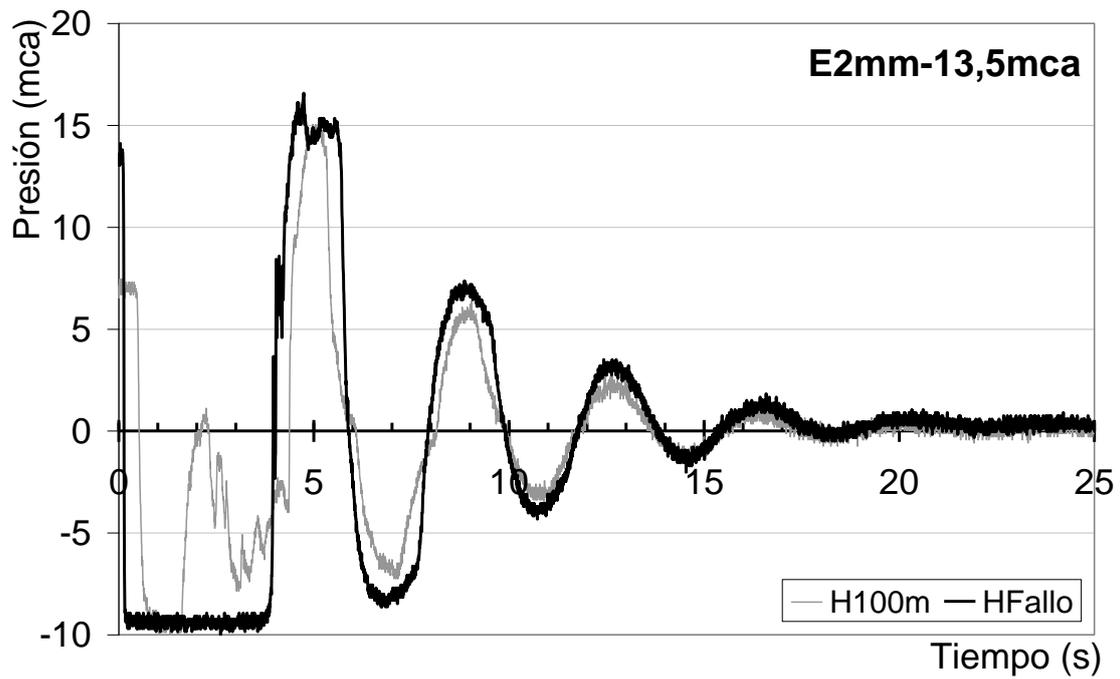


Figura 4.7 Escenario 2-2, H0 13,5mca. Fallo 2mm

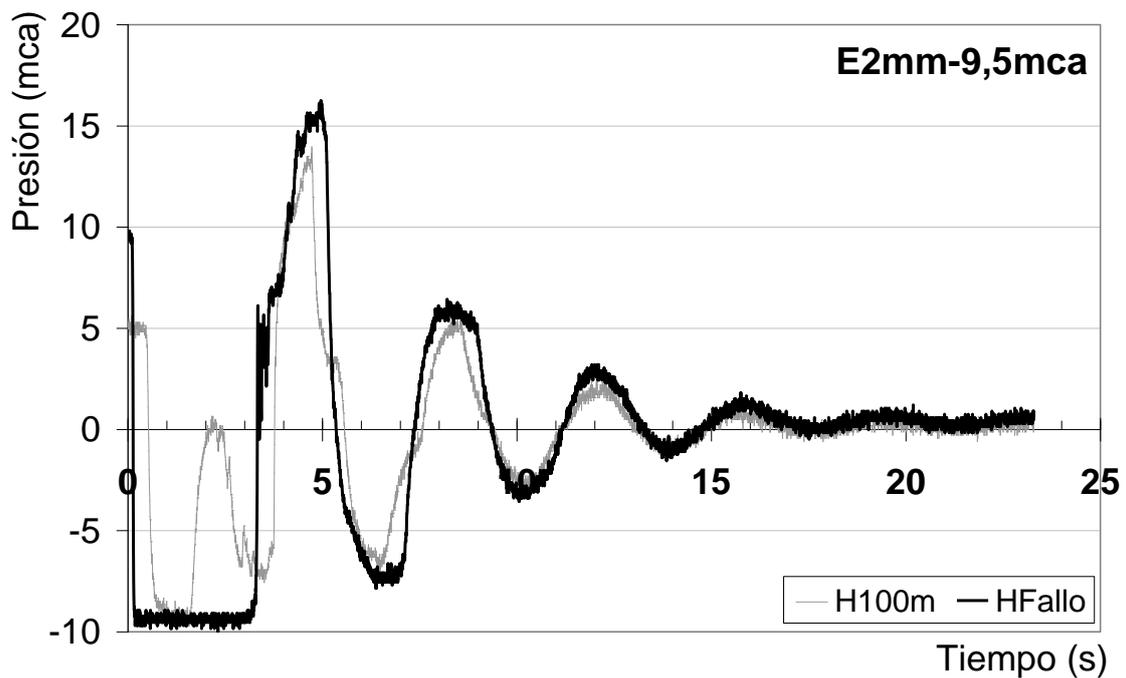


Figura 4.8 Escenario 2-3, H0 9,5mca. Fallo 2mm

En la Figura 4.9 se muestran los tres escenarios en conjunto, se observan las respuestas al cierre de la válvula aguas arriba de la instalación con una carga inicial diferente en el sistema. La sobrepresión que se alcanza en los tres

escenarios es prácticamente la misma, sobre los 15mca. Entre las diferencias principales son dos. La primera es que a menor carga inicial la presión negativa que se genera dura menor tiempo y durante el amortiguamiento posterior los picos de presión también disminuyen. Y la segunda es que aunque los tres registros del transitorio alcanzan una sobrepresión máxima de 15mca, entre mayor sea la carga inicial, más tiempo dura esta carga de presión máxima.

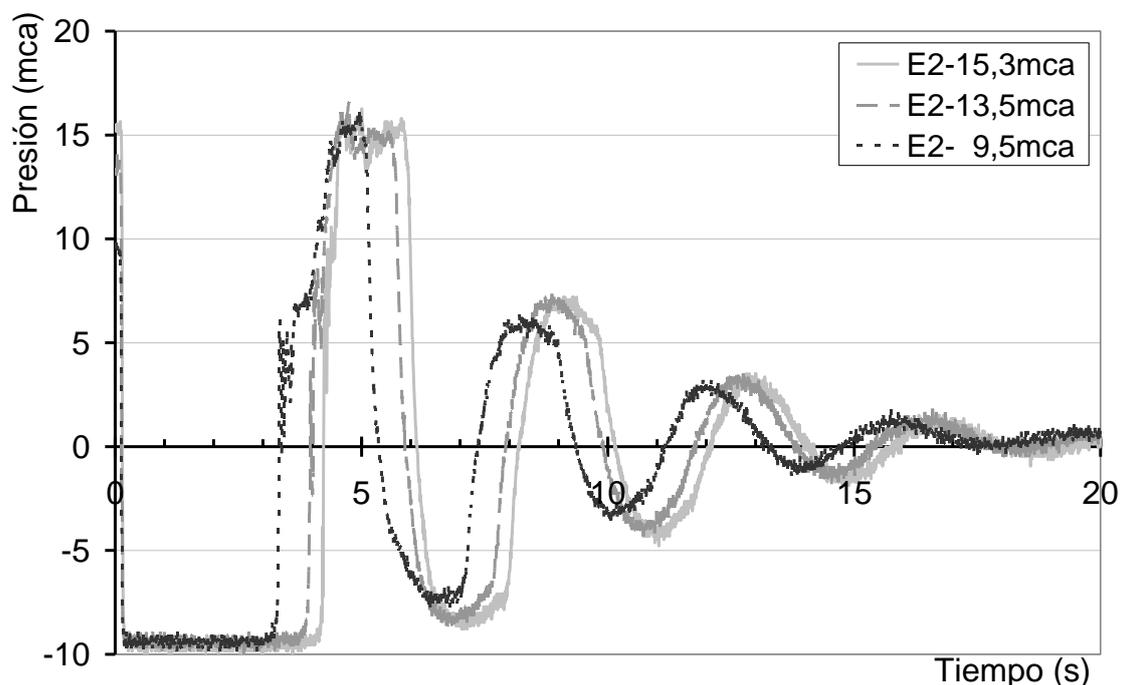


Figura 4.9 Escenarios de transitorios de presión con fallo de 2mm

En los escenarios del orificio de 4mm de diámetro se presentan las configuraciones de presión obtenidas. Se observa la respuesta del transitorio afectada por el fallo de mayor tamaño.

El fallo de 4mm de diámetro genera un amortiguamiento en el transitorio de forma que las oscilaciones de presión se presentan en menor cantidad para el mismo rango de presión inicial en la conducción que para el orificio de 2mm. Otros aspectos a diferenciar son, que el tiempo de la presión de cavitación se

reduce, el nivel de la carga en el exterior del fallo tiene que ser mayor ya que el caudal de intrusión es mayor debido a las dimensiones del fallo. Las oscilaciones de presión se reducen a dos positivas y dos negativas, y la sobrepresión máxima no alcanza ni siquiera el valor de la carga inicial (Figura 4.10).

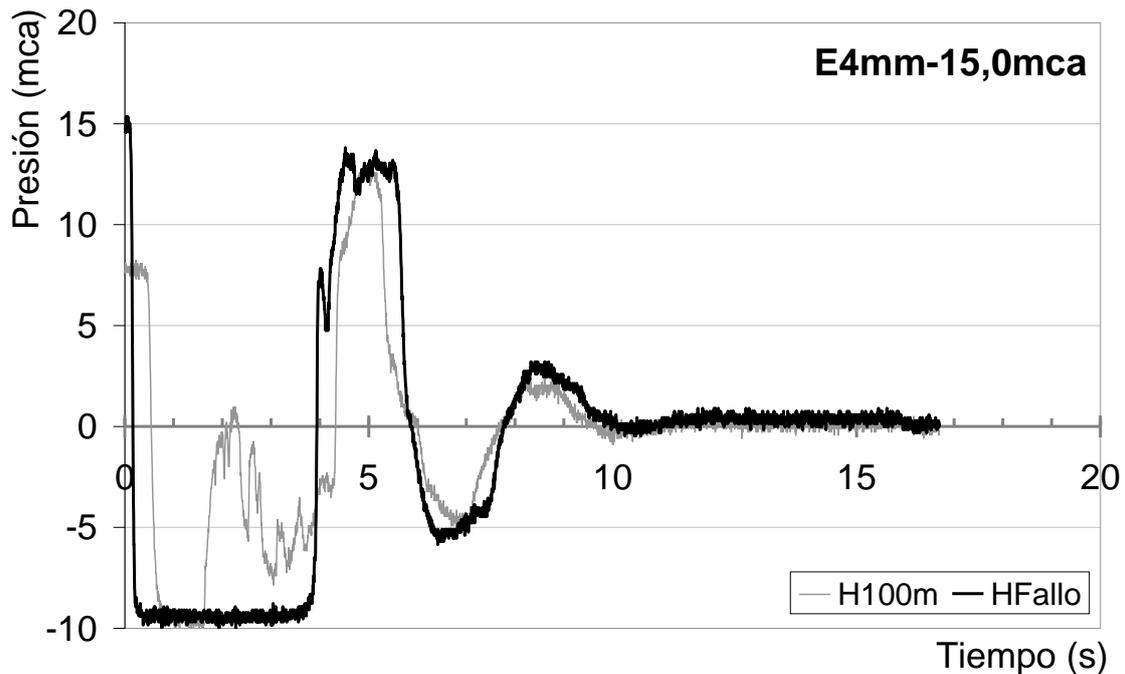


Figura 4.10 Escenario 4-1, H0 15mca. Fallo 4mm

Con respecto al escenario con una carga inicial de 13,1mca (Figura 4.11) se observa la disminución de la duración de la presión de cavitación con respecto al escenario de la carga inicial de 15,0mca. Aunque por otro lado se puede observar también que la sobrepresión máxima alcanza valores más altos en el escenario de 13,1mca. Esto se puede deber a dos factores que se han presentado durante el experimento. El primero es que el tiempo de cierre de válvula es 0,06s más lento en el escenario de 15,0mca y como segundo factor es que la carga exterior es mayor en 0,1m en el escenario de 15,0mca; pudiendo ambos factores influir en la respuesta del transitorio.

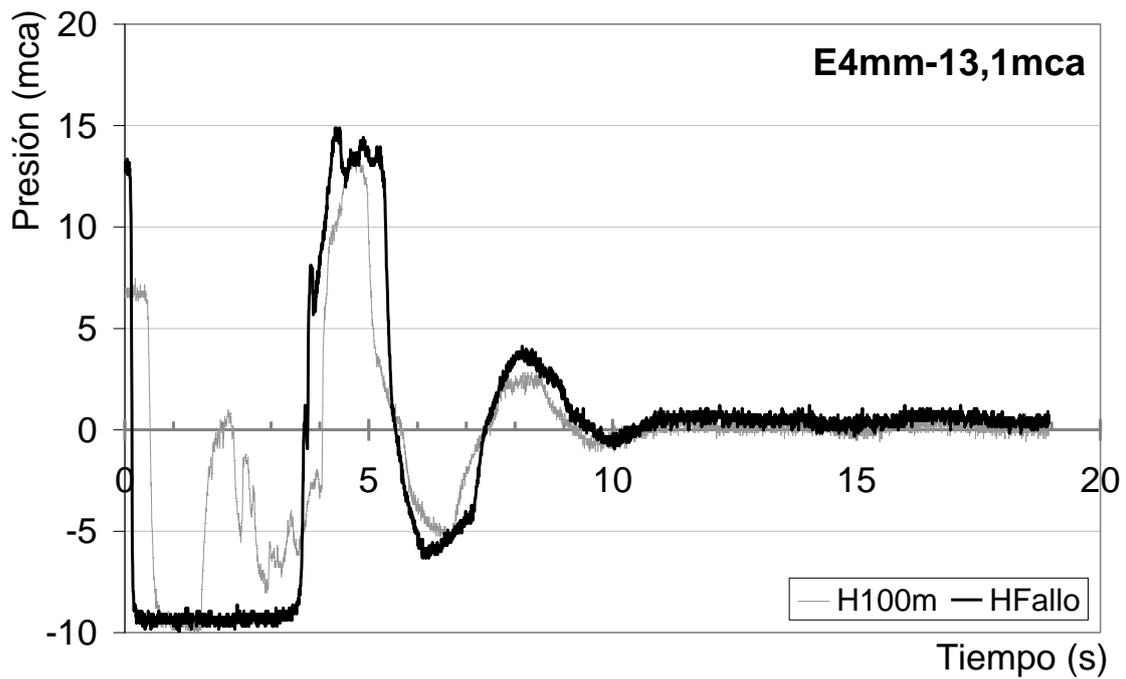


Figura 4.11 Escenario 4-2, H0 13mca. Fallo 4mm

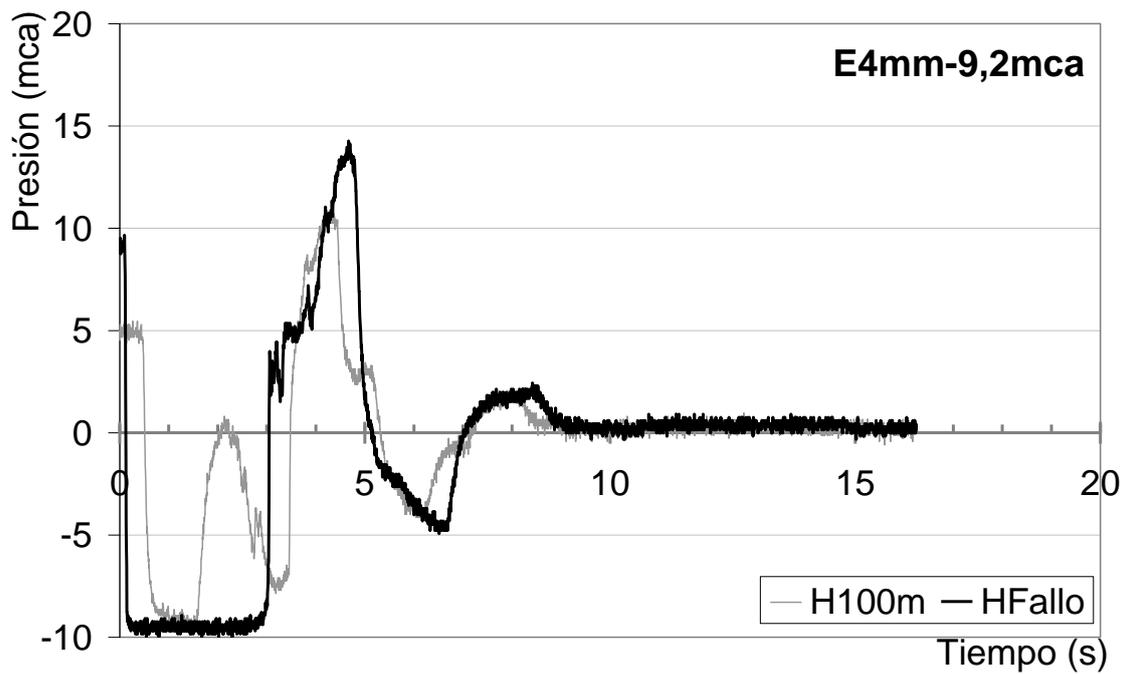


Figura 4.12 Escenario 4-3, H0 9mca. Fallo 4mm

Con respecto a los datos del escenario de 9,2mca (Figura 4.12); se presenta el mismo tiempo de cierre de válvula que en el escenario de 13,1mca y la diferencia de la carga inicial exterior en el fallo es de 0,03m. La respuesta del

transitorio en el escenario de 9,2mca se ve claramente disminuida en base a la carga inicial, con respecto a los otros dos escenarios.

En la Figura 4.13 se muestran los tres escenarios en conjunto, se observan las diferencias debido a la carga inicial en la conducción. Se puede considerar que el transitorio se ha desarrollado en la instalación como máximo en 13 segundos. Como se ha mencionado anteriormente, la respuesta del transitorio en el escenario de 15,0mca se ve disminuida con respecto al escenario de 13,1mca, por factores como la diferencia en el tiempo de cierre de la válvula y la carga exterior en el fallo. Esto se traduce en que los picos de sobrepresión son menores como se muestra en la Figura siguiente.

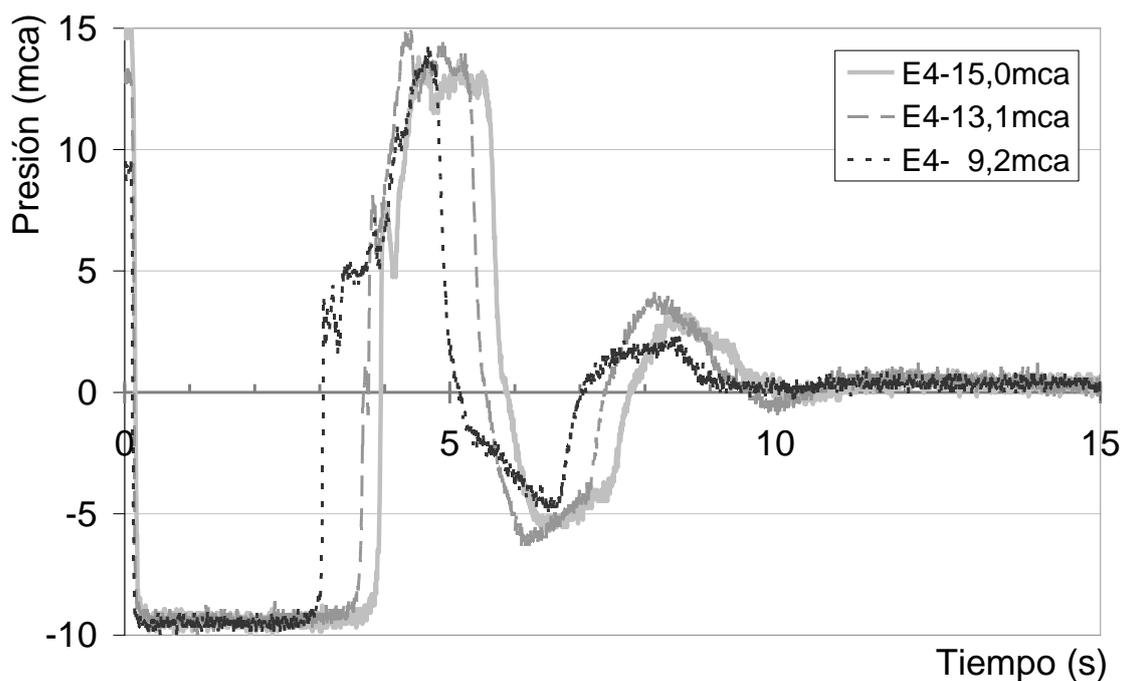


Figura 4.13 Escenarios experimentales con fallo de 4mm de diámetro

Para observar los efectos que pueden ocasionar los fallos en las conducciones se han generado las siguientes Figuras. En ellas se presentan los transitorios de presión que se generan con el cierre de válvula aguas arriba de la instalación.

En la Figura 4.14 se muestran las respuestas de las oscilaciones de presión para una carga inicial de 15,3mca para la conducción sin fallo y cuando se tiene el fallo, ya sea de 2 ó de 4mm. Las diferencias entre los distintos transitorios para una carga inicial similar se observa en el amortiguamiento de la presión sobre todo en el caso del orificio de 4mm. Las diferencias de la presión durante el transitorio cuando se tiene o no un orificio, es importante por lo que este efecto de amortiguamiento se debe tomar en cuenta para el modelo numérico.

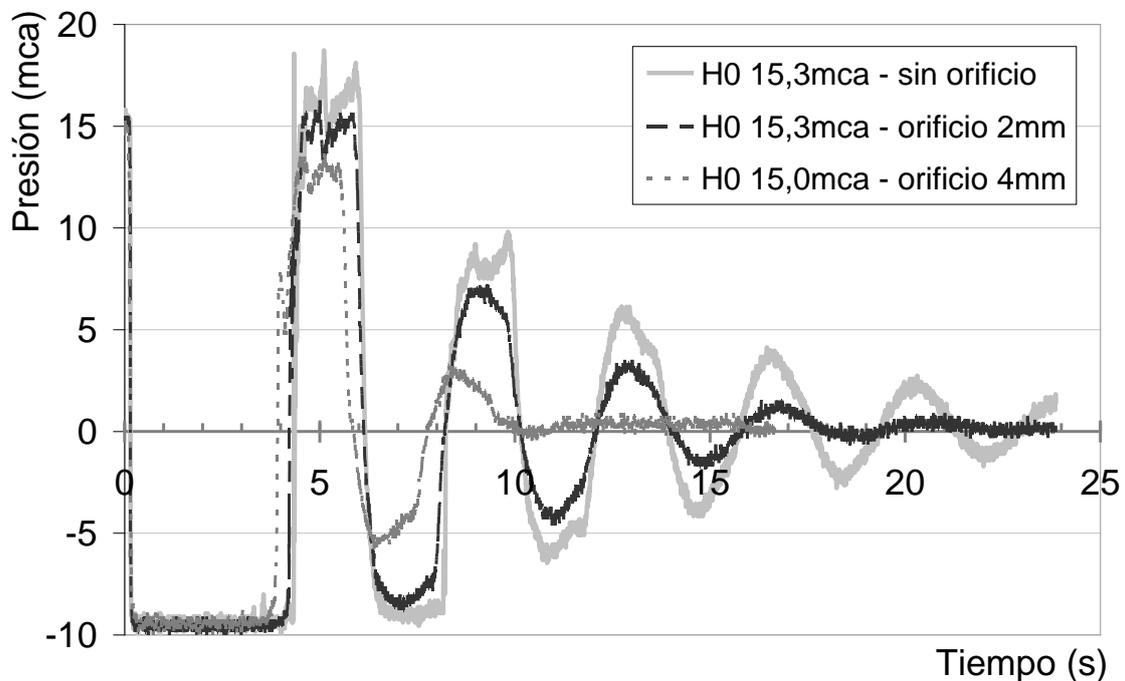


Figura 4.14 Escenarios de transitorios con una carga inicial de 15mca con y sin fallo

Con respecto al rango de presiones iniciales entre 8,3 y 9,5mca, se puede corroborar las mismas consideraciones hechas anteriormente y que se observan en la Figura 4.15. Aun cuando el transitorio sin fallo es el que presenta la menor carga inicial entre los tres escenarios presentados en la Figura, se observa la misma tendencia que ha sido descrita.

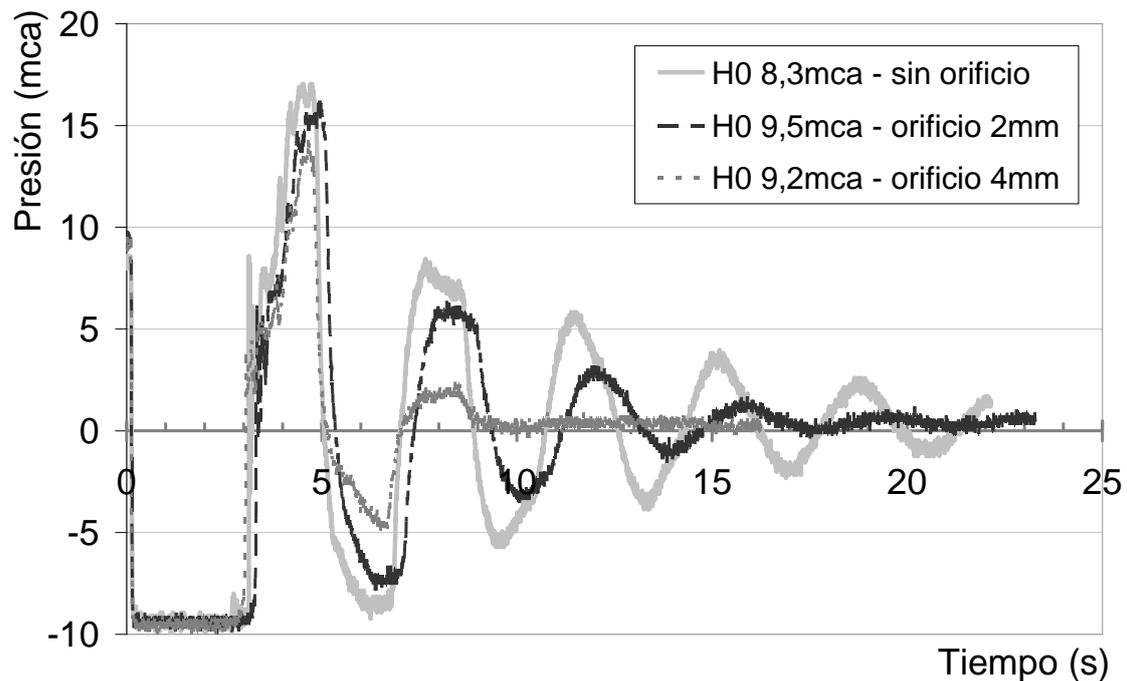


Figura 4.15 Escenarios de transitorios con carga inicial próxima a 9mca, con y sin fallo

En este aspecto, se puede relacionar la clasificación de los caudales de fuga. En el caso del orificio de 4mm en el rango de presiones simulado, el orificio se clasifica como de fácil detección. Por otro lado, el orificio de 2mm entra en la clasificación como una fuga de difícil detección. En este tipo de eventos transitorios, donde se alcanzan presiones negativas, el orificio de 4mm presenta menores oscilaciones negativas para las mismas condiciones de presión. Por lo que a mayor tamaño del fallo, se presentarán menos oscilaciones pero con volúmenes de intrusión y de fuga más grandes como están catalogados en la clasificación de caudales de fuga.

Los picos de presión y la influencia en la intrusión se pueden observar en imágenes captadas durante los ensayos. Diferenciando el fluido exterior con un colorante se distingue la magnitud de la intrusión en cuatro instantes y su efecto en la conducción (Figura 4.16).

Mediante estos videos se tiene una valoración cualitativa mediante la observación de la intrusión a través del colorante del fluido exterior durante la simulación.

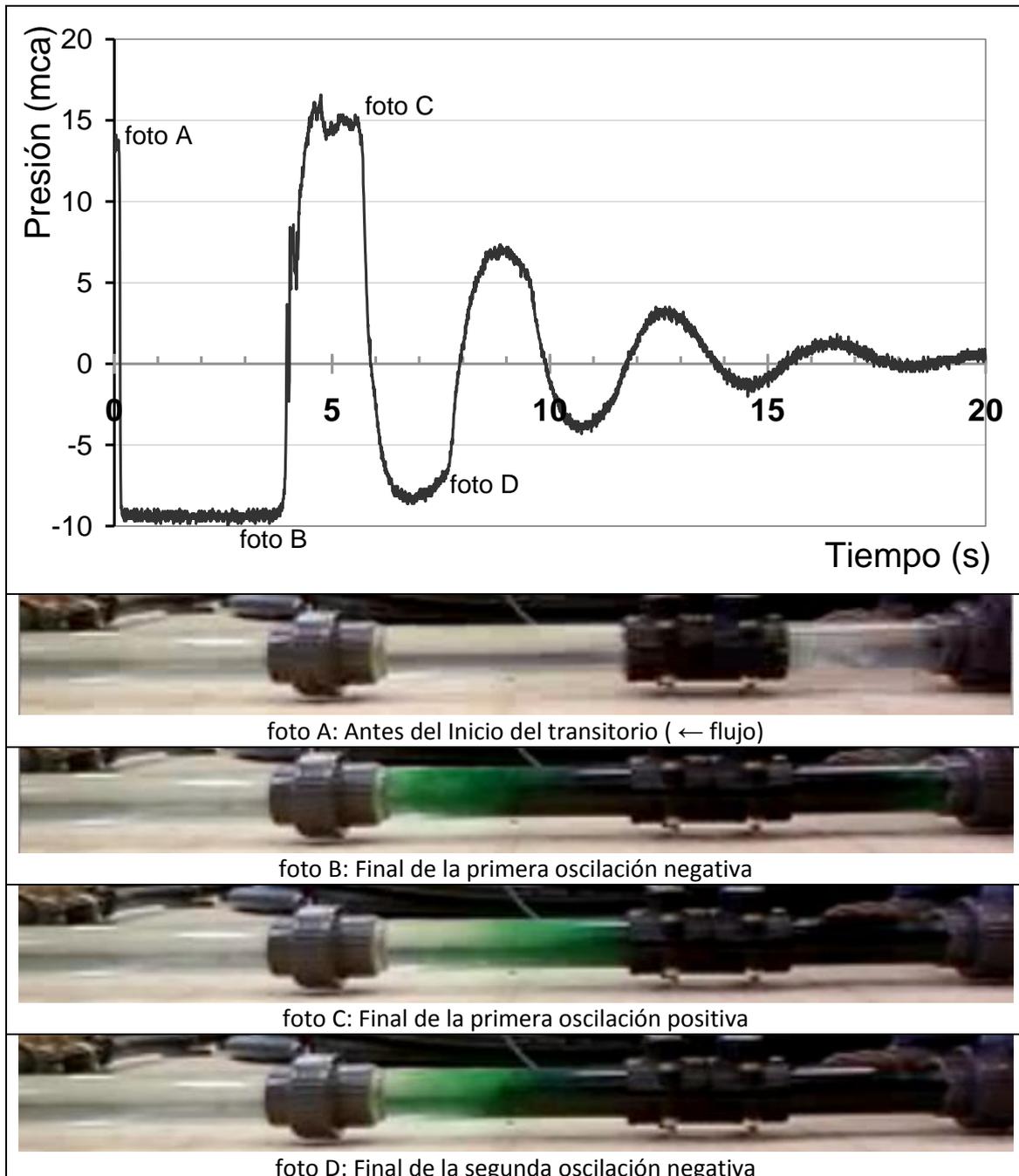


Figura 4.16 Instantes del evento de intrusión durante el transitorio

Por otro lado, los transitorios experimentales fueron captados mediante video de alta definición. La Figura 4.17 muestra un ejemplo de la variación del volumen en el tubo del fluido exterior. La diferencia entre los niveles máximos y mínimos en cada pico de presión representa el volumen que se ha introducido en la conducción o salido de ella, ya sea de fuga o de intrusión durante el evento transitorio.

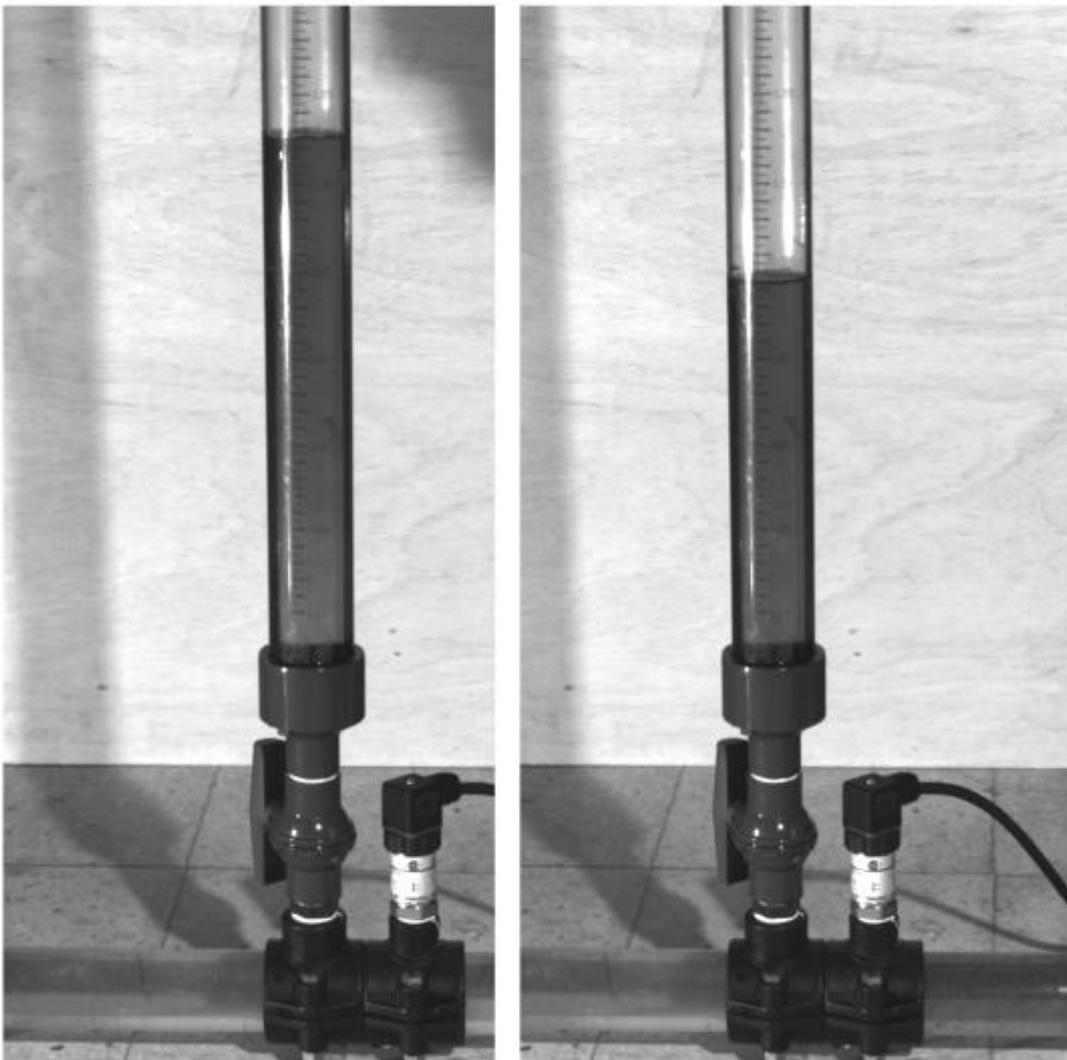


Figura 4.17 Imágenes a partir del video de alta definición

Basado en el comportamiento del fenómeno inducido por la maniobra de la válvula, la intrusión acumulada puede ser calculada, entre otras formas como

la que se presenta por López *et al.* (2010). Los volúmenes tanto de intrusión y de fuga pueden ser medidos a partir de estos niveles observados en los videos de alta definición en el tiempo que dure cada oscilación.

A continuación se muestra el modelo numérico del evento transitorio, esta se realiza en dos partes. En la primera se representa el evento con el MOC modificado para los seis escenarios transitorios. En la segunda representación numérica se utiliza el modelo CFD para obtener los caudales de intrusión durante el transitorio.

### **4.3 Aplicación del MOC con Cavitación y Orificio**

En esta etapa del modelo se obtiene la representación numérica del transitorio de presión en el que se incluye la cavitación (Borga *et al.*, 2004) y en el cual se ha hecho la incorporación del orificio para tomar en cuenta sus efectos en la respuesta numérica.

En el modelo desarrollado se consideró la variación propuesta en las ecuaciones [39], [40] y [42]. El modelo trabaja con una discretización fija. Las secciones de la tubería que presentan presión de vapor están consideradas como fronteras internas al igual que la sección en la que se presenta el orificio. La solución numérica se basa en el modelo tradicional vapor-líquido, con una aproximación de segundo orden para los cálculos cuasi-estáticos de pérdida de carga por fricción. Las incorporaciones realizadas al modelo influyen en la disipación observada y en la dispersión de la presión del transitorio debido a la fricción mecánica y a los efectos dinámicos inerciales (Borga *et al.*, 2004).

Las tablas siguientes (Tabla 4.2 y Tabla 4.3) muestran los parámetros que se obtienen de las simulaciones experimentales. El tiempo de cierre de válvula y

la carga exterior media se obtienen a partir del video de alta definición. La tensión de vapor se obtiene del valor promedio que se capta durante la simulación con el transductor.

Tabla 4.2 Descripción de las características físicas del ensayo 2mm

<b>Parámetro</b>	<b>E2 15,3</b>	<b>E2 13,5</b>	<b>E2 9,5</b>
Carga inicial aguas arriba (mca)	15,3	13,5	9,5
Caudal de descarga (m <sup>3</sup> /s)	0,0026	0,0023	0,0020
tensión de vapor media (mca)	-9,5	-9,4	-9,4
Tiempo de cierre de válvula (s)	0,12	0,11	0,12
Carga exterior media (mca)	0,45	0,49	0,40

Tabla 4.3 Descripción de las características físicas del ensayo 4mm

<b>Parámetro</b>	<b>E4 15,0</b>	<b>E4 13,1</b>	<b>E4 9,2</b>
Carga inicial aguas arriba (mca)	15,0	13,1	9,2
Caudal de descarga (m <sup>3</sup> /s)	0,0025	0,0023	0,0020
Máxima tensión de vapor (mca)	-9,4	-9,3	-9,5
Tiempo de cierre de válvula (s)	0,17	0,11	0,11
Carga exterior media (mca)	0,43	0,36	0,42

Otros datos que son parte de la instalación y que se utilizan en el modelo son los que se muestran en la Tabla 4.4. Estos son constantes para todos los escenarios.

Tabla 4.4 Datos de la instalación física para la simulación del modelo numérico

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Longitud de la Tubería	200m
Diámetro de la Tubería	0,044m
Carga hidráulica en la descarga libre	0,5mca
Celeridad	240m/s
Tiempo de simulación en escenarios de 2mm	23 - 28s
Tiempo de simulación en escenarios de 4mm	15s

La celeridad se ha considerado en base a las configuraciones resultantes de la variación de la presión en los ensayos experimentales, variando en un rango de 230 a 250m/s.

### 4.3.1 Resultados del MOC modificado

Gráficamente el MOC de disipación obtiene la representación del transitorio en los escenarios simulados de forma experimental. El ajuste se observa en las siguientes Figuras.

El modelo numérico reproduce el transitorio de presión, de forma que las oscilaciones de presión tanto negativas como positivas se ajustan a lo largo del tiempo (en el eje de la escala temporal) de mejor manera para el orificio de 2mm (Figura 4.18, Figura 4.19 y Figura 4.20), para estos escenarios el ajuste se realiza incluyendo el modelo de cavitación.

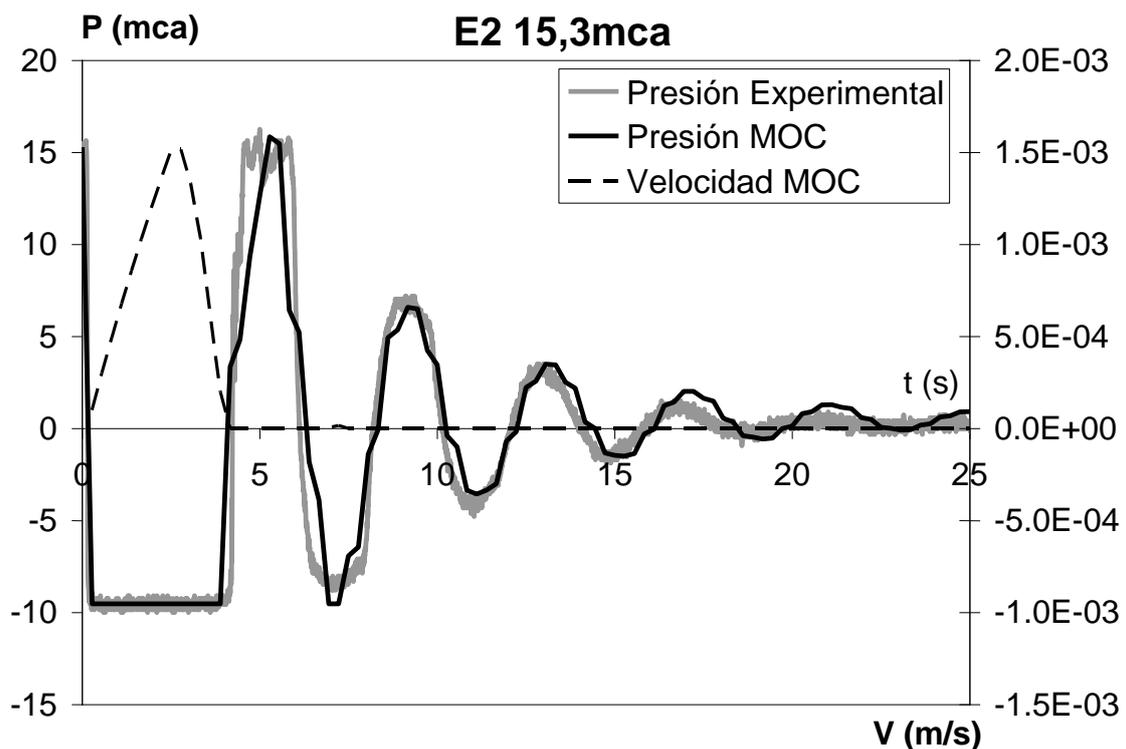


Figura 4.18 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 15,3mca

El ajuste que se obtiene de cada escenario representa las condiciones de frontera para la simulación del modelo en CFD en estado no permanente.

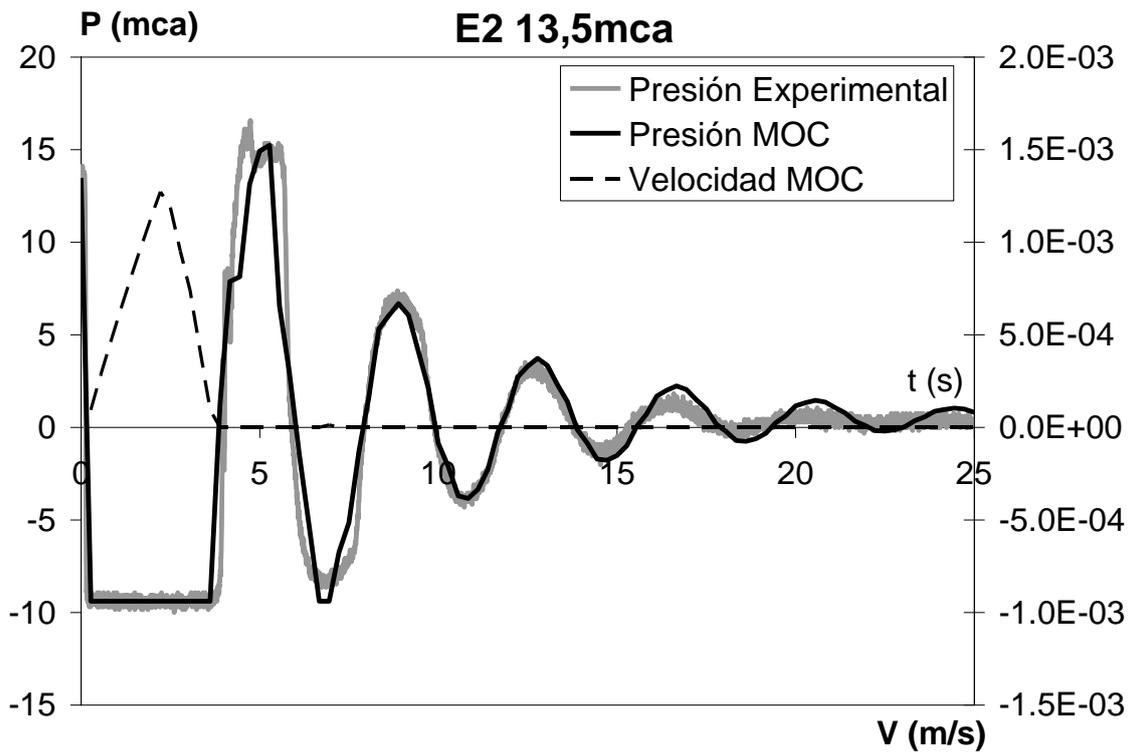


Figura 4.19 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 13,5mca

Para los escenarios del orificio de 2mm el paso de tiempo fue de 0,2778s

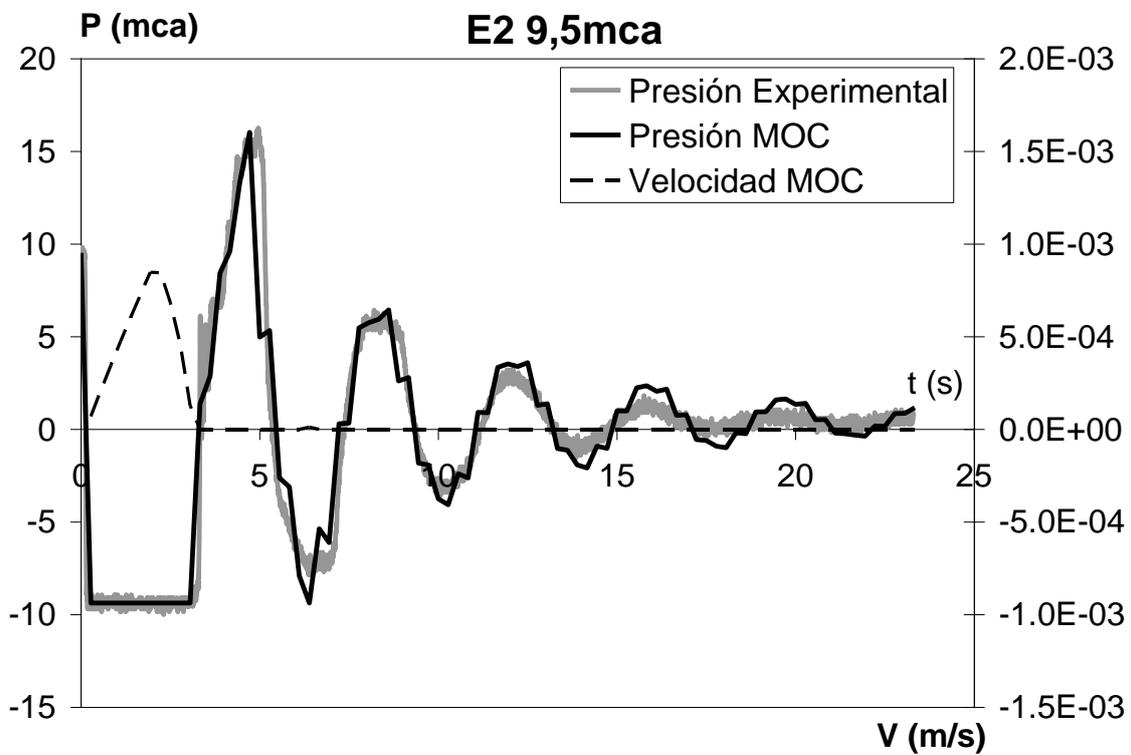


Figura 4.20 Ajuste del MOC para el Escenario 2mm – 9,5mca

Para el caso del orificio de 4mm, donde el efecto del fallo es mayor, el modelo incluye el efecto del orificio; en estos escenarios el efecto del amortiguamiento de la presión se reproduce de mejor manera con ésta consideración (Figura 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.23).

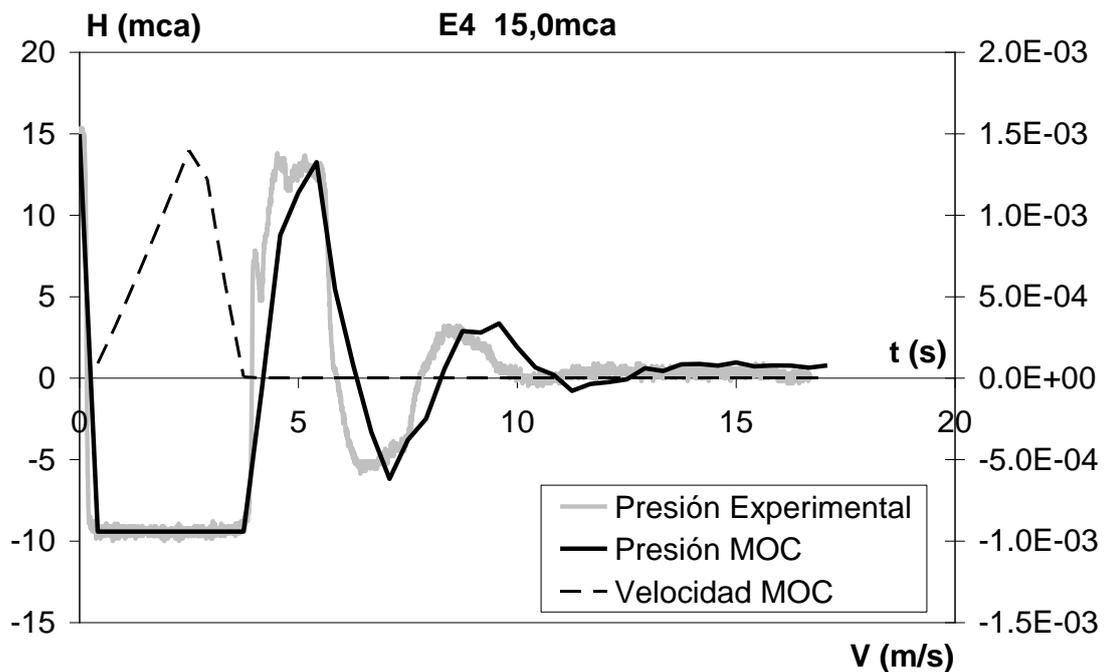


Figura 4.21 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 15,0mca

Con estos resultados se obtiene una tabla representativa de cada evento en la cual se incluye el valor de presión y velocidad media en la sección de la zona del fallo durante el evento de simulación. En este sentido se obtienen las condiciones de frontera de presión y velocidad desde el modelo MOC modificado, la respuesta del fallo se puede ahora captar con estas condiciones en el modelo CFD durante el transitorio de presión y obtener los volúmenes de manera continua durante el evento y en su totalidad de forma numérica.

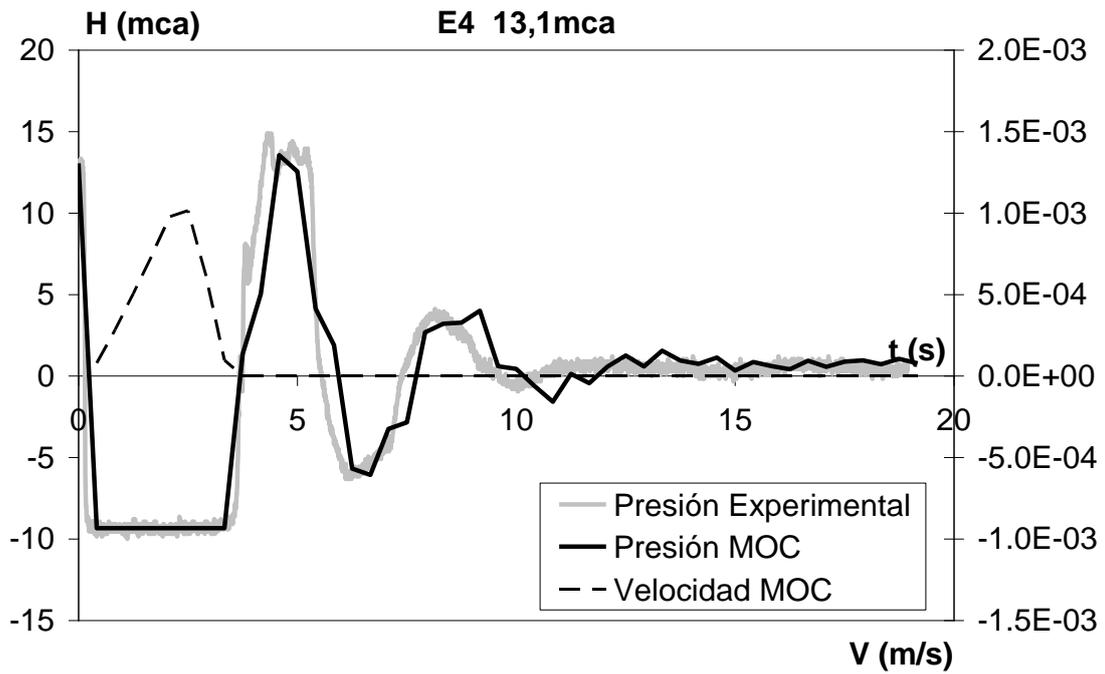


Figura 4.22 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 13,1mca

En la representación de los escenarios del orificio de 4mm el paso de tiempo fue de 0,4167s.

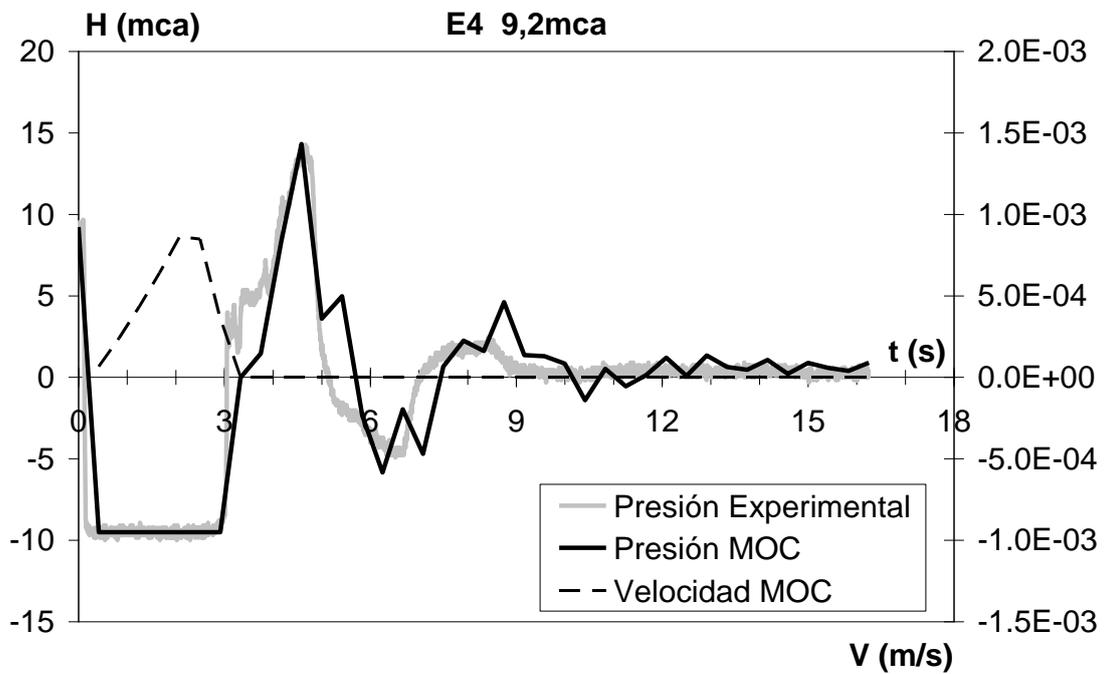


Figura 4.23 Ajuste del MOC para el Escenario 4mm – 9,2mca

## 4.4 Modelo CFD Aplicado al Evento Transitorio

El objetivo de modelo CFD es obtener de forma numérica la interacción entre un medio exterior y el flujo en una tubería a través de un fallo durante el transitorio de presión. De esta manera las simulaciones se centran en obtener los volúmenes de intrusión y de fuga durante el transitorio. Con estos resultados se contabilizará la intrusión acumulada al final del evento.

Las simulaciones se realizan en dos etapas. En la primera de ellas se establecen las condiciones iniciales que representan el escenario antes de provocar el evento transitorio. En la segunda etapa simula el transitorio en base a los resultados obtenidos en el MOC modificado.

### 4.4.1 Modelo de CFD antes del transitorio

Los resultados de este modelo serán las condiciones iniciales para el modelo transitorio en CFD. Las características a modelar se describen a continuación. La tubería tiene un diámetro interior de 0,045m; el volumen de control está conformado por un tramo de tubería y un espacio exterior como se describe en las figuras siguientes (Figura 4.24 y Figura 4.25). El orificio se localiza a dos diámetros de la frontera aguas arriba y a cuatro diámetros de la frontera aguas abajo, por lo que el total de la longitud de la tubería es de 0,27m. El espesor de pared de la tubería es de 0,0025m; el tramo que aquí se simula representa la tubería en donde se tiene el orificio y el transductor de presión, este trozo de tubería es de PVC rígido, por ello difiere en el diámetro interior y al espesor de la pared con respecto a la tubería de PEHD.

La geometría del medio exterior se ha modificado para optimizar la convergencia de los parámetros de turbulencia para los escenarios de los

eventos transitorios. Anteriormente la geometría presentaba un cilindro en la parte exterior del volumen de control, ahora se presenta un volumen con una forma cónica. En este sentido, la convergencia de los parámetros de turbulencia se alcanza de manera más eficiente, por lo que los residuos se presentan de forma más estable para cada paso de tiempo.

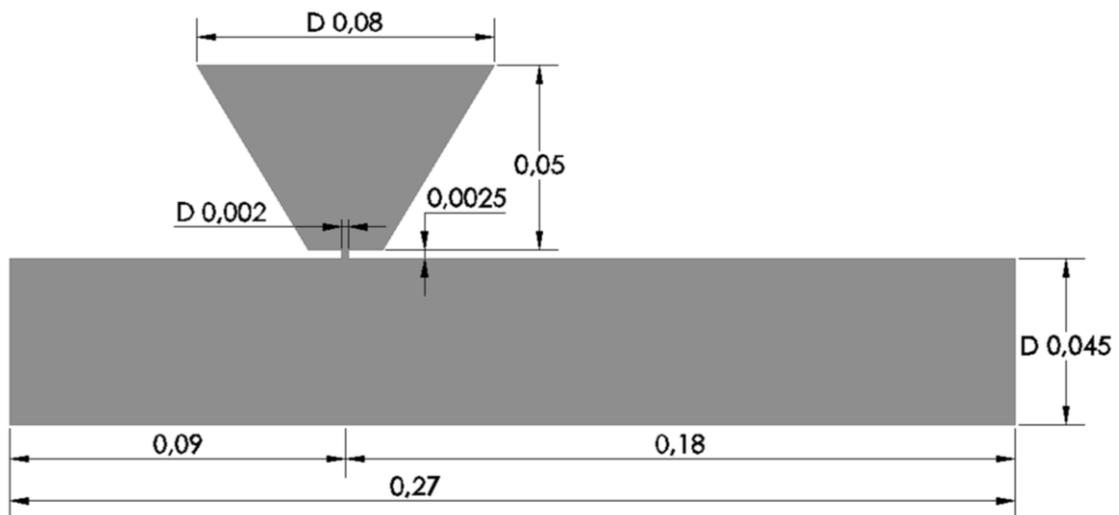


Figura 4.24 Dimensiones del volumen de control para el fallo circular de 2mm

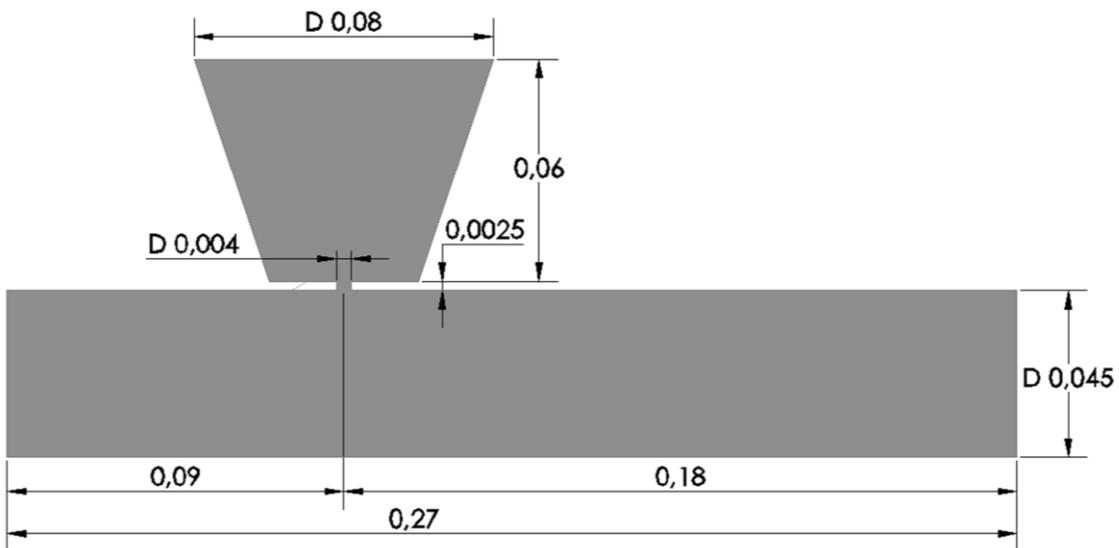


Figura 4.25 Dimensiones del volumen de control para el fallo circular de 4mm

Las condiciones de frontera se mantienen como en el evento de intrusión permanente (Figura 4.26). La entrada de la tubería se especifica con velocidad

normal a la frontera (*Velocity Inlet*) y representa el caudal que circula por la instalación. El fluido exterior está indicado como una frontera de carga (*Stagnation Inlet*). En el extremo del tubo aguas abajo del fallo, se tiene una frontera de salida en la que se especifica la carga de presión (*Pressure Outlet*) en principio en estado permanente y después variable en base a los resultados de MOC modificado. En la tubería, en el fallo y en el exterior se especifica frontera de pared (*type Wall*). En la pared de la tubería y en el fallo, se especifica un método de esfuerzo cortante como de no deslizamiento; en el cual el flujo cercano a la pared es laminar (tratamiento "*all  $y+$  wall treatment*"). Mientras que la pared en el exterior es de tipo deslizamiento. El volumen de control se hace considerando un plano simétrico en la sección media de la tubería, por lo que esta cara se simula con una frontera de plano simétrico.

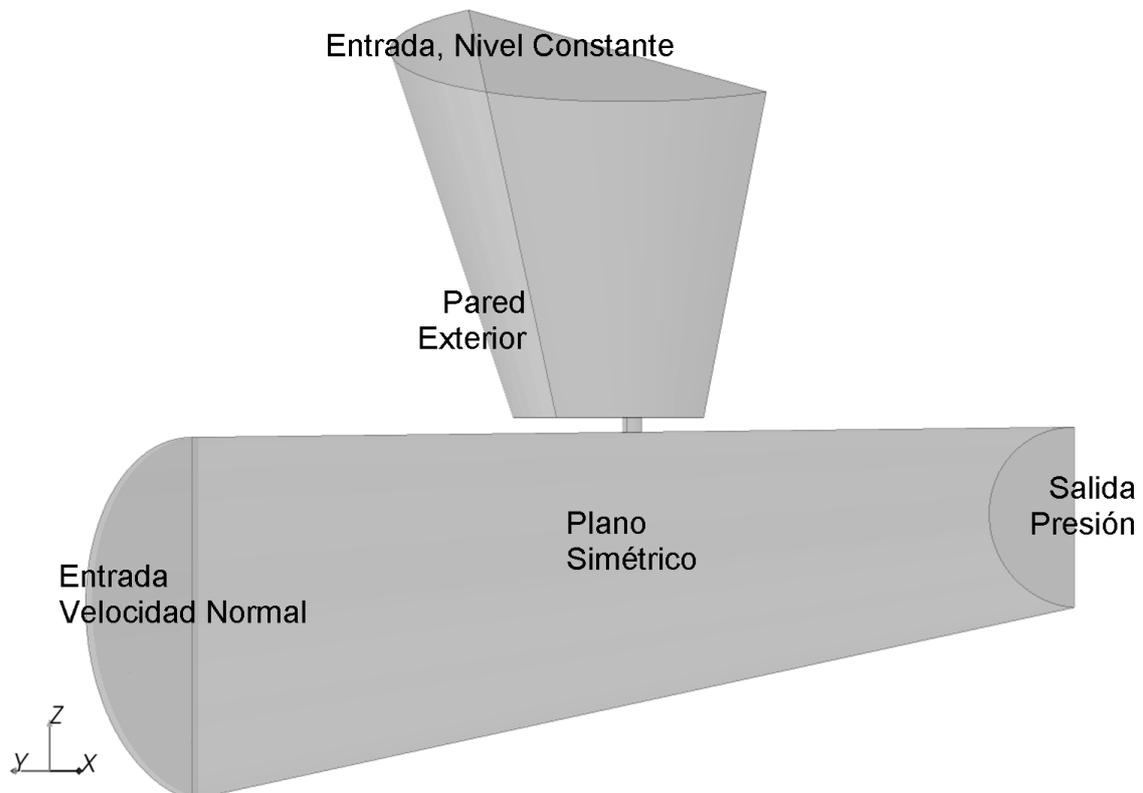


Figura 4.26 Fronteras del volumen de control para los escenarios en transitorio

En base al Número de Reynolds para la tubería, la intensidad de turbulencia a partir de la ecuación [14] es aproximadamente 4,0%. Mientras que la longitud de escala de la turbulencia en la tubería tiene un valor de 0,0032m en base a la ecuación [15]. Se realiza una malla con las características similares

Las mallas que se generan para la simulación transitoria están basadas en la validación realizada en el Capítulo 3. En la Figura 4.27 se muestra la malla para el fallo circular de 4mm.

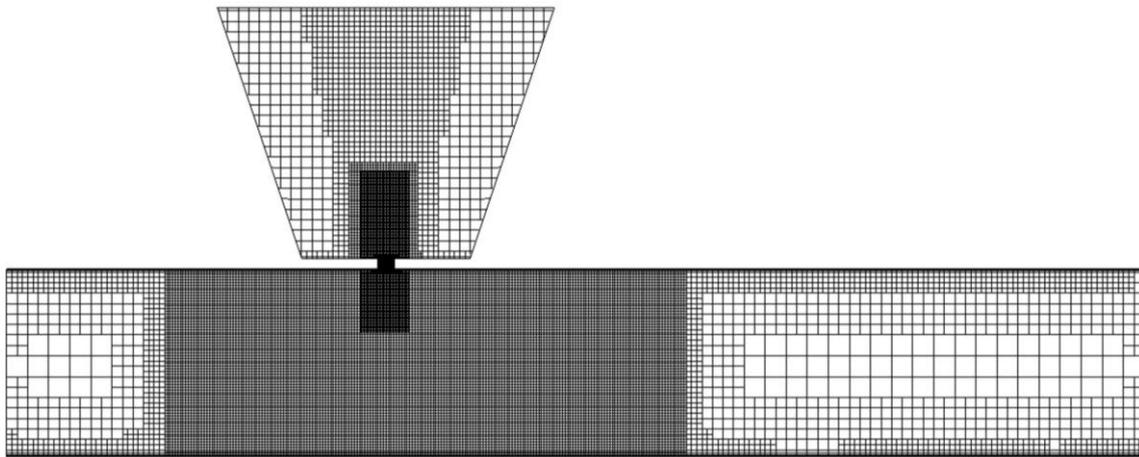


Figura 4.27 Malla para los escenarios del fallo circular de 4mm

De igual manera se usa el modelo “*Passive scalar*”, con el cual se representa el trazador del fluido exterior y con ello se le dará seguimiento a éste fluido durante la simulación.

En una primera etapa se hacen las simulaciones en estado permanente, los resultados de estos escenarios son las condiciones iniciales en los seis escenarios para la simulación transitoria. Los datos capturados durante los ensayos experimentales y que se muestran en la

Tabla 4.5 son los valores de la presión, la velocidad y la carga exterior que se definen en las fronteras para obtener las condiciones iniciales.

Tabla 4.5 Condiciones iniciales en el modelo CFD para los escenarios de 2 y 4mm

Ensayo	$H_0$ (pa)	$v$ (m/s)	$h_{\text{Exterior}}$ (pa)
E2 15,3	149.985	1,60	4.884
E2 13,5	132.081	1,45	5.588
E2 9,5	93.420	1,19	3.720
E4 15,0	146.843	1,60	4.250
E4 13,1	127.973	1,43	3.556
E4 9,2	90.431	1,23	4.166

Los valores de la velocidad se obtuvieron con el vertedor, anteriormente se ha mencionado su cálculo y su aproximación (apartado 4.2.2). Por otra parte, la carga exterior ( $h_{\text{Exterior}}$ ) se obtiene de los videos realizados durante las simulaciones. Con estos elementos se calcula el estado permanente (Figura 4.28 y Figura 4.29).

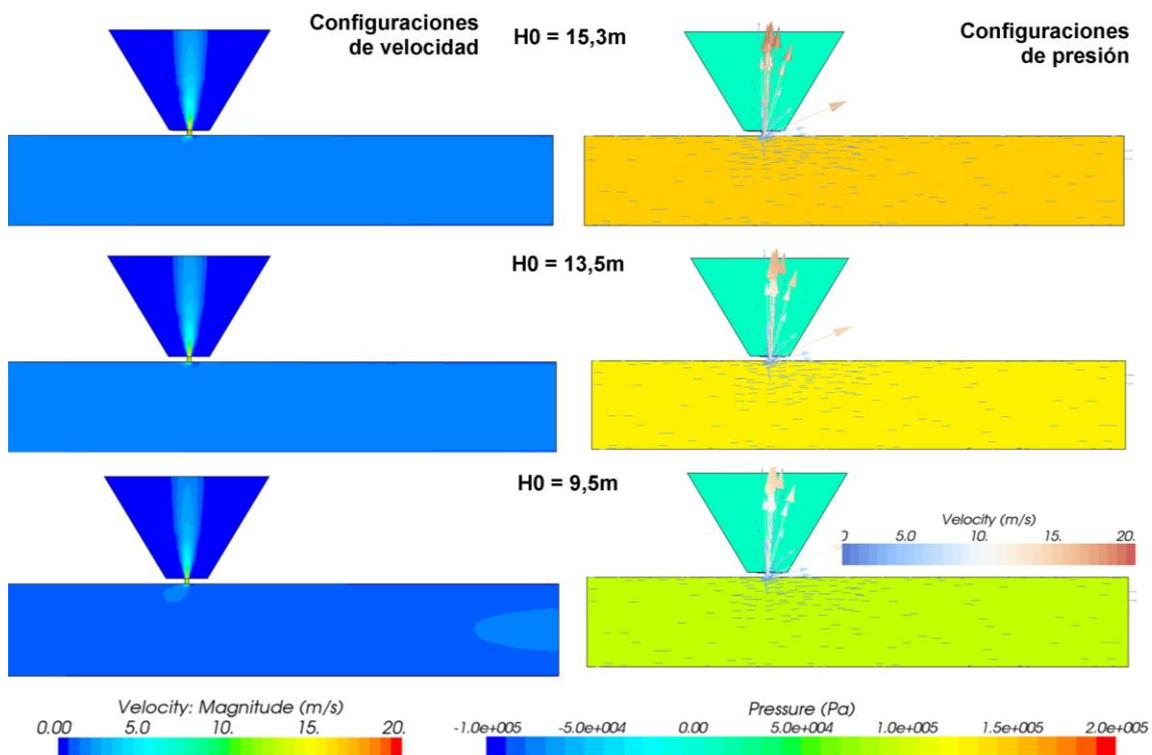


Figura 4.28 Escenarios de velocidad y presión en estacionario (fallo circular 2mm)

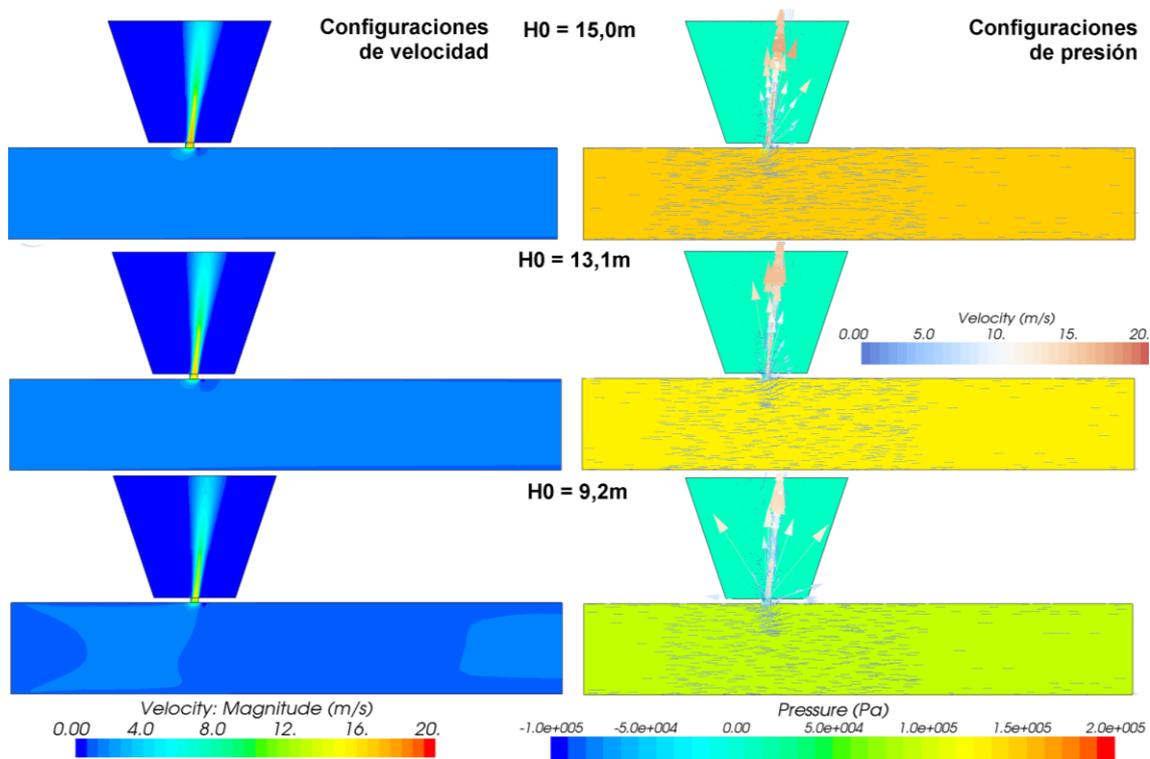


Figura 4.29 Escenarios de velocidad y presión en estacionario (fallo circular 4mm)

Debido a que se tiene una carga en la tubería los caudales en los fallos simulados son de fuga. Estos resultados son las condiciones iniciales para la simulación en transitorio, estas condiciones están basadas en las consideraciones hechas en el apartado 3.8 (Aplicación del Modelo CFD); por lo que el modelo numérico se ha validado con dicho planteamiento. A partir de estos resultados se procede con el cálculo del modelo transitorio, las condiciones del modelo numérico se mantienen, solo cambian las condiciones de fronteras durante la simulación temporal.

#### 4.4.2 Modelo de CFD durante el transitorio

La simulación en estado no permanente se modela en base a los resultados del MOC modificado, en cada paso de tiempo se presentan unas condiciones de presión y velocidad que se han ajustado a los resultados del

modelo físico de la simulación transitoria. En este modelo las condiciones de frontera están establecidas para cada paso de tiempo, por lo que su solución es análoga a los denominados modelos de análisis dinámico cuasi-estáticos o de simulación en período extendido.

El programa de CFD permite capturar las condiciones de frontera que varían con el tiempo a partir de un registro de datos. Se ha trabajado en condiciones temporales considerando la malla tanto para el modelo de los fallos de 2mm y de 4mm, los parámetros se muestran en la Tabla 4.6.

Los modelos numéricos se verifican a través de varios parámetros durante su simulación, pudiendo ser a través del valor de la presión (Figura 4.30) y el balance del flujo de masa (Figura 4.31).

Tabla 4.6 Condiciones temporales en el modelo CFD no permanente

<b>Ensayo</b>	<b><math>t_{\text{simulacion}}</math> (s)</b>	<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	<b>Pasos de tiempo</b>	<b>Iteraciones por paso de tiempo*</b>
E2 15,3	27	0,2778	99	
E2 13,5	28	0,2778	103	de 250 a 1.000
E2 9,5	23	0,2778	85	
E4 15,0	15	0,4167	37	
E4 13,1	15	0,4167	37	de 300 a 5.000
E4 9,2	15	0,4167	37	

\* Las iteraciones en los pasos de tiempo varían según el salto de presión simulado

Durante cada paso de tiempo se simula un escenario dependiendo de la condición anterior a éste. El modelo trabaja para las nuevas condiciones de contorno de acuerdo con los resultados del MOC modificado hasta alcanzar la convergencia.

En la Figura 4.30 se presenta el valor de la presión en la frontera de entrada para cada iteración durante la simulación, con ello se verificaba la estabilidad de la convergencia durante la simulación para cada paso de tiempo.

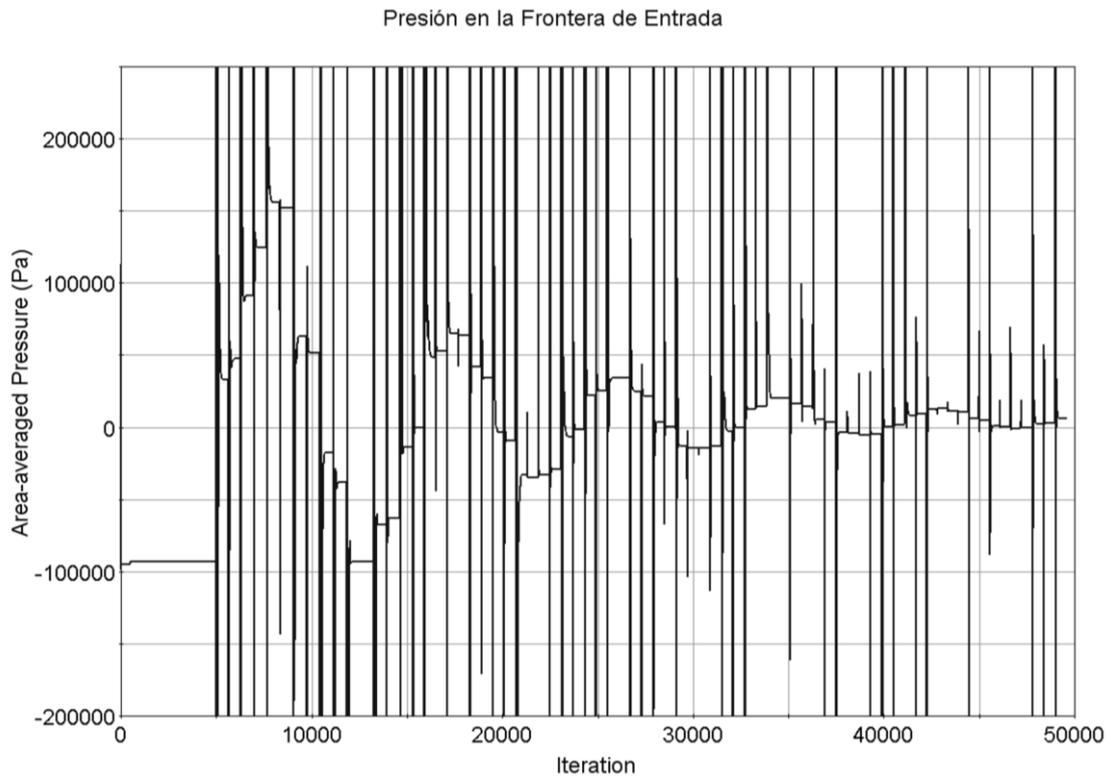


Figura 4.30 Verificación de la estabilidad de la presión durante la simulación

También se verifica la convergencia con el balance de masa (Figura 4.31).

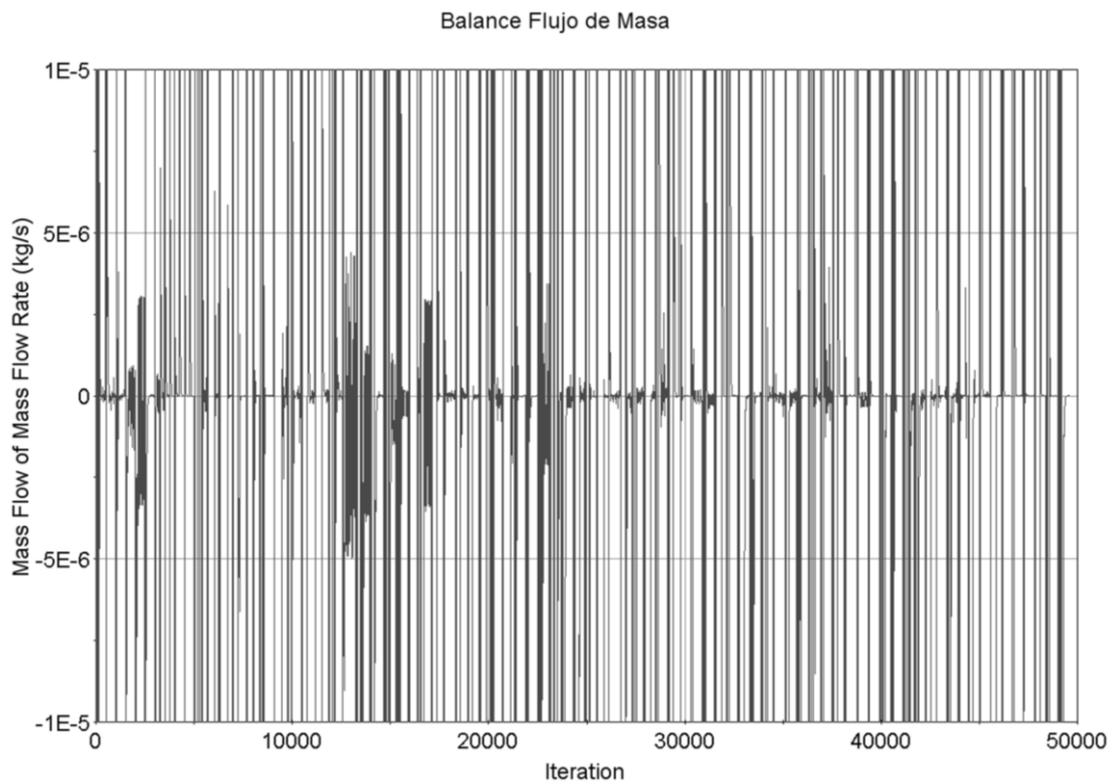


Figura 4.31 Verificación del balance de masa durante la simulación

El balance de masa es el principal indicador de la convergencia del modelo en cada paso de tiempo. Se realizan las iteraciones necesarias hasta alcanzar una estabilidad en el balance de flujo de masa para el volumen de control. Al terminar las simulaciones numéricas, se tienen los resultados de los modelos en los que se podrá hacer una evaluación de la interacción entre el medio exterior y el flujo de la conducción para evaluar el potencial de intrusión durante este tipo de eventos.

## **4.5 Resultados del Modelo de Intrusión en Transitorio**

El potencial de intrusión patógena en un evento transitorio puede ser cuantificado de forma numérica en base a la propuesta de modelación que se ha presentado. Los volúmenes de intrusión y de fuga que atraviesan el fallo, así como la dinámica del fluido exterior, se obtienen a partir del modelo CFD.

Los resultados se muestran a partir de las velocidades y los caudales a través del fallo, con estos parámetros se determinan los volúmenes de intrusión de fuga que ocurren durante el transitorio. Los volúmenes se pueden validar a partir de las imágenes captadas durante los ensayos.

### **4.5.1 Resultados CFD para el fallo de 2mm durante el transitorio**

En las siguientes Figuras se muestran los escenarios del flujo en el fallo de 2mm. En las Figuras se puede observar que la velocidad y el caudal de intrusión se presentan con valores negativos, mientras que para la fuga se presentan valores positivos.

Los valores puntuales del caudal experimental se calculan a partir de las imágenes obtenidas durante la simulación, se cuantifican las alturas mínimas y máximas en el tubo exterior que contiene al fluido de intrusión y a partir de la diferencia temporal de ambas alturas se obtiene el caudal. Los videos tienen una duración entre 12 y 15 segundos por lo que solamente se verifican los primeros picos de presión (Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34).

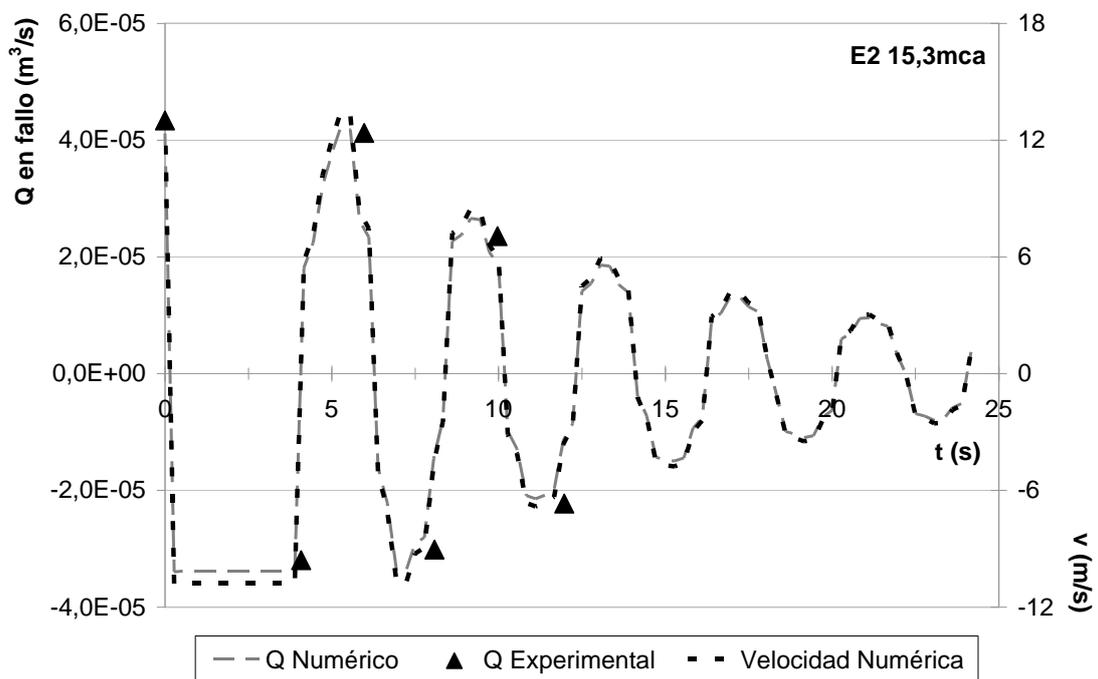


Figura 4.32 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 15,3mca

La respuesta de la velocidad y del caudal en el fallo de 2mm se presenta de forma similar en los tres escenarios. La diferencia entre los tres escenarios se observa principalmente en la duración de las oscilaciones del flujo. Para la menor carga (9,5mca) el caudal cambia de sentido más rápido que para las presiones iniciales mayores.

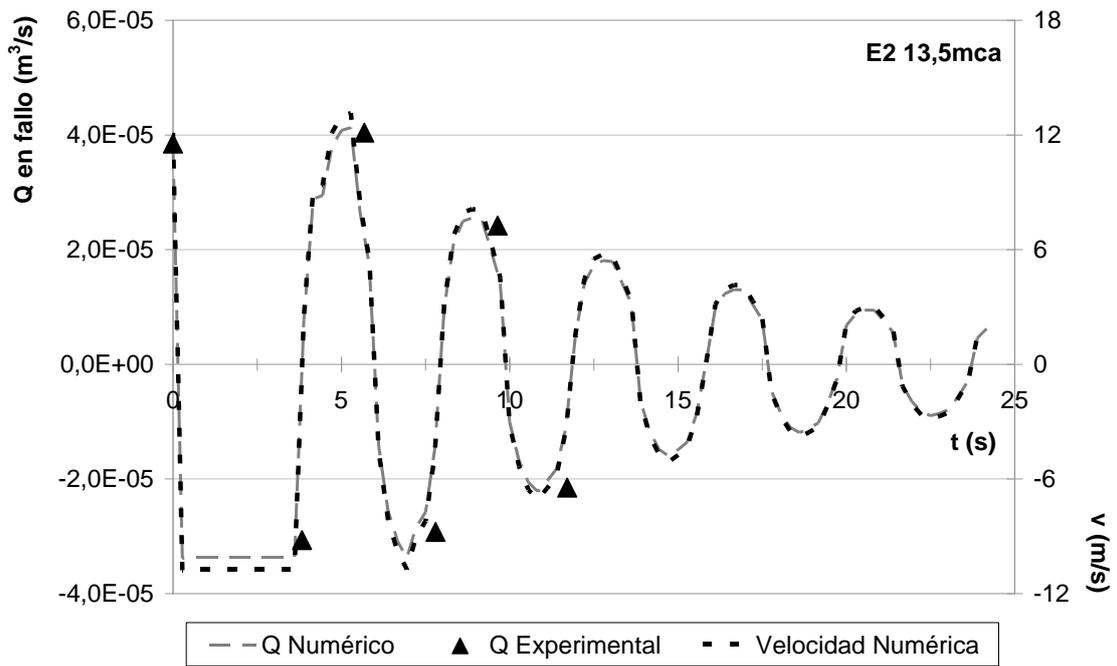


Figura 4.33 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 13,5mca

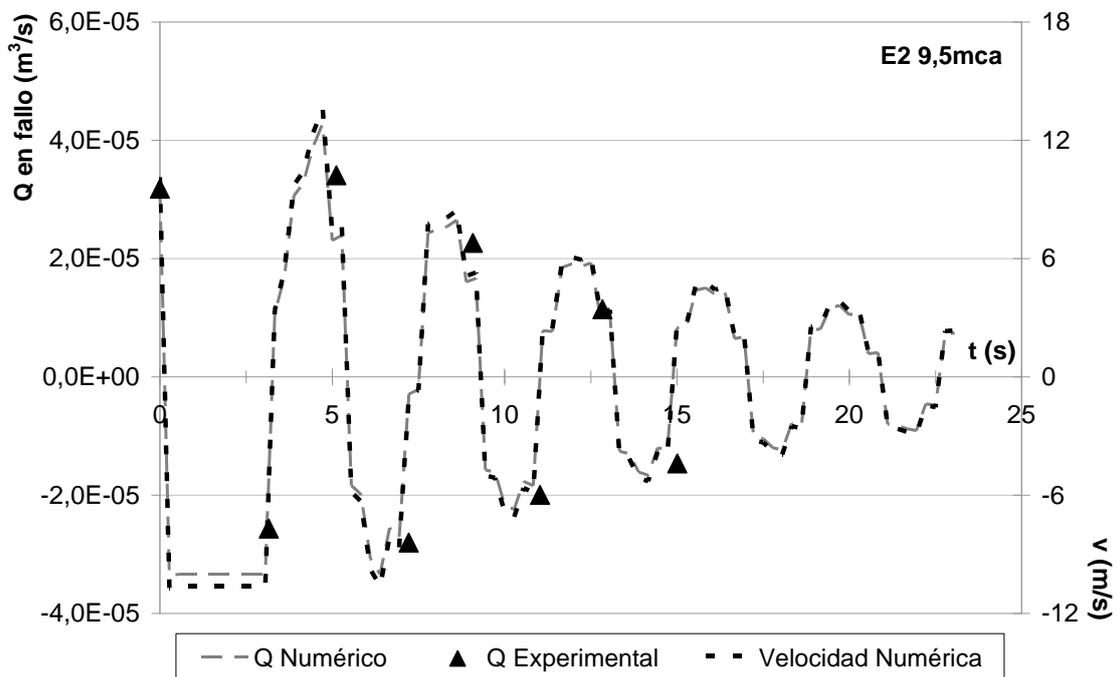


Figura 4.34 Resultados en el fallo de 2mm y carga de 9,5mca

Con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe se presenta la Tabla 4.7. La comparación se realiza para los picos de caudal entre los valores

experimentales y numéricos. Se obtienen los coeficientes de eficiencia para los caudales de fuga y de intrusión por separado y finalmente se realiza para todos los picos de caudal que atraviesan el fallo y que pueden ser comparados durante el evento transitorio.

Tabla 4.7 Resultados de Eficiencia N-S para el caudal en el fallo de 2mm

Ensayo	Q fuga	Q intrusión	Q transitorio*
E2 15,3	0,935	0,661	0,913
E2 13,5	0,983	0,378	0,884
E2 9,5	0,526	0,085	0,437

\*Es la suma en valor absoluto de los caudales de fuga más los caudales de intrusión.

Los primeros dos escenarios se representan de manera satisfactoria de acuerdo al modelo de eficiencia, mientras que el escenario de 9,5 la representación puede considerarse como suficiente ya que presenta valores positivos de los coeficientes, y solo el coeficiente de eficiencia para el caudal de fuga es mayor a 0,5. Por lo que se refiere a los caudales a través del fallo los modelos se ajustan de forma que los resultados pueden considerarse como satisfactorios.

Los volúmenes de intrusión y fuga del modelo numérico se comparan con respecto a los volúmenes experimentales captados durante los ensayos con los videos de alta definición.

El volumen numérico se obtiene a partir de los caudales que atraviesan el fallo durante la simulación en CFD y que se han observado en las Figuras anteriores (Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34).

El volumen experimental se calcula con la diferencia de la columna entre la altura máxima y la mínima en el tubo exterior del fluido de intrusión (Figura 4.35). Con el área de la sección del tubo y la diferencia de alturas se obtiene dicho volumen.

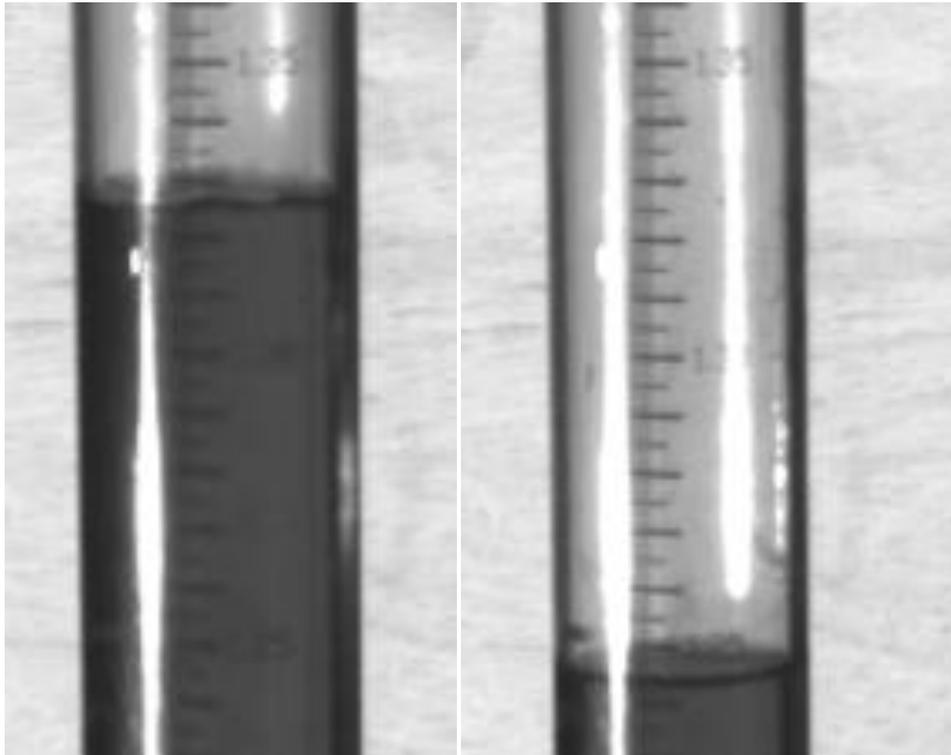


Figura 4.35 Diferencia de columnas en una oscilación de presión

Los volúmenes experimentales y numéricos se muestran en las Figuras siguientes (Figura 4.36, Figura 4.37, Figura 4.38).

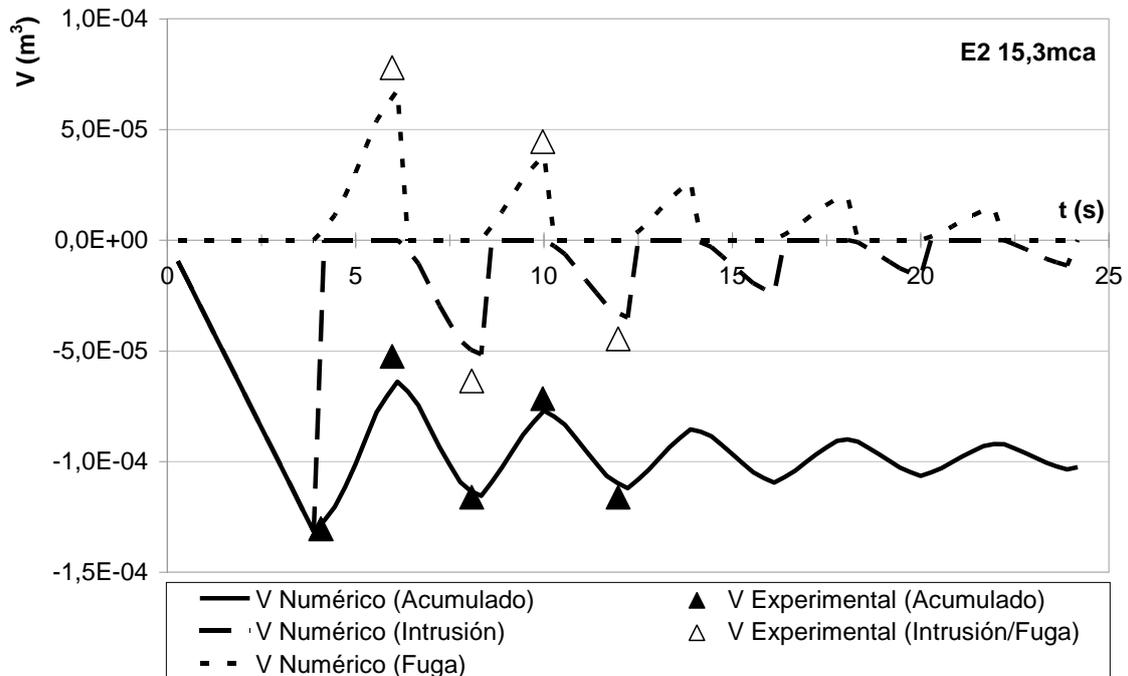


Figura 4.36 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 15,3mca

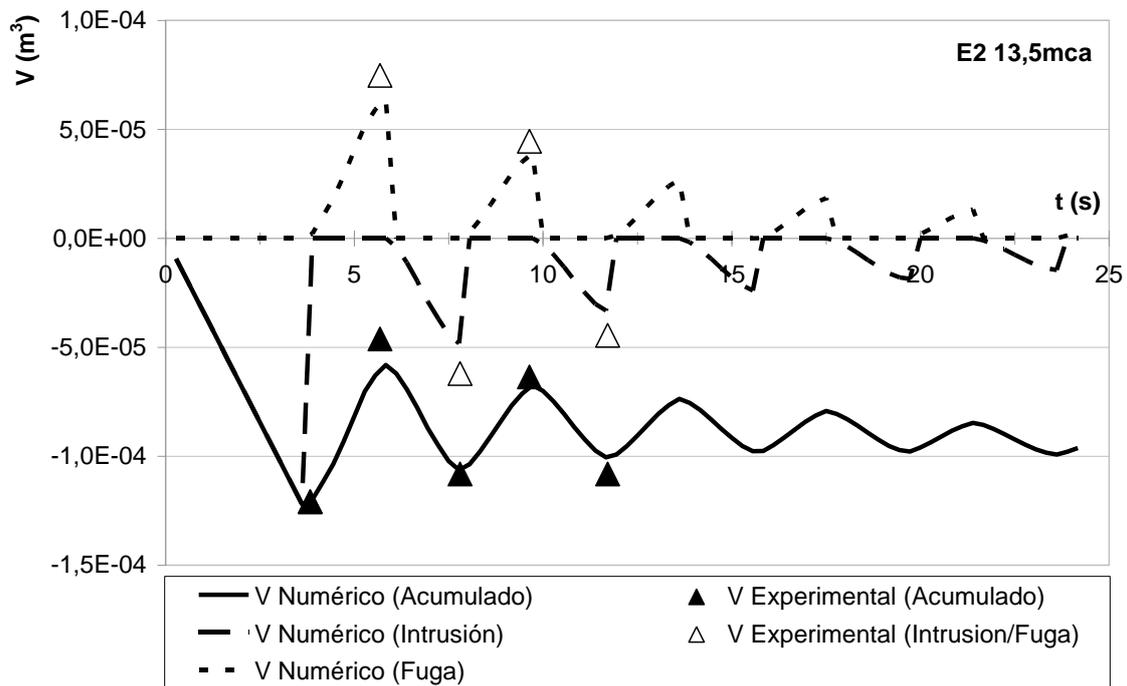


Figura 4.37 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 13,5mca

En las Figuras se incluyen los volúmenes por separado de intrusión, de fuga y el volumen acumulado. Los volúmenes acumulados de intrusión se obtienen durante los tiempos de simulación y descontando los volúmenes de fuga que se producen con oscilaciones de carga positivas.

Los tres escenarios tienen una duración efectiva entre 23 y 24 segundos, ya que es el tiempo en el cual se cuantifica prácticamente todo el volumen de intrusión. A partir de que se inicia el transitorio, el volumen acumulado se mantiene de intrusión a pesar de los volúmenes de fuga que se generan con las sobrepresiones.

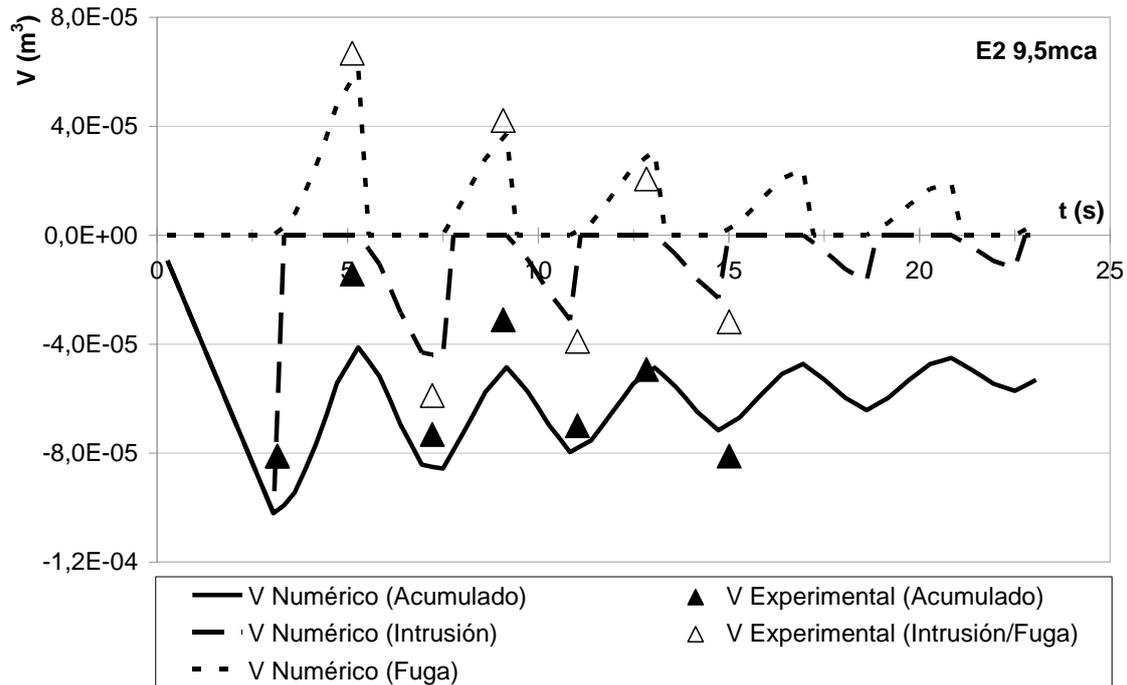


Figura 4.38 Volúmenes en el fallo de 2mm durante el escenario de 9,5mca

Con respecto a la eficiencia de Nash-Sutcliffe se realizó la evaluación para los valores máximos y mínimos de los volúmenes de fuga, intrusión y para el volumen acumulado. Los resultados se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Resultados de Eficiencia N-S para los volúmenes con el fallo de 2mm

Ensayo	V fuga	V intrusión	V acumulado
E2 15,3	0,748	0,942	0,960
E2 13,5	0,673	0,900	0,948
E2 9,5	0,806	0,466	0,564

Se obtiene una eficiencia satisfactoria para los escenarios de 15,3 y 13,5mca. En el modelo de 9,5mca los resultados se pueden considerar como suficientes para representar los valores experimentales en el modelo propuesto.

En este caso el volumen de intrusión al finalizar el transitorio se muestra en la Tabla 4.9. Se calcula el caudal que produciría ese volumen durante el tiempo del transitorio y se compara con el caudal de circulación de la tubería en régimen permanente para la carga de presión de cada escenario.

Tabla 4.9 Volúmenes de intrusión final en los escenarios de 2mm

Ensayo	Volumen de intrusión final (m <sup>3</sup> )	Q a partir de la intrusión final (m <sup>3</sup> /s)	Q respecto al de la conducción (%)
E2 15,3	1,0×10 <sup>-4</sup>	4,3×10 <sup>-6</sup>	0,17
E2 13,5	9,9×10 <sup>-5</sup>	4,2×10 <sup>-6</sup>	0,18
E2 9,5	5,7×10 <sup>-5</sup>	2,5×10 <sup>-6</sup>	0,13

Los resultados muestran que el caudal de intrusión durante el evento transitorio en cada escenario representa el 0,18 y 0,13%. Estos valores resultantes son debido a que las oscilaciones de intrusión y de fuga presentan volúmenes semejantes durante la amortiguación del transitorio.

Por lo que se generan intrusiones pequeñas respecto al caudal de la conducción pero en cuestiones de calidad de agua este porcentaje podría ser definitivo. Si se considerase que se tuviera presencia bacteriológica con las características de las muestras de agua de riego de 1,4×10<sup>5</sup>UFC/100ml de Salmonella; la cual se ha analizado del entorno urbano en el Capítulo 2, se tendría una presencia de patógenos dentro de la conducción debida al evento transitorio para el fallo de 2mm como se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Contaminación durante transitorios del fallo circular de 2mm

Ensayo	Volumen de intrusión (m <sup>3</sup> )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
E2 15,3	1,0×10 <sup>-4</sup>	1,5×10 <sup>5</sup>
E2 13,5	9,9×10 <sup>-5</sup>	1,4×10 <sup>5</sup>
E2 9,5	5,7×10 <sup>-5</sup>	8,0×10 <sup>5</sup>

En este sentido se puede valorar la contaminación que se presentaría al final del transitorio con un fallo circular de 2mm para las condiciones planteadas. En las siguientes Figuras se observa la intrusión durante el transitorio por medio del trazador (Figura 4.39, Figura 4.40 y Figura 4.41). Se puede observar cómo se desplaza el fluido exterior por la tubería durante el evento transitorio.

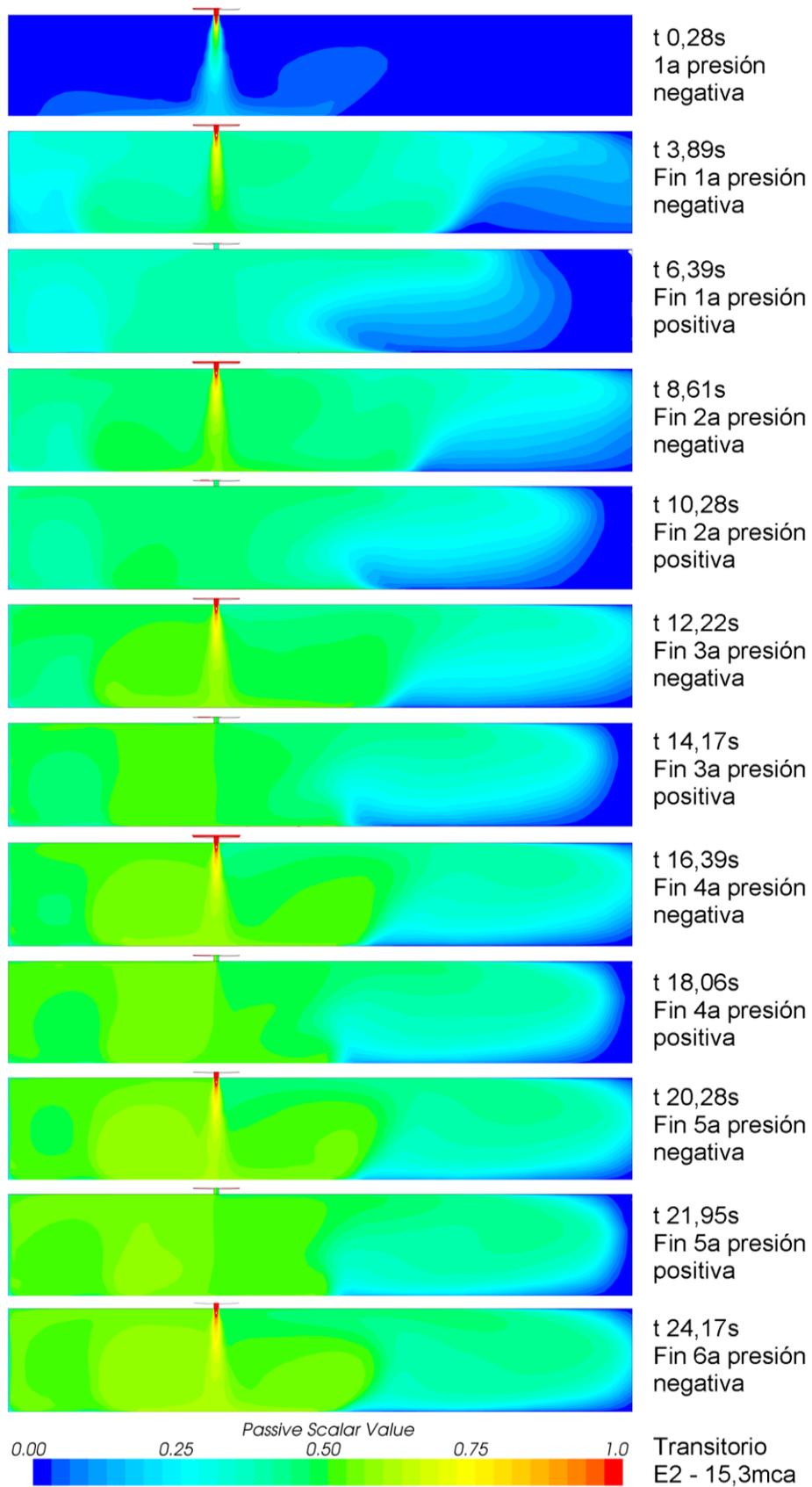


Figura 4.39 Trazador durante el transitorio de 15,3mca (2mm)

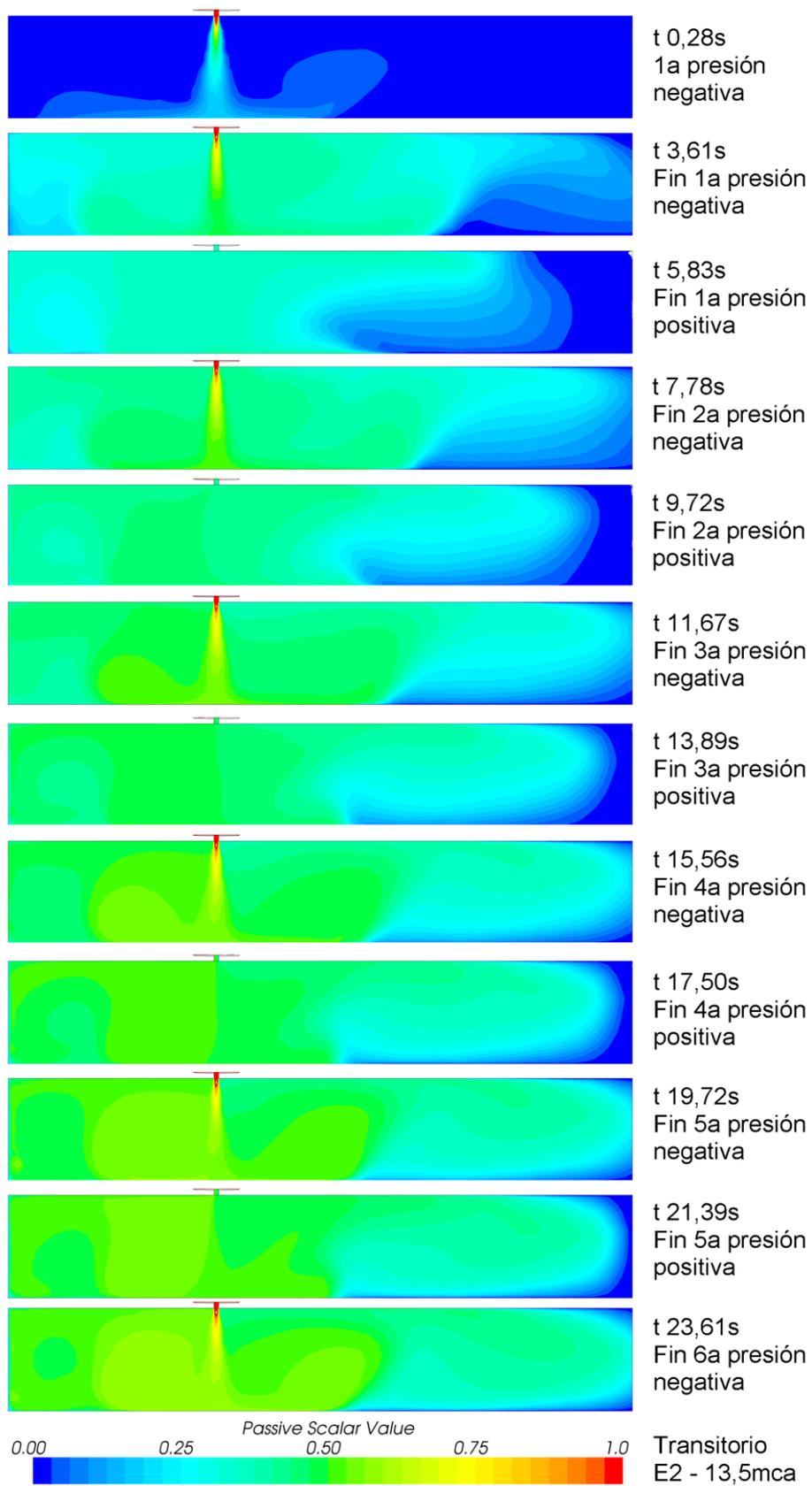


Figura 4.40 Trazador durante el transitorio de 13,5mca (2mm)

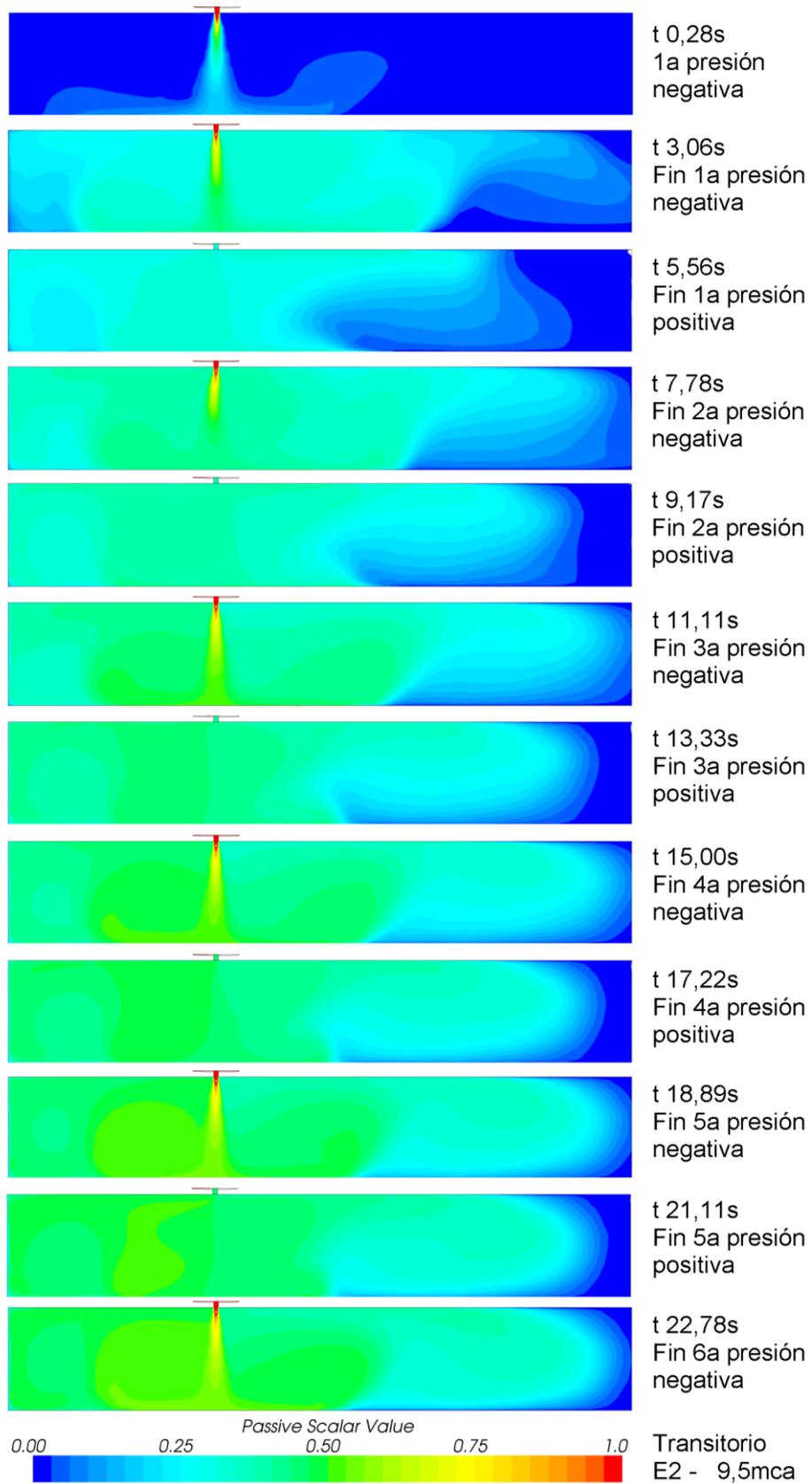


Figura 4.41 Trazador durante el transitorio de 9,5mca (2mm)

### 4.5.2 Resultados CFD para el fallo de 4mm durante el transitorio

De la misma forma que se han presentado los resultados con el fallo de 2mm, se presentan los resultados de los escenarios simulados con el fallo circular de 4mm. Se muestran los caudales a través del fallo durante los eventos transitorios de 15,0 (Figura 4.42); 13,1 (Figura 4.43) y 9,2mca (Figura 4.44). En las mismas figuras, del lado derecho de las gráficas se muestra la velocidad en la sección media del fallo. Los valores negativos, tanto de velocidad como de caudal representan el flujo de intrusión, mientras que los valores positivos son el flujo de fuga.

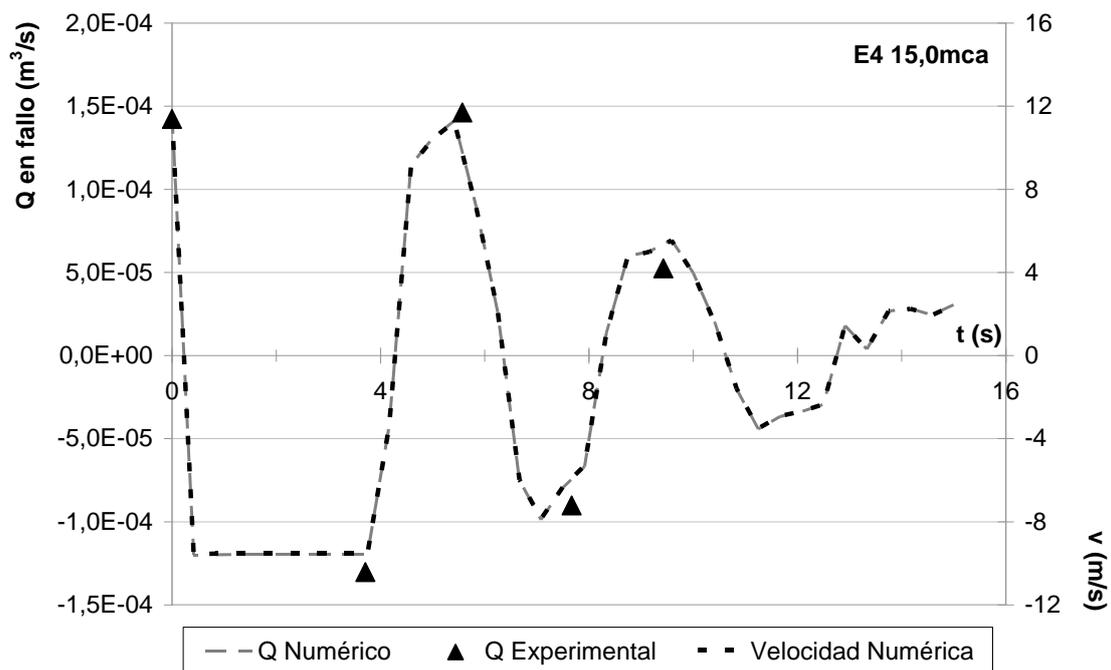


Figura 4.42 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 15,0mca

En los tres escenarios, la validación con las simulaciones experimentales se realiza con cuatro y cinco puntos, que son los que se han obtenido de los videos de alta definición.

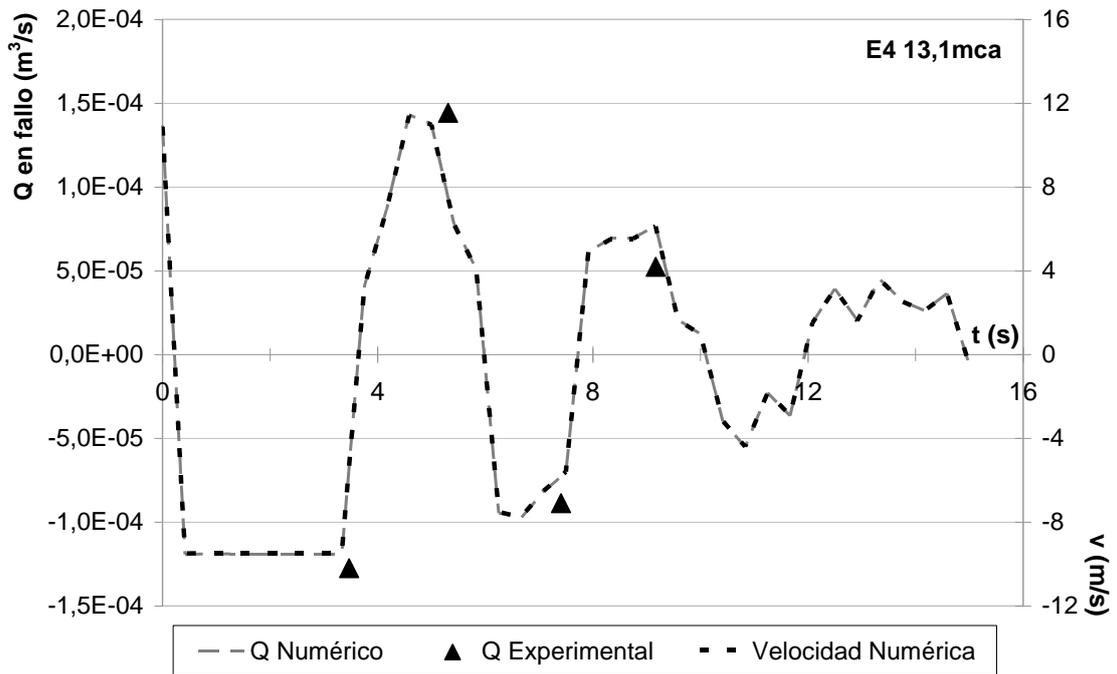


Figura 4.43 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 13,1mca

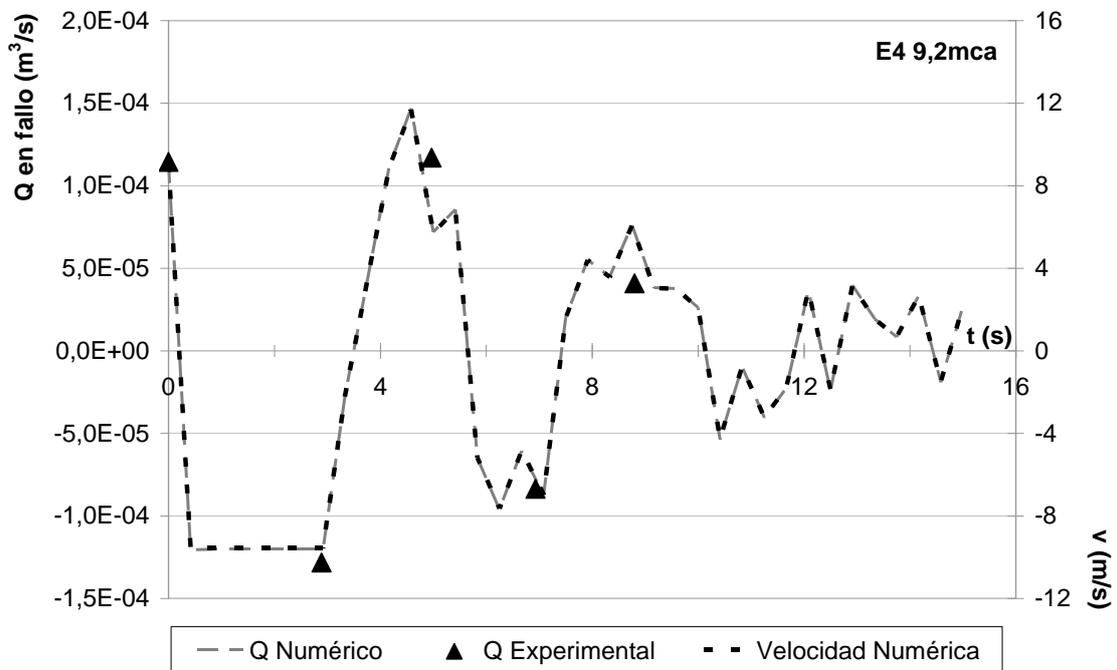


Figura 4.44 Resultados en el fallo de 4mm y carga de 9,2mca

El caudal de intrusión relacionado al fallo de 4mm de diámetro, se genera con un transitorio de presión de menor duración. En cambio, un evento transitorio con un fallo de 2mm puede generar intrusiones durante 23 segundos en condiciones de carga inicial semejantes.

Con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe para los modelos del fallo de 4mm de diámetro se obtienen los siguientes valores (Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Resultados de Eficiencia N-S para el caudal en el fallo de 4mm

<b>Ensayo</b>	<b>Q fuga</b>	<b>Q intrusión</b>	<b>Q transitorio*</b>
E4 15,0	0,941	0,769	0,920
E4 13,1	0,857	0,801	0,851
E4 9,2	0,262	0,777	0,490

\*Suma en valores absolutos del caudal de fuga y de intrusión.

Los tres escenarios se pueden considerar como satisfactorios en cuanto a los picos del caudal a través del fallo durante el transitorio de presión.

Además de los caudales a través del fallo se comparan los volúmenes de intrusión y de fuga durante el transitorio de presión. Por un lado los volúmenes experimentales que se captan mediante los videos durante las simulaciones y por otro lado, los que se obtienen a través del modelo CFD a partir de los caudales a través del fallo durante la simulación; los resultados se muestran en las siguientes Figuras (Figura 4.45; Figura 4.46 y Figura 4.47).

De igual forma que en el fallo de 2mm, los volúmenes experimentales se obtienen de los niveles máximos y mínimos que se captan durante las oscilaciones de presión; se calculan los valores de intrusión y de fuga, y a partir de éstos se obtiene el volumen acumulado de intrusión.

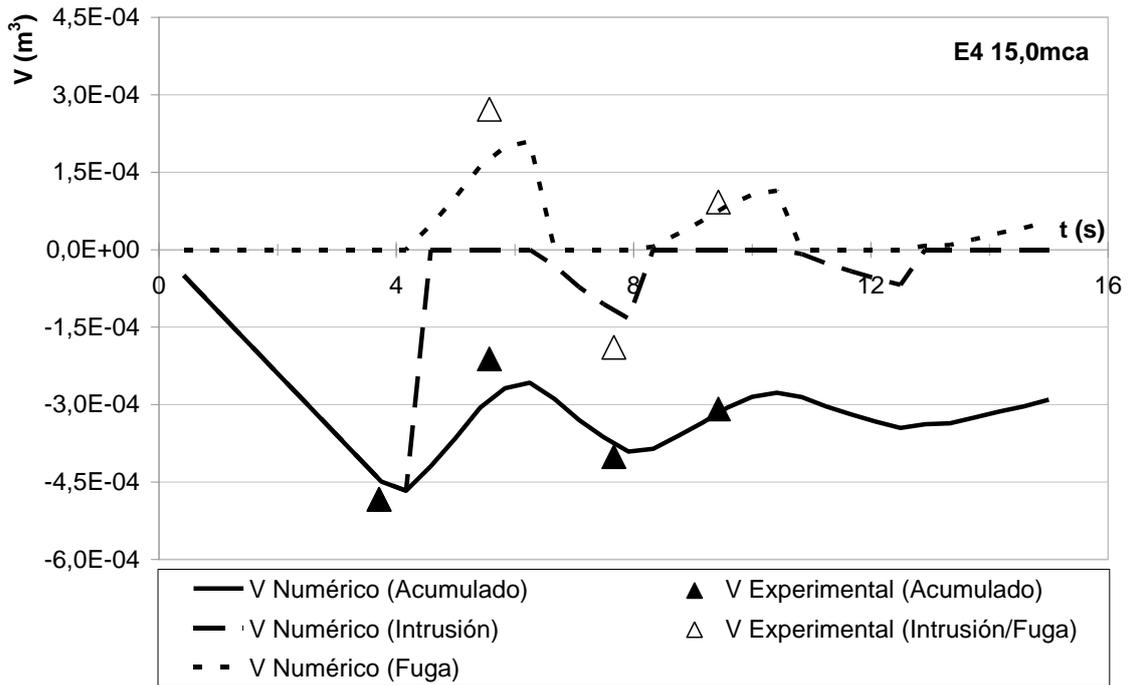


Figura 4.45 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 15,0mca

Con respecto a los volúmenes numéricos se muestran los de intrusión, fuga y acumulado. Los volúmenes de la intrusión con el fallo de 4mm se presentan en un tiempo entre 12 y 13 segundos.

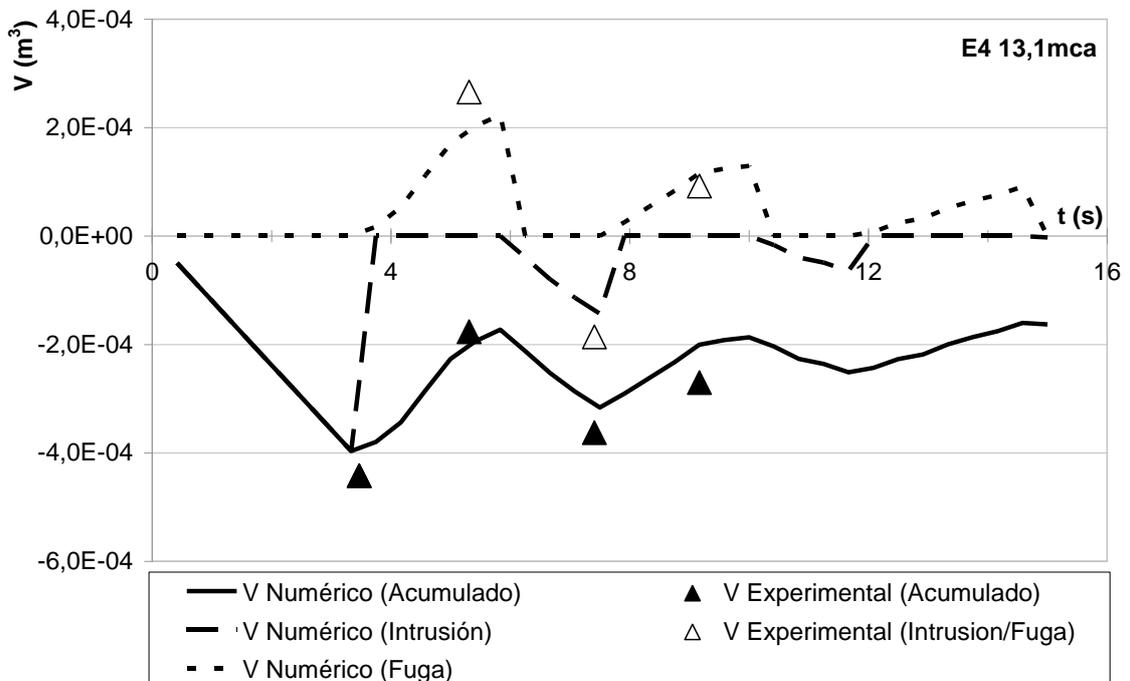


Figura 4.46 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 13,1mca

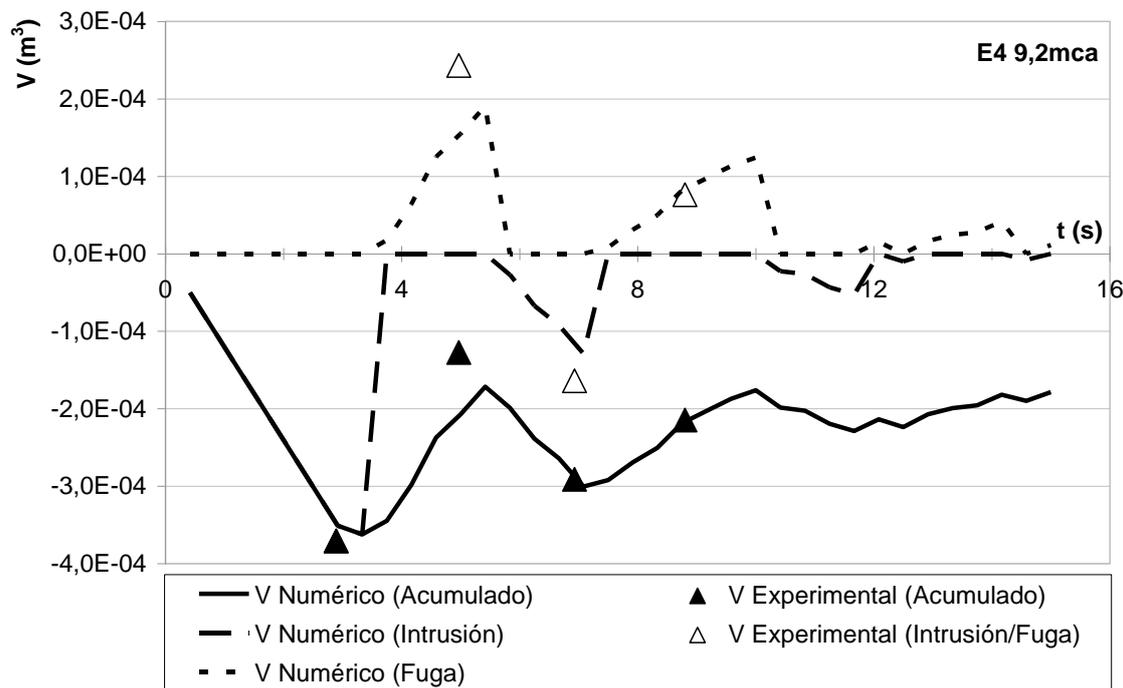


Figura 4.47 Volúmenes en el fallo de 4mm durante el escenario de 9,2mca

Con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe se realizó la evaluación para los valores máximos y mínimos de los volúmenes de fuga, de intrusión y del acumulado. Los resultados se presentan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Resultados de Eficiencia N-S para los volúmenes con el fallo de 4mm

Ensayo	V fuga	V intrusión	V acumulado
E2 15,3	0,726	0,922	0,920
E2 13,5	0,792	0,881	0,716
E2 9,5	0,637	0,940	0,889

Se obtiene una eficiencia satisfactoria en los tres escenarios para la representación numérica de los valores experimentales en el modelo propuesto.

Se presenta el volumen de intrusión al final del evento transitorio, de la misma forma se compara con el caudal de circulación de la tubería. Para realizar la comparación se calcula el caudal de intrusión con el volumen de intrusión final y el tiempo del transitorio. Los resultados se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Volúmenes acumulados en los escenarios de 4mm

Ensayo	Volumen de intrusión final (m <sup>3</sup> )	Q durante el transitorio (m <sup>3</sup> /s)	Q respecto al de conducción (%)
E4 15,0	3,5×10 <sup>-4</sup>	2,8×10 <sup>-5</sup>	1,09
E4 13,1	2,5×10 <sup>-4</sup>	2,2×10 <sup>-5</sup>	0,95
E4 9,2	2,2×10 <sup>-4</sup>	1,8×10 <sup>-5</sup>	0,91

Los valores de intrusión para el fallo circular de 4mm representan cerca del 1% del caudal de circulación de la tubería de cada escenario en particular.

Estos volúmenes de intrusión podrían ser representativos dependiendo de la carga contaminante del fluido exterior. En este sentido se realizará la misma consideración de la presencia del fluido exterior contaminado con la presencia bacteriológica de 1,4×10<sup>5</sup>UFC/100ml de Salmonella. La presencia de patógenos provocado por la intrusión durante los transitorios con un fallo circular de 4mm sería la que se presenta en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Contaminación durante transitorios del fallo circular de 4mm

Ensayo	Volumen de intrusión (m <sup>3</sup> )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
E4 15,0	3,5×10 <sup>-4</sup>	4,8×10 <sup>5</sup>
E4 13,1	2,5×10 <sup>-4</sup>	3,5×10 <sup>5</sup>
E4 9,2	2,2×10 <sup>-4</sup>	3,1×10 <sup>5</sup>

Con estos resultados se puede observar de una manera más efectiva la afectación real de cada uno de eventos de intrusión durante los transitorios de presión para los fallos simulados. Con el fallo de 4mm la afectación por organismos patógenos prácticamente se triplica con respecto a la intrusión con un fallo de 2mm. De esta forma se puede relacionar el rendimiento de la red con la calidad del agua, considerando que fallos de dimensiones que provocan fugas de fácil detección pueden producir contaminación en la red hasta tres

veces mayor comparado con fugas de difícil detección, bajo las condiciones planteadas en estos modelos.

En las siguientes Figuras (Figura 4.48, Figura 4.49 y Figura 4.50) se muestran las configuraciones del trazador durante el transitorio.

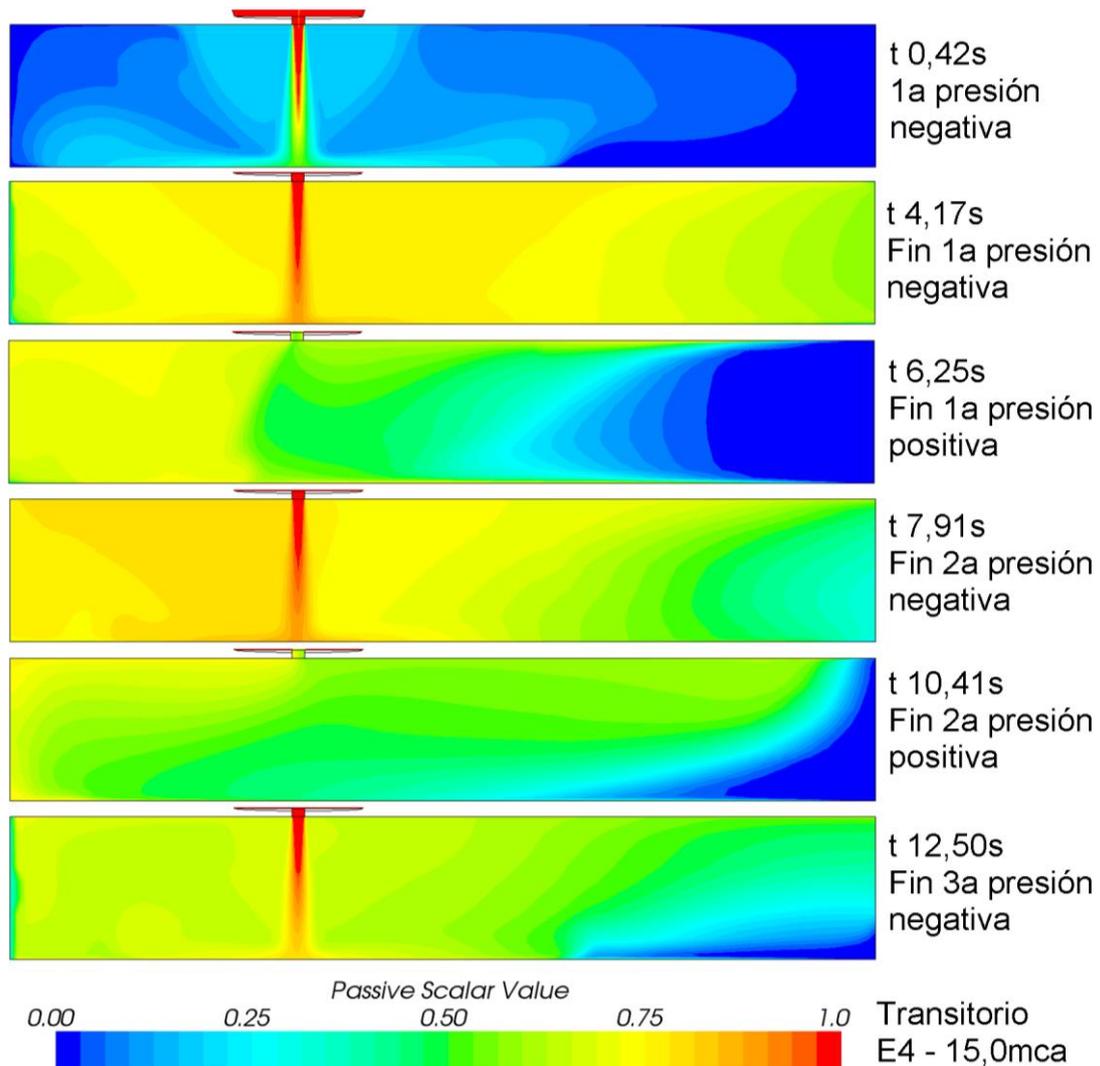


Figura 4.48 Trazador durante el transitorio de 15,0 (4mm)

Estos volúmenes de intrusión comparados con los que se presentan en el transitorio con el fallo de 2mm equivalen a más de cinco veces la intrusión con respecto al caudal de circulación en la tubería, por lo que además de presentar mayor afectación por intrusión de patógenos, su caudal es más agresivo dentro

de la conducción. Con esto se tienen una relación cuantitativa de la afectación de la intrusión y que además ha sido validada de forma experimental para dos tipos de fallos. En este sentido se observa la proporción de afectación que se produce dependiendo de las dimensiones del fallo en la conducción. De esta manera se puede analizar la vulnerabilidad de la calidad del agua en la red mediante de una forma cuantitativa.

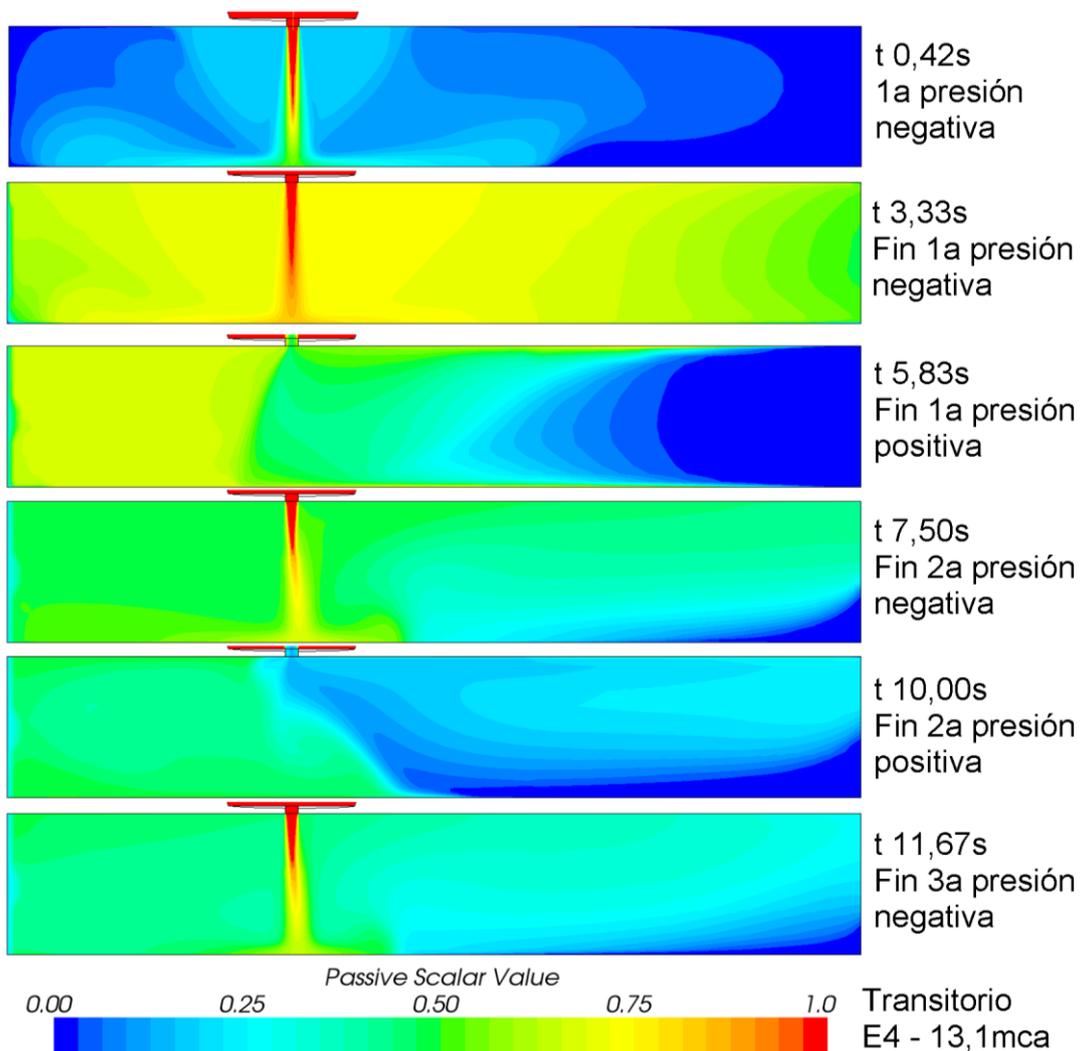


Figura 4.49 Trazador durante el transitorio de 13,1 (4mm)

En la modelación estos resultados han sido cuantificados y validados para casos donde se ha favorecido la intrusión en todo momento. En campo, en las redes de abastecimiento estos porcentajes pueden representar una fuente

importante de contaminación dependiendo de las condiciones existentes en las mismas.

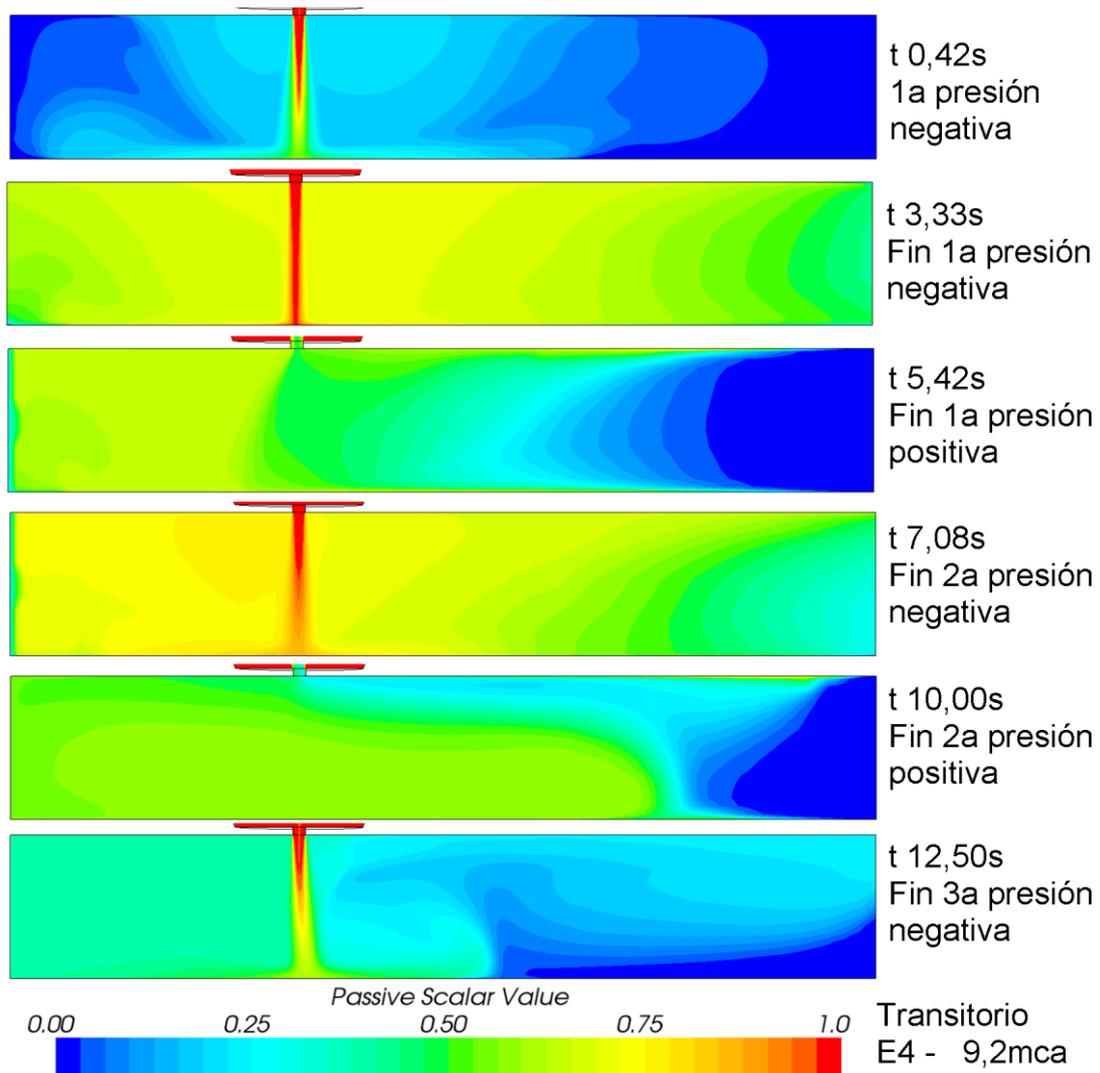


Figura 4.50 Trazador durante el transitorio de 9,2 (4mm)

En este capítulo se ha desarrollado una serie de técnicas en las cuales se ha mostrado la intrusión en los casos más adversos en una conducción de agua. Los escenarios físicos se han reproducido de forma numérica, los modelos se han diseñado y validado, pudiéndose emplear en la construcción de escenarios donde la vulnerabilidad de la calidad del agua este en riesgo en zonas del abastecimiento de agua.

En este sentido se puede generar una representación de los eventos de intrusión asociados a los transitorios de presión de forma numérica. Se puede analizar de forma hidrodinámica la posibilidad de intrusión que genera esta combinación de factores aunados al rendimiento hidráulico de una red, considerando los fallos en la misma.

En el capítulo cinco se describen los elementos que se deben considerar en base a la modelación realizada a lo largo de este trabajo y se muestra como podría ser empleada esta metodología. Se realizan simulaciones numéricas en donde se evalúa la capacidad de intrusión para diversos escenarios.



# **CAPÍTULO 5**



## 5 LA INTRUSIÓN PATÓGENA EN LA DISTRIBUCIÓN

Además de considerar los aspectos hidrodinámicos, que de manera particular se pueden asociar a la intrusión patógena en conducciones a través de fallos. Se ha hecho hincapié en la asociación que existe con el rendimiento hidráulico de la propia red. En este sentido la situación en campo es diversa para tener una relación directa entre el evento de intrusión patógena y las condiciones de operación de los sistemas de abastecimiento. En el siguiente capítulo se generan escenarios hipotéticos basados en los prototipos empleados en los capítulos anteriores y con ello representar condiciones en las redes de abastecimiento. Se analiza el comportamiento de la red en campo, las condiciones físicas en las que se presenta la conducción en su zanja, para finalmente tener una cuantificación y valoración de los riegos que se presentan en base a las condiciones de los fallos en las tuberías de la red de distribución de agua.



## 5.1 Las Zonas de Vulnerabilidad

Las prácticas de gestión de la red y el conocimiento de las condiciones físicas son determinantes para identificar la vulnerabilidad del sistema y con ello la valoración de técnicas empleadas para la protección de la misma.

Es importante determinar en qué zonas de la red se presenta mayor vulnerabilidad de intrusión. Considerando que la vía de entrada en este caso en específico nos referimos a los fallos en las conducciones asociada a bajadas de presión. En ese sentido, se han realizado estudios, análisis y en algunos casos experimentación para obtener esta respuesta de este aspecto.

En base a un análisis detallado de diversos sistemas de distribución de agua, Fleming (2007) describe factores de la red de distribución y que son condicionantes para que se puedan generar eventos de presiones negativas.

El primer factor a tener en cuenta es el tamaño de la propia red. En instalaciones pequeñas se muestra un incremento en la presencia de bajas presiones, por lo que hace que sean más susceptibles a eventos de intrusión. Esta afirmación se realiza en base a un análisis que se realiza en redes de distribución con caudales de entrega menores a  $0,45\text{m}^3/\text{s}$ . Cinco de seis redes de distribución con estas características, mostraron presiones negativas en más del 35% del sistema con una parada total del equipo de bombeo (Fleming, 2007).

Un segundo factor a tener en cuenta es la fuente de abastecimiento. Dependiendo si la fuente es superficial o subterránea se pueden tener diferen-

tes grados de vulnerabilidad. Los sistemas con captación subterránea son más susceptibles a presentar bajas presiones en eventos transitorios.

Como tercer factor, la configuración de la red de abastecimiento afecta a las condiciones de presión, en la que se pueden mencionar tres características. La primera es la topografía, una red de distribución con depresiones topográficas es más susceptible cuando la diferencia de elevación es mayor (en el caso de las redes monitoreadas hasta 45m de diferencia topográfica presentaba mayor susceptibilidad a presentar bajas presiones). La segunda característica es la cantidad y distribución de los tanques de almacenamiento; los sistemas pueden ser menos susceptibles a presiones negativas cuando presentan mayor cantidad de tanques elevados. Y finalmente, el tercer factor es la localización en la propia red, ya que las zonas al final de las redes son más susceptibles a presiones negativas.

Por lo que teniendo en cuenta estos factores se pueden realizar planteamientos para la determinación de escenarios probables de tener una afectación por intrusión patógena.

## **5.2 Aspectos a Considerar en base al Modelo Resuelto**

En capítulos anteriores se han obtenido los resultados relacionados a los exponentes utilizados para la teoría de fugas y por consiguiente de intrusión. Con los resultados obtenidos en el modelo de intrusión se han correlacionado los datos para hacer un ajuste con respecto a la teoría FAVAD.

La relación potencial que afecta a la bajada de presión en los modelos tradicionales propuestos para fugas, se señala que el valor del exponente depende de la naturaleza de la fuga, variando desde 0,50 hasta 2,50 para

diversos ensayos realizados sobre fugas reales en diferentes condiciones (Walski *et al.*, 2006). En este caso, los resultados que presentaron los modelos tanto físico como numérico, la relación potencial presentó valores en entorno a 0,50.

En los ensayos en estado permanente se presentaron aspectos relacionados con la presión de intrusión. Por un lado los fallos rígidos, de pequeñas dimensiones y cuando son circulares. Por otro lado los fallos de mayores dimensiones; diferenciando entre los longitudinales y transversales. Se observó durante la modelación que las fuerzas de presión de intrusión hacen variar las áreas de los fallos. En el caso del fallo transversal se muestra un aumento en el caudal en relación con sus dimensiones. Para el fallo longitudinal se presenta una disminución del caudal de intrusión, corroborando la disminución del área durante la simulación. De esta manera, la intrusión puede ser representada con la curva de ajuste de la relación bajada de presión y el caudal de entrada en los alrededores del fallo. En estudios citados previamente (Walski *et al.*, 2004) se indica que el exponente se aproximará más a 0,50 cuando se consideren regímenes de velocidad mayores y se tenga en cuenta otros aspectos del medio circundante, como porosidad principalmente y que en este aspecto también se ha trabajado para obtener la influencia de este factor.

El análisis del caudal de entrada en las tuberías en condiciones de baja presión es poco conocido y este aspecto está ligado en sistemas de distribución de agua en donde se presentan abastecimiento intermitente, en donde las fuerzas que generen la intrusión estén gobernadas no por la presión negativa dentro de la tubería, si no por el nivel de saturación que se encuentre en el entorno del fallo de la misma conducción. En este sentido se debe considerar la intrusión en los sistemas de distribución que están influenciados por este tipo de condiciones como el vaciado de la tubería.

En este campo, es una experiencia en donde se debe valorar la importancia del tratamiento de agua para su consumo en relación con las condiciones reales de operación y que como se ha indicado, la experimentación en estos eventos es poca y referida a análisis volumétricos en redes mayores.

### **5.3 La Intrusión en el Abastecimiento**

Existen dos aspectos a tomar en cuenta en el potencial de la intrusión que se produce a través de los fallos en la red de distribución. En base a los modelos presentados se hace un planteamiento para relacionar la operación en la distribución del agua con este evento de contaminación.

Por un lado, en los sistemas donde la entrega se considera permanente en el tiempo, el abastecimiento es más eficiente, presenta menos porcentajes de pérdidas, por lo cual menos posibilidad de entrada de contaminantes. Por lo que el potencial de que se produzca intrusión se basa principalmente en eventos transitorios. En este aspecto, la intrusión a través de fallos durante transitorios de presión se ha contabilizado en este trabajo. Se ha modelado de forma experimental y numérica, considerando escenarios favorables para la intrusión, en los cuales se presentaría mayor contaminación. Así se ha buscado el límite donde se podrían producir escenarios de mayor contaminación de agua y que pudieran ser representativos en la operación de este tipo de redes de distribución.

Por otro lado, se encuentran los sistemas donde la distribución de agua es intermitente. Se presentan abastecimientos donde hay mayor ineficiencia en la red, en los cuales la pérdida de caudal representa hasta el 50% del entregado. En estas redes de distribución se generan mayores posibilidades para la entrada

de contaminantes. Sin adecuadas condiciones para la operación y mayor desgaste para las instalaciones, se produce el vaciado de la red debido al servicio intermitente. De esta manera se genera la entrada de fluido exterior durante el tiempo que dura la red sin abastecer. Sin requerir de una presión negativa importante, ni un transitorio de presión, se provoca la entrada de contaminantes por largos periodos de tiempo. Así pues, se ha valorado hacer modelos donde la intrusión se realizara de forma permanente en el tiempo y que esta pudiera obtenerse a diversos rangos de presión negativa, para con ello cuantificar y considerar la afectación de intrusión que se presenta en estas condiciones.

Otro aspecto a considerar es el conocimiento de las condiciones de la propia red. Si bien se realizan trabajos de detección de fugas y la reparación de las más perjudiciales, se ha mostrado que muchas de las fugas que son clasificadas como de difícil detección producen caudales de intrusión que pueden significar un problema en la calidad del agua, por lo que la cuantificación de estos factores de pequeñas dimensiones son significativos a la hora de aplicar metodologías o planteamientos para la toma de decisiones del sistema de abastecimiento, especialmente si los entornos en los que se encuentran se hallan potencialmente contaminados.

La modelación que se ha realizado se muestra como una herramienta para identificar la capacidad de contaminación en la red y el rango de intrusión de manera cuantitativa. Aplicarlo a casos particulares donde se tengan las características de los parámetros en campo ha sido el objetivo de capítulos anteriores. Teniendo controlado el régimen de presiones en la instalación, además del rendimiento hidráulico del sistema asociado a los tipos de fugas, se pueden analizar diversos escenarios en donde se tengan los mayores rangos de

fugas de difícil detección y con ello tener en cuenta esta consideración para el análisis de vulnerabilidad de la propia red. En este trabajo se han validado las herramientas que se pueden utilizar asociadas a la modelación de los eventos de intrusión, y que se han reproducido en modelos físicos y ensayos experimentales.

El material de las conducciones es un elemento importante que se debe considerar para valorar la intrusión. Las tuberías metálicas y plásticas responden de manera diferente a los eventos hidráulicos, así como el tipo de fallo que se puede generar en la misma. De igual manera que se ha puesto atención en el aspecto del área del fallo relacionado al régimen de presiones en el que se produce la intrusión, otros tipo de fallos que también son considerables son los que se presentan en las juntas y accesorios; los cuales siendo escenarios complejos físicamente, pueden ser representados de forma numérica en CFD y de esta manera tener de conocimiento de la posible afectación que se pudiera presentar en eventos puntuales de intrusión.

El aspecto del medio exterior poroso, es fundamental para determinar los rangos de intrusión que se presentan en un determinado momento. El suelo por sus características retiene al fluido y genera una pérdida de energía que dependiendo de las fuerzas de presión en el interior de la tubería, éstas pueden ser representativas. En las simulaciones realizadas se ha observado la disminución de la intrusión al considerar este factor.

En base a las consideraciones citadas y aplicando la metodología propuesta se crean varios escenarios de intrusión, basado en los modelos que se han obtenido anteriormente. Primero se muestran escenarios para dos fallos circulares diferentes con dos tipos de suelo exterior. En segundo lugar se muestran dos escenarios transitorios con los modelos que se han obtenido,

incluyendo medio poroso exterior del fallo. Finalmente se crean varios escenarios con las características obtenidas para el caso de una bifurcación en estado permanente en la conducción, mientras que en el exterior se presentará un medio poroso con cargas de presión pequeñas.

## 5.4 Intrusión en Estado Permanente con Medio Poroso

En este caso se presentan cuatro escenarios, en donde se toman de base los escenarios de los fallos circulares de 1 y 4mm. A cada uno de los dos fallos se les asociará dos tipos de medio poroso diferentes. Las características hidrodinámicas de las conducciones se toman en base al modelo en estado permanente para cinco escenarios de presión en cada caso.

El material poroso presenta las características que se describen en la Tabla 5.1. El primer suelo presenta las características similares a la arena con la que se realizó el ensayo experimental; los datos que se muestran de esta arena son los que mejor se ajustaron a los resultados experimentales, en este sentido, se tendrá un punto de referencia físico que ha sido simulado experimentalmente. Las características de la porosidad muestran un material suelto en el primero de los dos casos. En el segundo de los casos se presentan las características de un material medio que sirve de relleno en zanjas de conducciones de agua tomadas a partir de muestras de campo en el entorno urbano de Valencia, el valor de porosidad se toma en base a la compactación de la muestra (ver granulometría en Anexo 6-b).

Tabla 5.1 Características del medio poroso

<b>Tipo de suelo</b>	<b>D<sub>eq</sub> medio (mm)</b>	<b>Porosidad</b>
Arena	2,00	0,40
Zahorra Artificial	0,42	0,25

Las características del modelo numérico son las que se han establecido para la representación en CFD de las simulaciones experimentales. Por lo que los escenarios que se presentan en este aspecto son los que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Escenario de transitorios con medio poroso exterior

Modelo	Escenarios de presión	$D_{eq}$ medio (mm)	Porosidad
1mm con arena	5	2,00	0,40
1mm con zahorra	5	0,42	0,25
4mm con arena	5	2,00	0,40
4mm con zahorra	5	0,42	0,25

Los escenarios con un fallo circular de 1mm se presenta la Figura 5.1; en la cual se muestra la reducción del caudal en caso de tener un medio exterior poroso con las características descritas previamente.

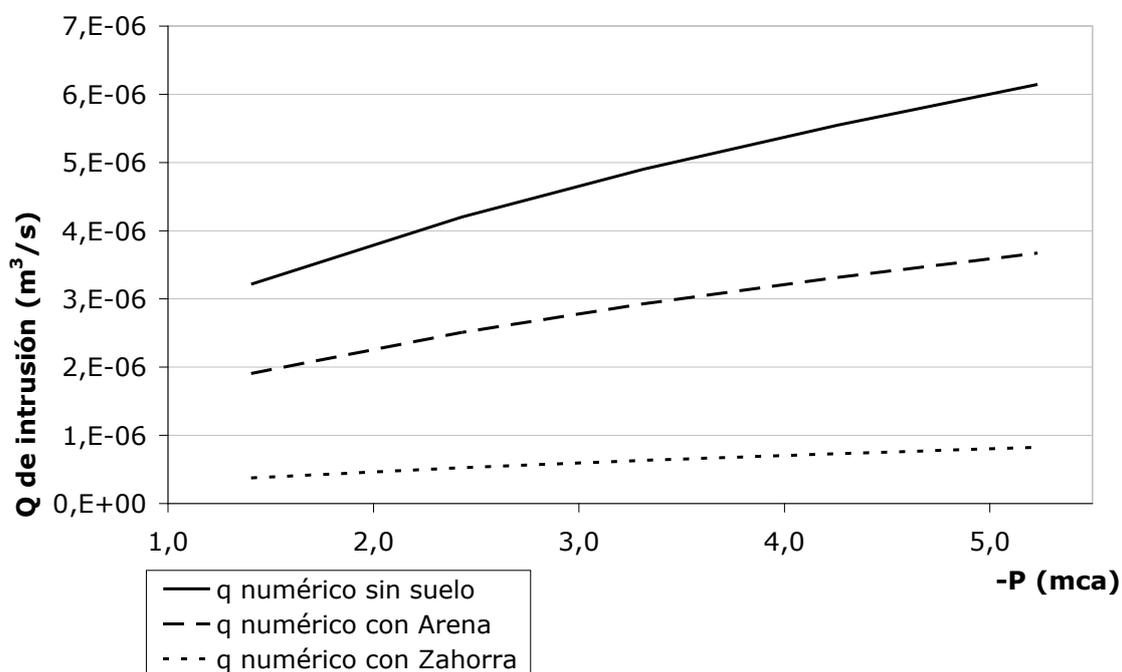


Figura 5.1 Caudal de intrusión para un fallo circular de 1mm con material poroso

El porcentaje del caudal de intrusión con respecto al caudal de circulación se ve disminuido hasta en 10 veces cuando se presentan suelos más finos y con menor porosidad (Figura 5.2). La presión que se muestra en la Figura es la que se mide en la tubería.

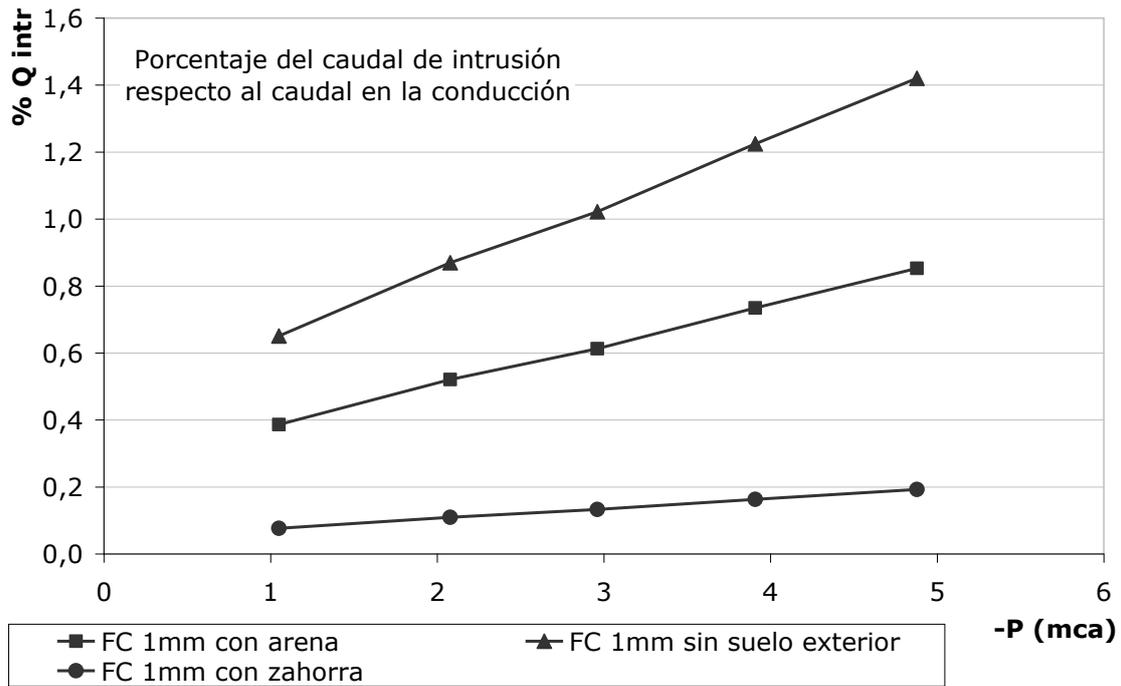


Figura 5.2 Caudal de intrusión para un fallo circular de 1mm con material poroso

En la Figura 5.3 se muestra la configuración del trazador del fluido exterior. El valor del trazador se presenta en un rango de 0,01 a 1. En la Figura se puede observar cómo se presenta la afectación en el chorro de intrusión para una misma presión en la conducción, en este caso con una diferencia de presión en el fallo de -1,4mca. Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el medio poroso exterior en la zona del fallo la respuesta en la intrusión será también diferente.

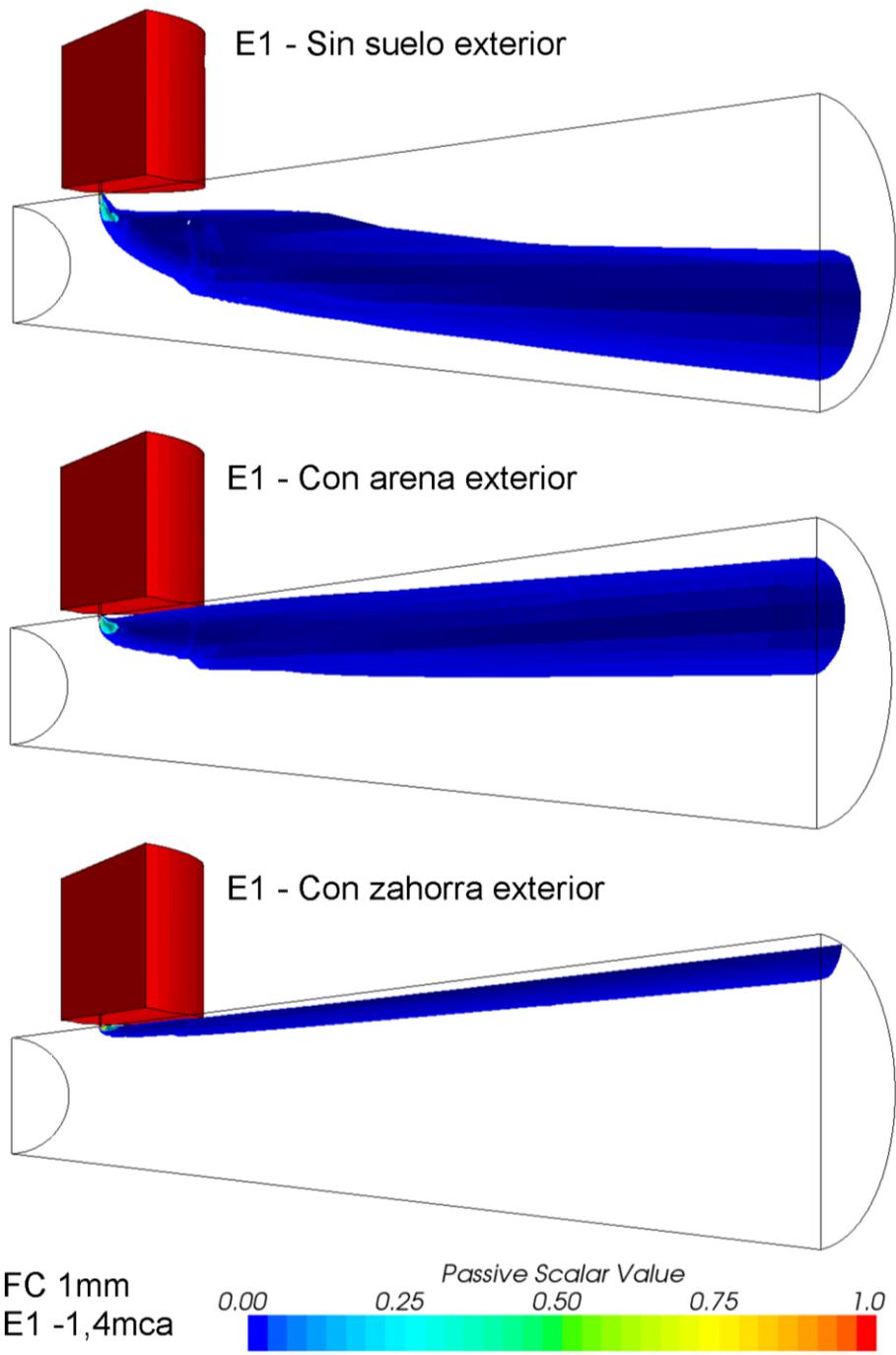


Figura 5.3 Trazador en el fallo de 1mm con el exterior con y sin suelo

Considerando que se tuviera un abastecimiento intermitente y planteando en un caso hipotético que la presión más baja simulada representara la carga media durante el tiempo que no se tiene servicio en la red. Se podría cuantificar la posible contaminación por medio de la presencia bacteriológica con las

características previamente analizadas en el capítulo anterior. La carga contaminante es de  $1,4 \times 10^5$  UFC/100ml de Salmonella y considerando que el tiempo de suministro fuera de 14 horas diarias. Se tendría entonces un escenario de intrusión a través de un fallo de 1mm para dos tipos de medio poroso exterior durante un tiempo de intrusión de 10 horas por día, presentando los resultados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Contaminación durante servicio intermitente con fallo de 1mm

Escenario	Caudal de intrusión ( $m^3/s$ )	Volumen de Intrusión ( $m^3$ )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
1mm sin suelo	$3,2 \times 10^{-6}$	0,12	$1,6 \times 10^8$
1mm con arena	$1,9 \times 10^{-6}$	0,07	$9,6 \times 10^7$
1mm con zahorra	$3,7 \times 10^{-7}$	0,01	$1,9 \times 10^7$

La contaminación que se presenta es considerable y está influenciada principalmente por el tiempo sin servicio en la red pero también depende de manera importante por las condiciones del medio exterior, pudiendo observar la diferencia de contaminantes en los tres casos.

En cuanto al suelo, cuando éste es más fino y presenta un nivel de compactación mayor y por ende una porosidad menor, la capacidad de intrusión en la red se ve reducida. Cuando se tiene la presencia de una fuga, las características de compactación pueden variar, hasta convertir la zona de la fuga en un hueco por socavación, en ese caso y cuando se tuviera un evento de intrusión se podría presentar el caudal similar al que se ha modelado cuando no se tiene la presencia de suelo. Por lo que se podría tener un rango de caudal de intrusión para fallos en condiciones del medio exterior con diversas características *in situ*. En este sentido se muestra la afectación importante del caudal de intrusión considerando el medio exterior del fallo.

Los escenarios con el fallo circular de 4mm se presentan en la Figura 5.4. En ella se muestra el conjunto de las simulaciones realizadas para cargas de presión negativa desde -1m hasta -3,5m. Los caudales de intrusión en estado permanente se reducen notablemente cuando se tiene la presencia de un medio exterior poroso.

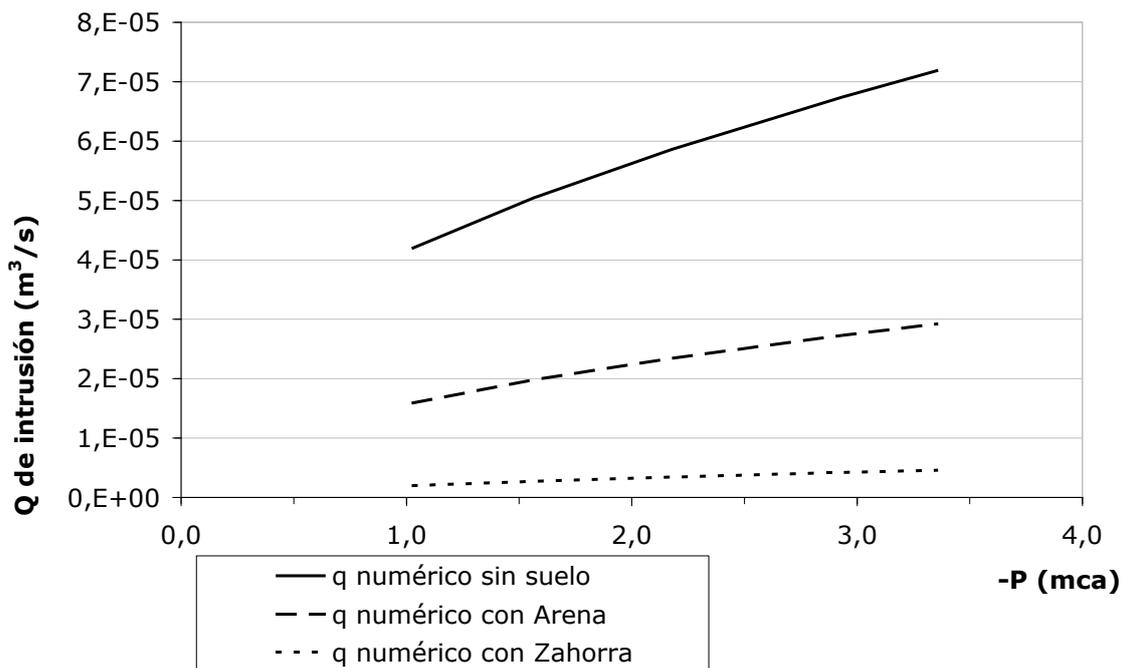
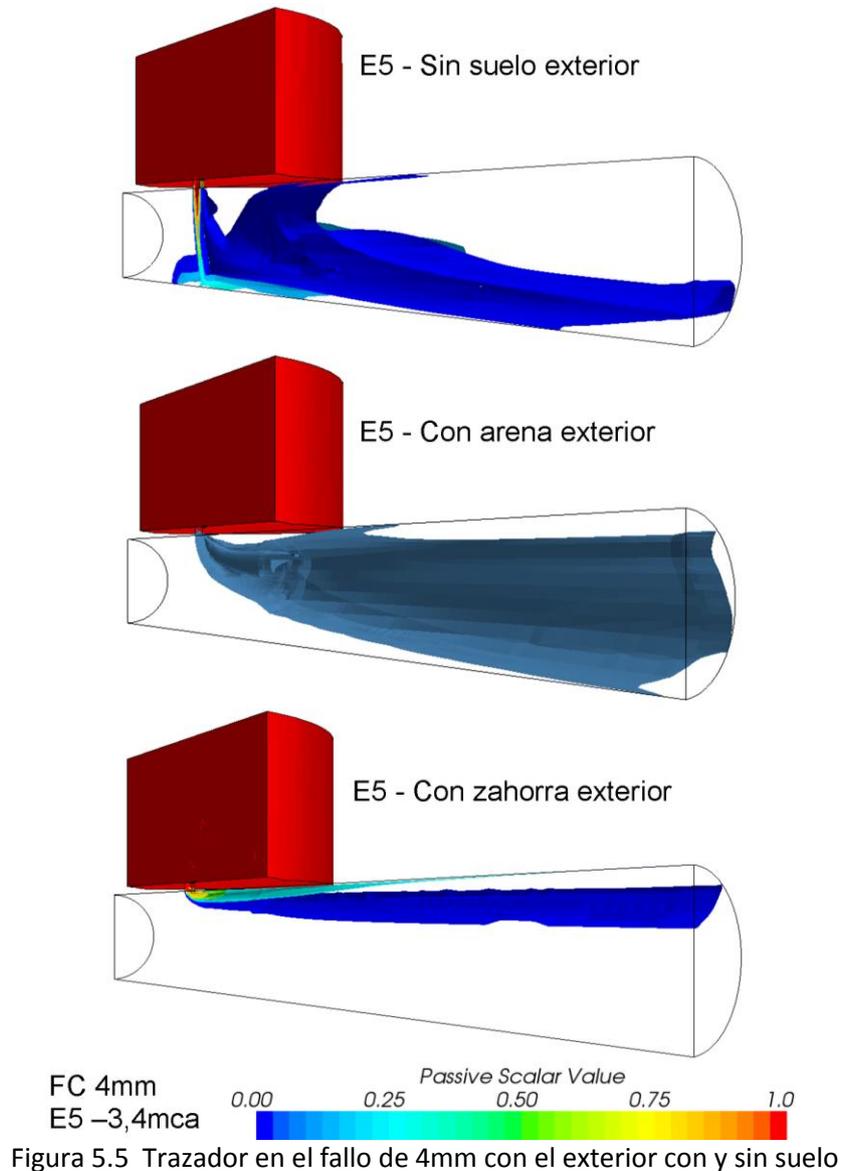


Figura 5.4 Caudal de intrusión para un fallo circular de 4mm con material poroso

En base a estos resultados se debe considerar que dependiendo de las condiciones del medio exterior la intrusión a través de fallos tiene unas consecuencias diversas debido a la cantidad de caudal o al rango de caudales que se esté introduciendo.

En la Figura 5.5 se muestran escenarios de intrusión para la presión de 3,4mca para el fallo circular de 4mm sin material y con material poroso exterior. De igual forma que en los escenarios de 1mm, la afectación en el chorro de intrusión dependiendo de las condiciones del medio exterior; observando que

con la zavorra simulada el chorro de intrusión se presenta en condiciones muy similares que con el fallo de 1mm.



Considerando el evento del abastecimiento intermitente con la presión más baja simulada representando una carga media durante el tiempo que no se tiene servicio en la red. El fluido exterior presenta una carga de  $1,4 \times 10^5$  UFC/100ml de Salmonella y el tiempo que no se tiene servicio en la red es de 10 horas; las condiciones de contaminación a través de un fallo de 4mm se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Contaminación durante servicio intermitente con fallo de 4mm

Escenario	Caudal de intrusión (m <sup>3</sup> /s)	Volumen de Intrusión (m <sup>3</sup> )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
4mm sin suelo	4,2×10 <sup>-5</sup>	1,51	2,1×10 <sup>9</sup>
4mm con arena	1,6×10 <sup>-5</sup>	0,57	8,0×10 <sup>8</sup>
4mm con zahorra	2,0×10 <sup>-6</sup>	0,07	1,0×10 <sup>8</sup>

Además del tiempo sin servicio en la red otro factor considerable es la dimensión del fallo, el cual es equivalente a una fuga de fácil detección en el rango de presiones que se ha trabajado, por lo que su afectación es importante aun cuando se tienen unas condiciones de suelo más compactas como es el caso de la zahorra.

En la Figura 5.6 se muestra la disminución del caudal de intrusión con respecto al caudal total de circulación en la tubería. Dependiendo del rango de presión en la conducción la reducción puede ser del 55 hasta el 95% con las características de los suelos aquí modelados.

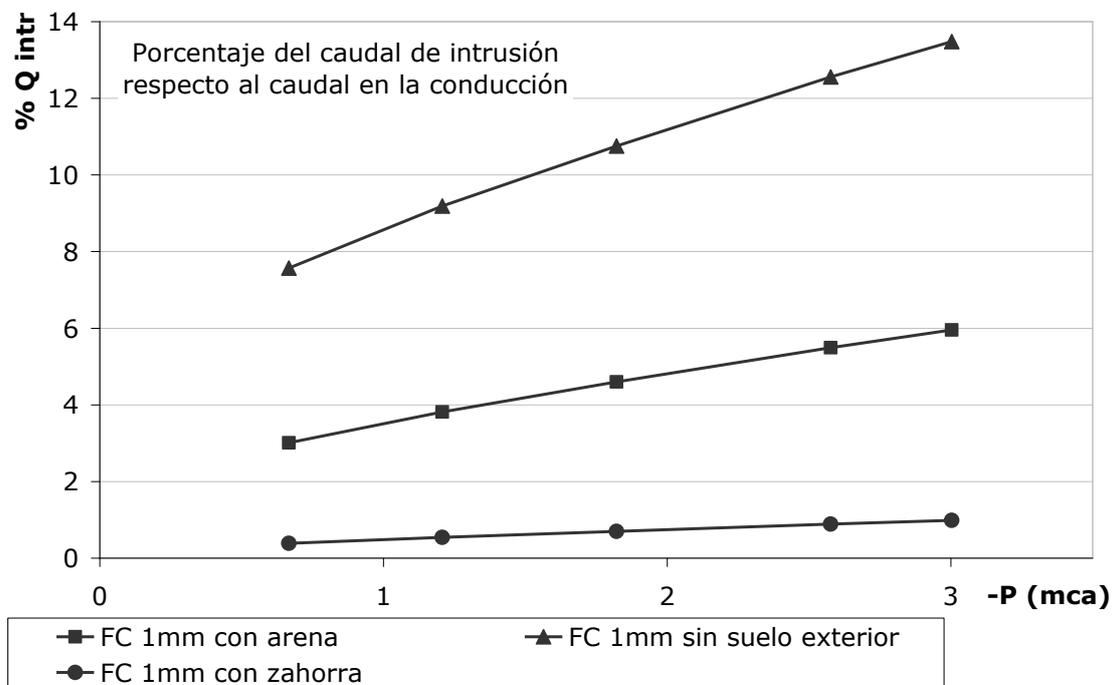


Figura 5.6 Trazador en el fallo de 4mm con el exterior con y sin suelo

La reducción del caudal de intrusión para las simulaciones que se generaron con material poroso en el exterior se describe en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Reducción del caudal de intrusión con material poroso

Modelo	Caudal de intrusión medio sin suelo ( $m^3/s$ )	Reducción media del caudal con Arena (%)	Reducción media del caudal con Zahorra (%)
FC-1mm	$4,80 \times 10^{-6}$	40,4	87,3
FC-4mm	$5,80 \times 10^{-5}$	60,4	94,3

El caudal de intrusión con respecto al circulante, varía dependiendo del fallo de 1 ó 4mm y del medio poroso. Para el caso específico de -3mca de presión en la conducción con arena, el porcentaje de caudal es 0,6 y 6% para los fallos de 1 y 4mm respectivamente.

En el caso de la zahorra, el fallo de 4mm y la presión de -0,7mca; se tiene un 0,39% de intrusión respecto al caudal circulante. En cambio para el fallo de 1mm con la presión de -1mca, la intrusión representa un 0,08% del caudal total.

Dependiendo del fallo, el suelo exterior y las condiciones intermitentes; la intrusión puede ser muy variable a la hora de considerar contaminantes. Comparando los fallos de 1 y 4mm, aun cuando la presión mínima exterior es mayor en el de 1mm, la cantidad de contaminante con un medio exterior sin suelo es 15 veces mayor en el fallo de 4mm. Al comparar considerando el suelo más compacto, la cantidad de patógenos es 5 veces mayor en el fallo de 4mm. De cualquier manera es una contaminación importante en todos los casos influenciada principalmente por el tiempo que dura la red sin servicio.

## 5.5 Intrusión en Transitorio con Medio Poroso

Se hacen cuatro escenarios numéricos tomando como base las simulaciones que se realizan en estado transitorio para los fallos circulares de 2 y

4mm. En la Tabla 5.6 se presentan las características de los escenarios simulados.

Tabla 5.6 Escenario de transitorios con medio poroso exterior

Escenario	Carga Inicial (mca)	$D_{eq}$ medio (mm)	Porosidad
IT-A-2mm	13,1	2,00	0,40
IT-B-2mm	13,1	0,42	0,25
IT-A-4mm	15,0	2,00	0,40
IT-B-4mm	15,0	0,42	0,25

Así, se mostrará la capacidad de intrusión con suelo exterior, como podría ser el caso en campo cuando la fuga no ha provocado socavación.

En la Figura 5.7 se muestra la reducción del volumen a través del fallo para los escenarios del fallo de 2mm. Se muestran los valores del volumen para la fuga, para la intrusión y el acumulado en los escenarios sin suelo, con arena y con zahorra. Se observa la reducción del volumen de intrusión en el evento transitorio planteado.

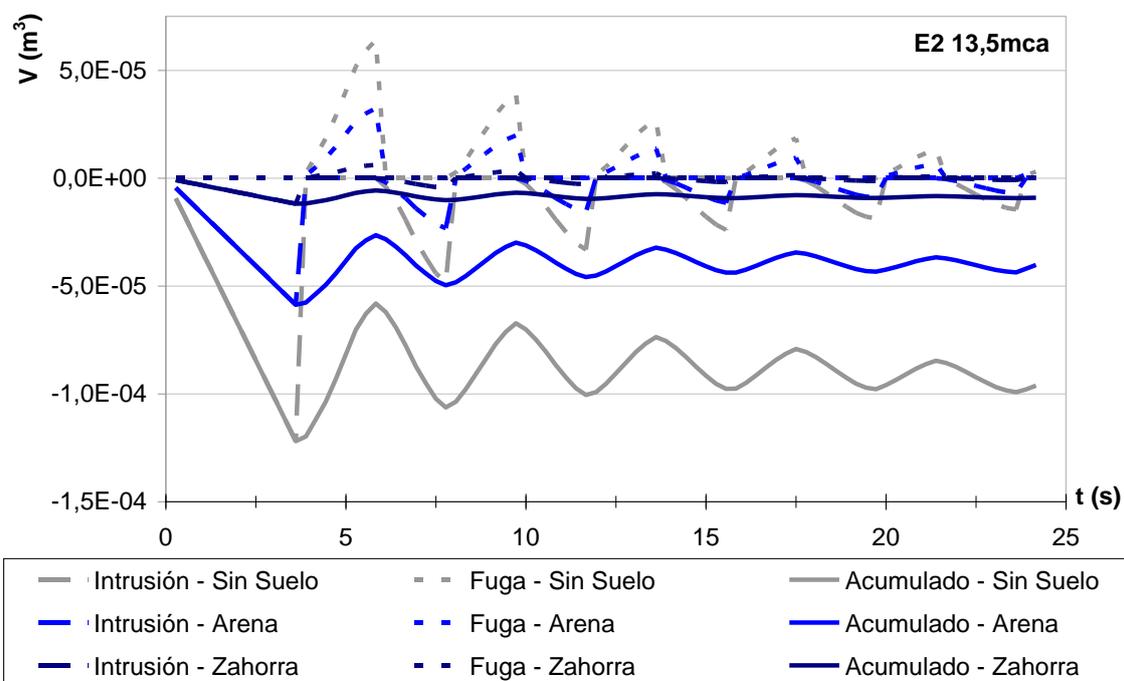


Figura 5.7 Volúmenes a través del fallo de 2mm durante transitorios con suelos

En la Tabla 5.7 se muestra la reducción del volumen acumulado medio de intrusión cuando se presenta un medio poroso exterior con respecto a un escenario cuando no se tiene un medio exterior poroso. Como se ha mencionado, la reducción está en función de las características del suelo.

Tabla 5.7 Volumen acumulado medio para los escenarios E2-13,5mca

Escenario	Volumen de intrusión final (m <sup>3</sup> )	Reducción (%)
E2-13mca sin suelo	$9,62 \times 10^{-5}$	-
E2-13mca con arena	$4,03 \times 10^{-5}$	58,2
E2-13mca con zahorra	$9,07 \times 10^{-6}$	90,6

Haciendo la consideración del fluido contaminante exterior con organismos patógenos:  $1,4 \times 10^5$  UFC/100ml de Salmonella. Se tendría la contaminación que se muestra en la Tabla 5.8 para el transitorio de presión con fallo de 2mm y con dos tipos de suelos en el exterior de la tubería.

Tabla 5.8 Contaminación durante transitorio del fallo de 2mm con suelos

Escenario	Volumen de intrusión (m <sup>3</sup> )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
E2-13mca sin suelo	$9,62 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^5$
E2-13mca con arena	$4,03 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^4$
E2-13mca con zahorra	$9,07 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^4$

Se observa la reducción de la presencia de organismos aunada al incremento de las condiciones exteriores de un suelo más compacto. Por lo que como resultado de un transitorio con las características planteadas se puede considerar la carga bacteriológica mostrada en la Tabla 5.8, donde dependiendo de las condiciones el medio exterior se puede obtener una carga contaminante hasta con 10 veces de diferencia para las mismas condiciones en la conducción.

En la Figura 5.8 se muestra la evolución del trazador en el interior de la conducción durante el transitorio de presión para cuando se tiene material

poroso en el exterior. Se puede observar la diferencia de la intrusión para cuando se tiene uno u otro tipo de suelo.

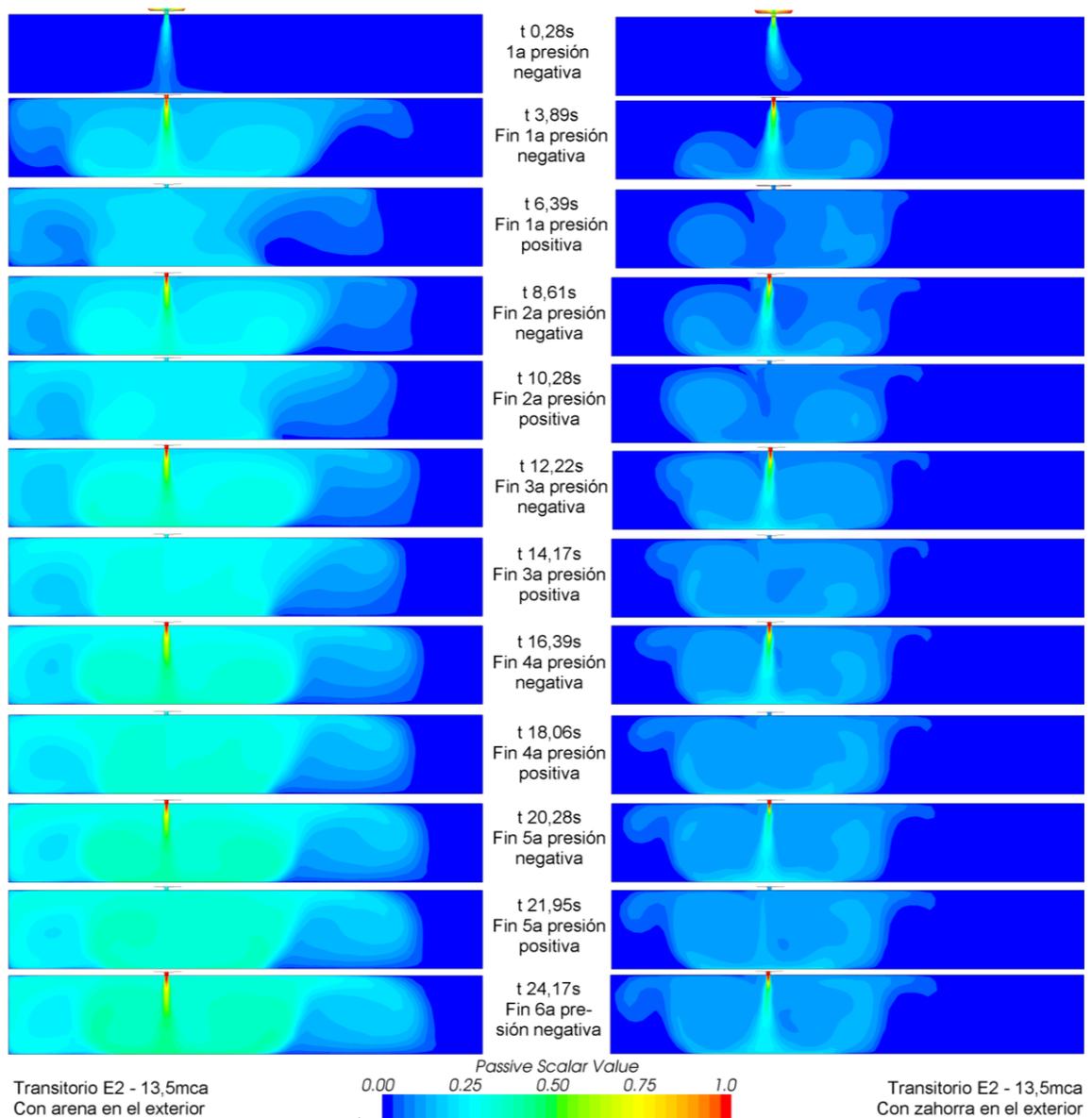


Figura 5.8 Trazador para el transitorio de 13,5 (FC2mm con suelos)

Con respecto a los escenarios del fallo circular de 4mm para cuando no se tiene suelo y con suelo (arena y zahorra) se muestran los resultados de los volúmenes durante el transitorio en la Figura 5.9.

El transitorio de presión que se genera con el fallo circular de 4mm presenta menos oscilaciones de presión y éste es amortiguado más rápido que con el fallo circular de 2mm. Con un tiempo de duración menor, la afectación es mayor debido a las dimensiones del fallo, el volumen de intrusión es más grande como puede observarse en la Figura 5.9, pero con los efectos del suelo exterior la reducción de la intrusión se presenta como un comportamiento similar.

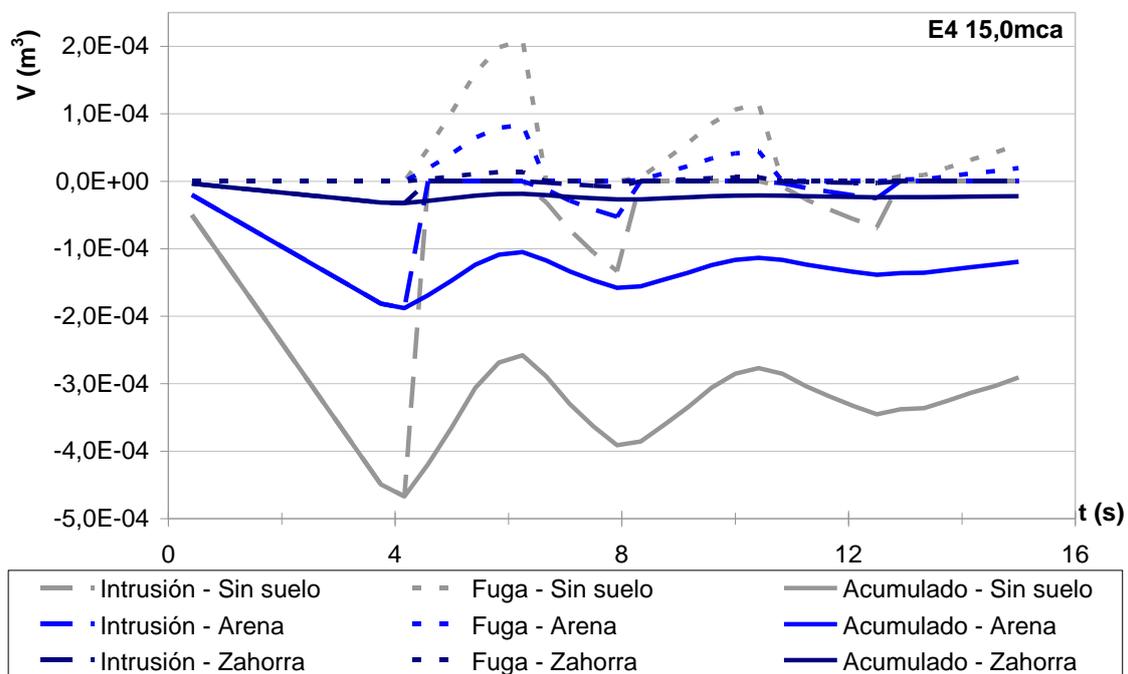


Figura 5.9 Volúmenes a través del fallo de 4mm durante transitorios con suelos

En la Tabla 5.9 se muestra el volumen acumulado medio de intrusión para los escenarios del medio exterior.

Tabla 5.9 Volumen acumulado medio para los escenarios E4-15,0mca

Escenario	Volumen de intrusión final (m <sup>3</sup> )	Reducción (%)
E4-15mca sin suelo	$3,45 \times 10^{-4}$	-
E4-15mca con arena	$1,39 \times 10^{-4}$	59,8
E4-15mca con zahorra	$2,38 \times 10^{-5}$	93,1

En este sentido se puede dar muestra de la variabilidad de la capacidad de intrusión cuando la conducción se encuentra enterrada. Aún cuando el suelo es más compacto, la intrusión alcanza valores representativos. Además al considerar fuentes de contaminación como las que se han planteado en este trabajo, se puede observar la afectación durante este tipo de eventos transitorios ligados a los fallos y considerando medios porosos.

Haciendo la consideración con respecto a las bacterias en el exterior de la conducción, representadas por medio de la Salmonella, con una concentración de  $1,4 \times 10^5$  UFC/100ml en el fluido exterior. Se tendría la contaminación que se muestra en la Tabla 5.8 para el transitorio de presión con fallo de 4mm y con dos tipos de suelos en el exterior de la tubería.

Tabla 5.10 Contaminación durante transitorio del fallo de 4mm con suelos

Escenario	Volumen de intrusión (m <sup>3</sup> )	UFC de Salmonella por intrusión en el transitorio
E4-15mca sin suelo	$3,45 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^5$
E4-15mca con arena	$1,39 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^5$
E4-15mca con zahorra	$2,38 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^4$

El efecto es muy parecido a los escenarios del fallo circular de 2mm con respecto al tipo de material exterior. Aunque no se puede hacer un balance directo entre los escenarios de los fallos de 2 y de 4mm debido a que la carga inicial varía de 13,5 en el caso del de 2mm a 15,0mca para el caso del de 4mm. La carga microbiológica al final del transitorio es 15 veces menor con la zahorra, mientras que con la arena la carga en el volumen final es de 2,5 veces respecto a la carga cuando no se presenta suelo en el fallo de 4mm. Comparado con los escenarios en estado permanente del fallo de 4mm, al tener un suelo exterior como la zahorra el volumen de intrusión se reduce un poco más de 20 veces el volumen de intrusión (comparado con la 15 veces que se reduce en las

condiciones de este transitorio de presión) que cuando no se presenta suelo en el exterior de la conducción. La afectación es mayor en un evento permanente sobre todo considerando el tiempo con el que se puede mantener la intrusión durante los períodos sin abastecimiento en servicios intermitentes de distribución de agua.

En la Figura 5.10 se muestra la configuración del trazador en los escenarios del fallo de 4mm con material poroso exterior.

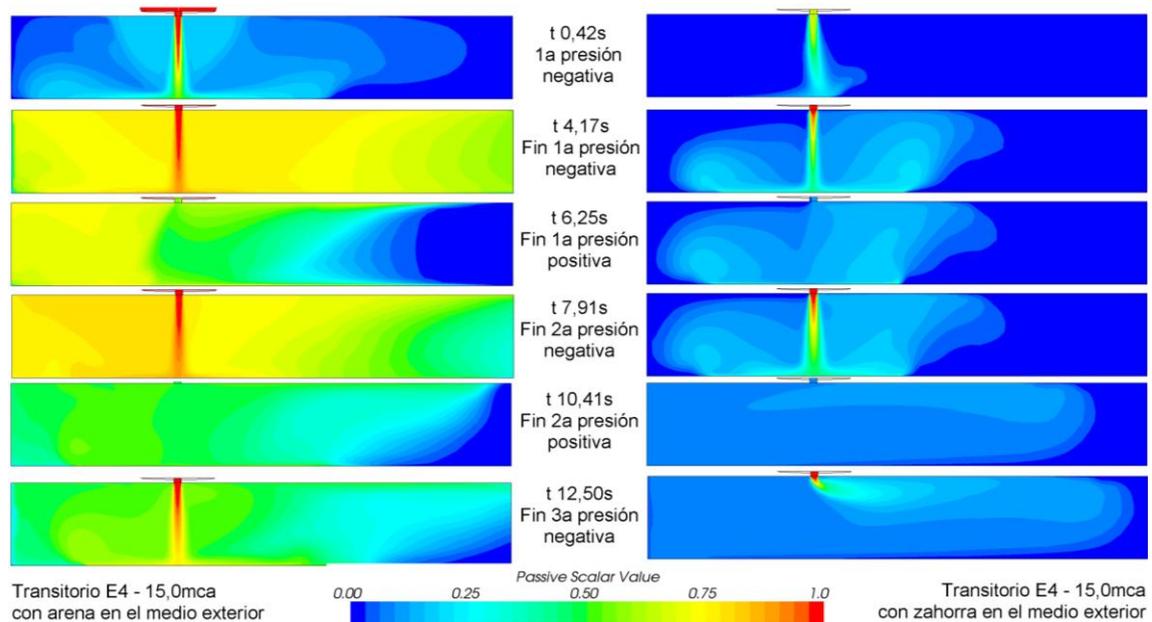


Figura 5.10 Trazador para el transitorio de 15,0 (FC4mm con suelos)

De forma global, el volumen de intrusión medio durante el tiempo de transitorio se puede ver disminuido en proporciones importantes, dependiendo de las condiciones del suelo en el entorno a la conducción y por ende la carga contaminante se reduce en las mismas proporciones. La consideración del tipo de fallo que sea análogo a una fuga de fácil o difícil detección presenta diferencias importantes durante eventos adversos a las condiciones de operación de la red.

## 5.6 Bifurcación en una Red de Distribución

A continuación se simula un tramo de red donde se presenta una bifurcación, se trabaja con este escenario que es típico en el abastecimiento con el fin de cuantificar la afectación que se tendría hacia ambas direcciones de la conducción. De esta forma se puede dar pie a los desarrollos futuros que se pueden plantear con escenarios representativos de una red de distribución con sus consideraciones establecidas en campo.

### 5.6.1 Configuración de la instalación a modelar

El escenario que se ha diseñado se muestra en la Figura 5.11; se especifican las dimensiones del volumen de control y se muestra la dirección del flujo. La intención de este modelo es el de observar la intrusión aplicando los elementos que se han determinado en los capítulos anteriores.

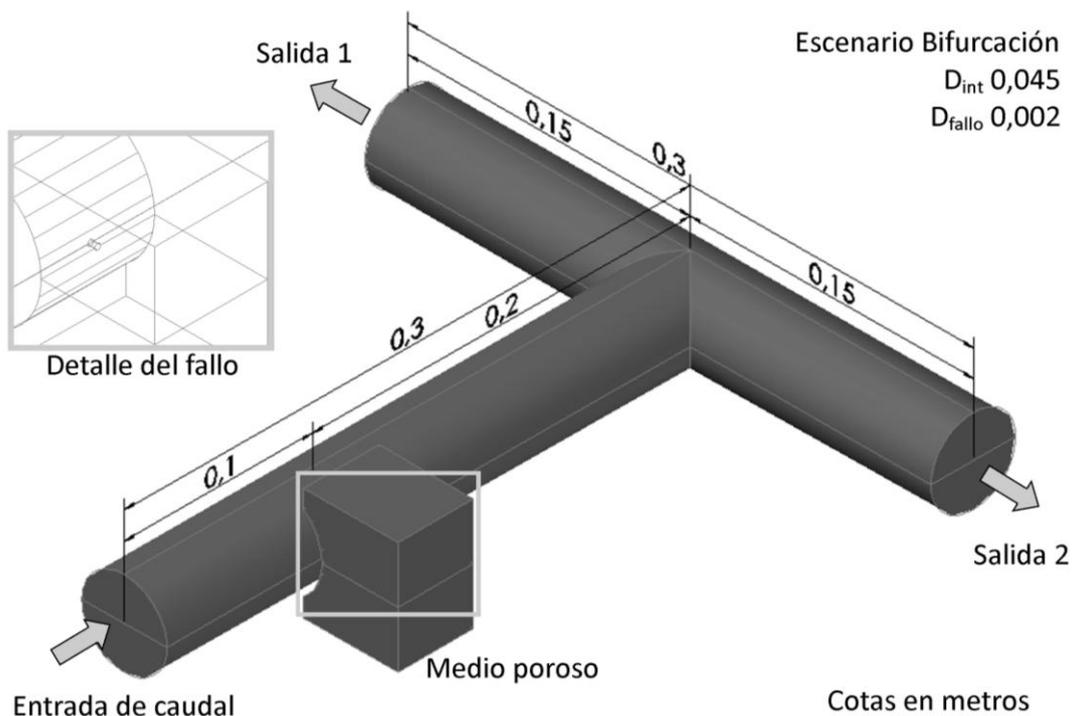


Figura 5.11 Volumen de control para una bifurcación

El volumen de control está conformado por una conexión en “T”, la longitud a modelar de ambas tuberías es de 0,3m; con diámetro interior de 0,045m y espesor de pared de 0,0025m. A 0,1m de la entrada de flujo en la tubería se presenta un orificio de 0,002m de diámetro. El exterior de donde se presenta la intrusión está formado por un volumen de  $0,06 \times 0,05 \times 0,04 \text{m}^3$ .

El método numérico se resuelve de forma segregada en segundo orden. El régimen de viscosidad turbulento se calcula con el modelo “*Realizable k-ε*” con tratamiento en la pared “*two layer All y+*”. Se utiliza el modelo con el que se simula un trazador mediante el escalar pasivo. La discretización se realiza en base a una malla hexaédrica (Figura 5.12).

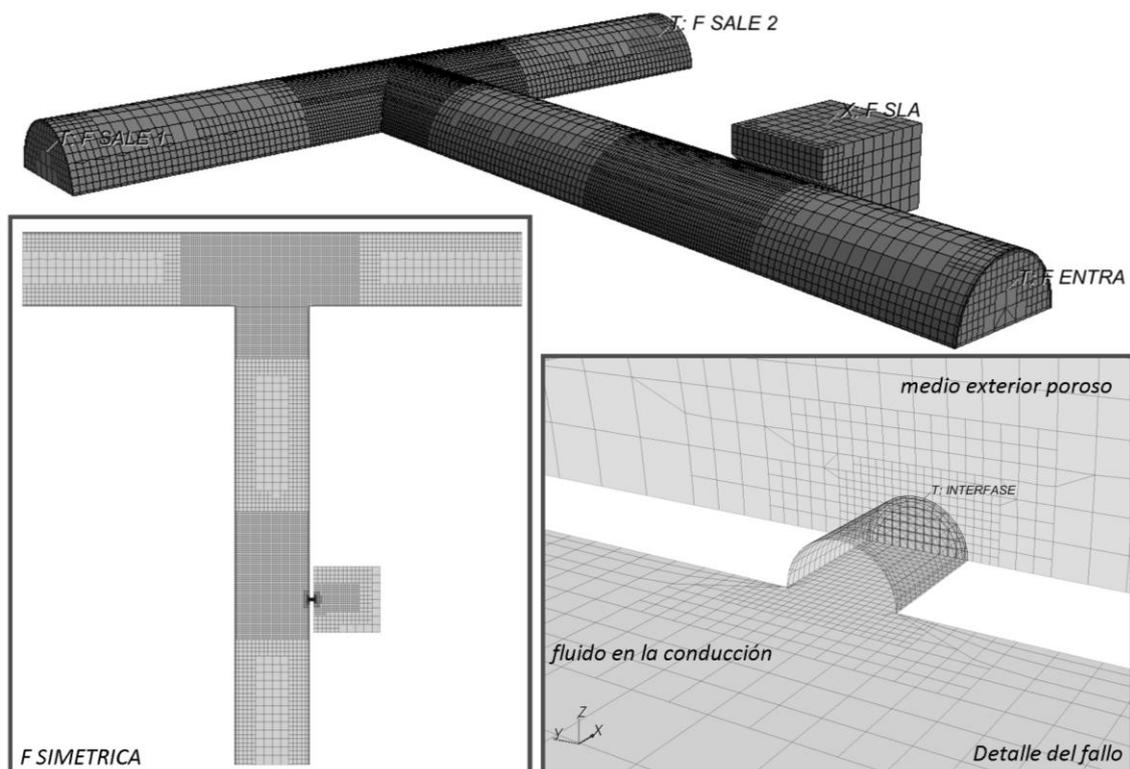


Figura 5.12 Malla y condiciones de frontera en la bifurcación

### 5.6.2 Escenarios en la bifurcación en estado permanente

Se propone resolver el modelo numérico para generar una intrusión en condiciones de baja presión y con diferentes rangos de caudal de salida. Por lo que las condiciones de contorno se establecen para las fronteras de la siguiente manera (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 Condiciones de contorno para la bifurcación en permanente

Escenario	Frontera	Condición de contorno	Valor
	Entrada en la Conducción	Carga de presión	-0,5mca
	Entrada en el Exterior	Carga de presión	0,2mca
A	Salida 1	Flujo de masa	50%
	Salida 2	Flujo de masa	50%
B	Salida 1	Flujo de masa	60%
	Salida 2	Flujo de masa	40%
C	Salida 1	Flujo de masa	75%
	Salida 2	Flujo de masa	25%
D	Salida 1	Flujo de masa	90%
	Salida 2	Flujo de masa	10%

El flujo de masa será el equivalente al de un caudal de 2,3l/s. Los valores de turbulencia en las fronteras se especifican con la intensidad y la longitud de la turbulencia, con valores de 0,04 y 0,03m respectivamente.

El medio poroso exterior estará representado por unas características de material de diámetro de partículas de 1mm y con una porosidad de 0,30. En el contorno exterior y en la frontera de la carga de entrada se indica el modelo del trazador con un valor de 1,0 para la variable escalar pasiva.

Al término de las simulaciones se puede evaluar el caudal de intrusión resultante en las dos salidas de la bifurcación. El caudal de intrusión representa el 0,08% del caudal total con las condiciones establecidas de presión y de suelo exterior del escenario planteado. Este porcentaje es equivalente a 0,2l/s. De este caudal de intrusión en base al modelo del trazador se puede obtener una

aproximación del transporte del fluido exterior como se muestra en la Tabla 5.12

Tabla 5.12 Valor del trazador en las salidas

Escenario	Frontera	Valor del trazador	% Trazador
A	Salida 1 (50)	$2,25 \times 10^{-7}$	0,01
	Salida 2 (50)	$1,67 \times 10^{-3}$	99,99
B	Salida 1 (60)	$6,95 \times 10^{-7}$	0,03
	Salida 2 (40)	$2,09 \times 10^{-3}$	99,97
C	Salida 1 (75)	$3,98 \times 10^{-6}$	0,12
	Salida 2 (25)	$3,34 \times 10^{-3}$	99,88
D	Salida 1 (90)	$3,86 \times 10^{-5}$	0,48
	Salida 2 (10)	$8,02 \times 10^{-3}$	99,52

La intrusión se genera en estado permanente y mientras el caudal se mantenga constante en la entrada, la salida (2) del lado que se presenta el fallo en la bifurcación siempre mantendrá un porcentaje de flujo de intrusión mayoritario que en la salida contraria al lado del fallo, aun cuando los caudales en la salida (1) sean mayores. En la Figura 5.13 se muestra la configuración del trazador en el escenario (C, 75 -25), se tiene que indicar el rango del trazador con un valor mínimo de  $1 \times 10^{-5}$  para poder observar el flujo de intrusión en ambas salidas.

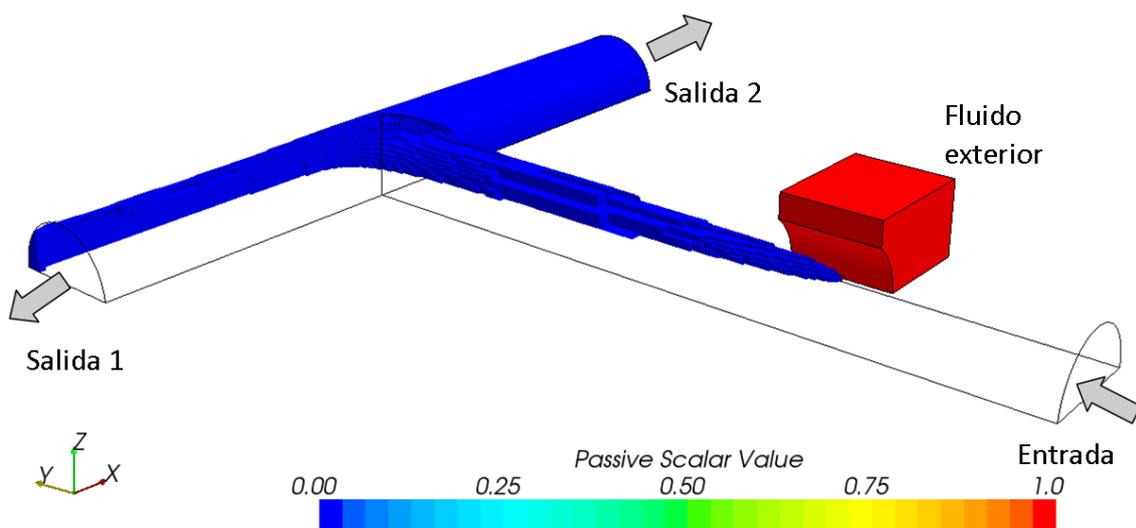


Figura 5.13 Trazador para el evento permanente con salidas 75 y 25%

### 5.6.3 Escenario de la bifurcación en transitorio de presión

En este escenario de simulación se genera un transitorio de presión aguas arriba del fallo con una carga inicial de 13,5mca. Al cabo de unos segundos el flujo se restablece y la conducción vuelve a sus condiciones en estado permanente; en la Figura 5.14 se puede observar el escenario que se ha planteado.

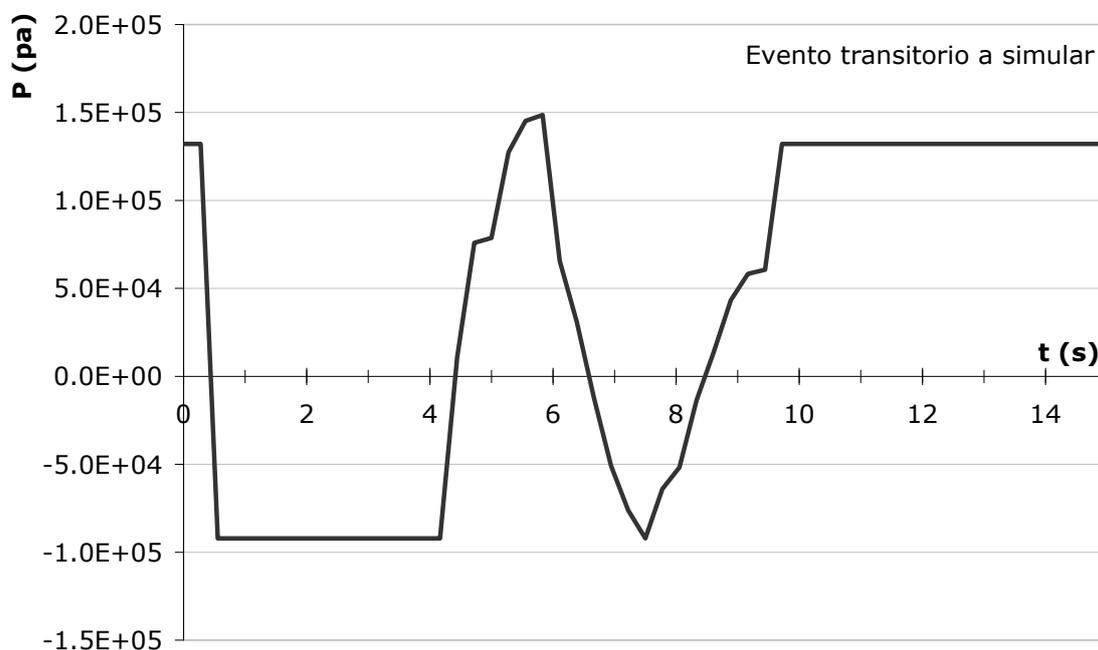


Figura 5.14 Transitorio a simular en la bifurcación

El modelo CFD funciona con las condiciones planteadas para los escenarios anteriores pero considerando el modelo no estacionario incluyendo pasos de tiempo de 0,28s. El caudal de circulación por la tubería es de  $2,41\text{m}^3/\text{s}$  y el fluido exterior se presenta en un medio poroso con diámetro de partículas de 1mm y con una porosidad de 0,30. Las fronteras de entrada y salida del flujo en el volumen de control se especifican en la Tabla 5.13 considerando las salidas en proporciones diferentes.

Tabla 5.13 Condiciones de contorno para la Bifurcación en transitorio

Frontera	Condición de contorno	Valor
Entrada en la Conducción	Carga de presión	-0,5mca
Entrada en el Exterior	Carga de presión	0,2mca
Salida 1	Flujo de masa	60%
Salida 2	Flujo de masa	40%

Después de realizar la simulación del transitorio se presentan las imágenes de trazador para los tiempos más representativos (Figura 5.15).

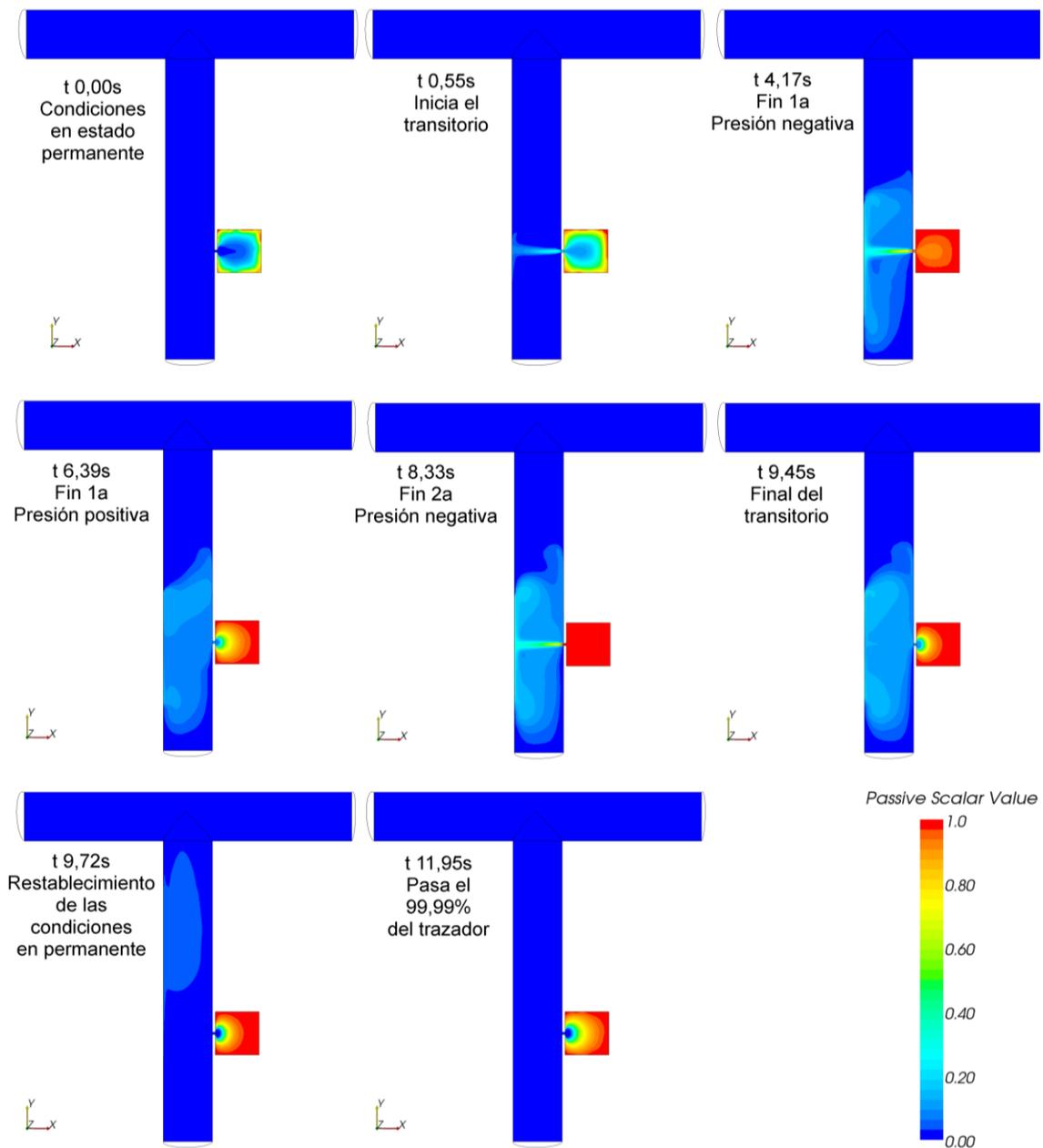


Figura 5.15 Trazador durante el transitorio en la bifurcación

Los volúmenes de intrusión y fuga durante el transitorio se presentan en la Figura 5.16. El volumen de intrusión final es de  $2,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ; a partir de este volumen se genera la fuga a través del fallo al mismo tiempo que se restablece el caudal de circulación y el volumen de intrusión es transportado hacia las salidas de la bifurcación.

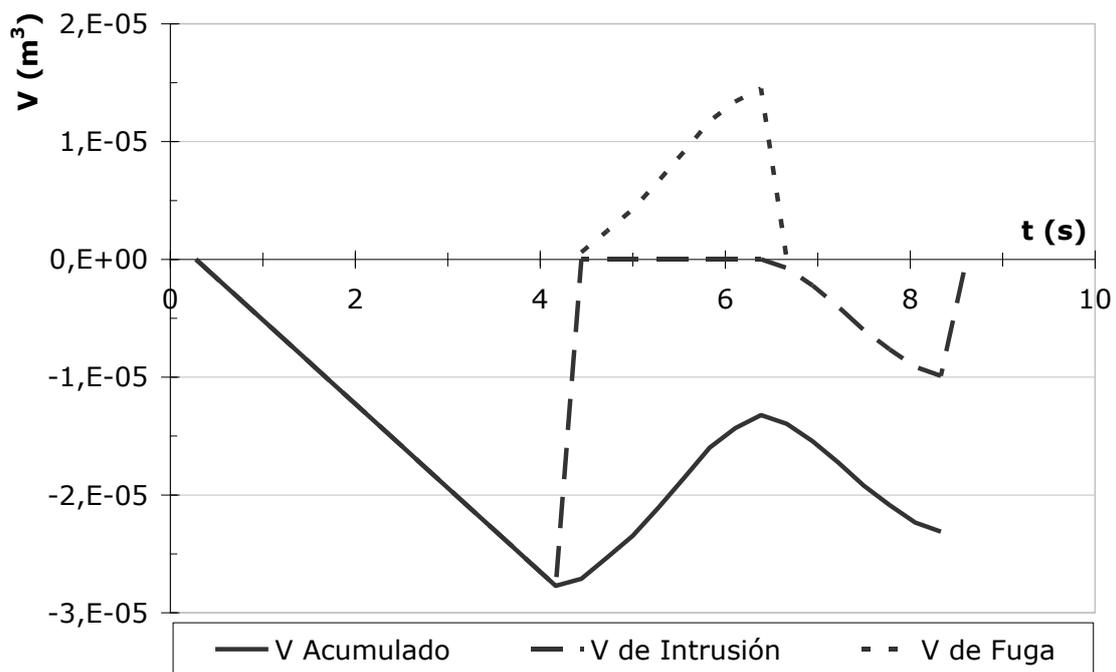


Figura 5.16 Volúmenes a través del fallo durante el transitorio en la bifurcación

Si se presentasen bacterias con la carga simulada de  $1,4 \times 10^5 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$  de Salmonella, la carga de intrusión de estas bacterias sería de  $3,2 \times 10^4 \text{ UFC}$ , por lo que se observa de una manera directa la afectación en la conducción.

Finalmente mediante el CFD se le puede dar seguimiento a la intrusión por medio del trazador en las salidas de la bifurcación, en la Figura 5.17 se observa la pluma de la intrusión.

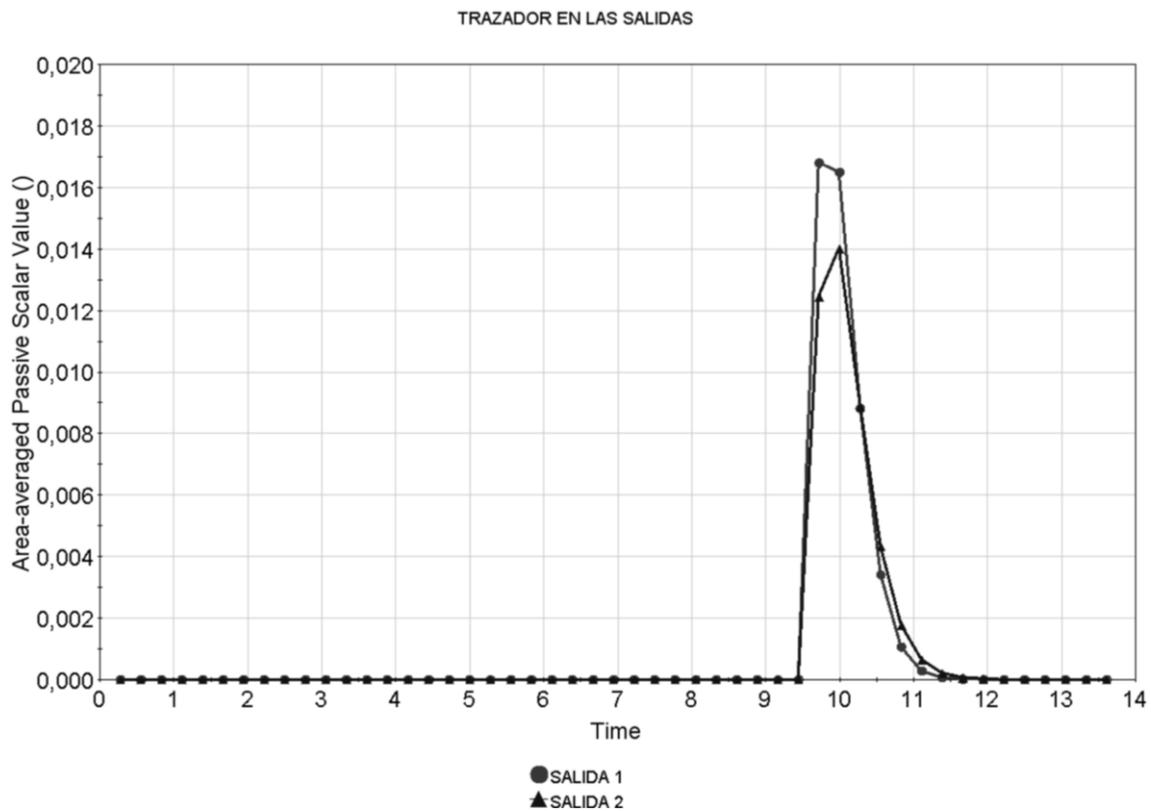


Figura 5.17 Trazador en las fronteras de salida

En este caso se presenta una concentración de trazador relacionada con el caudal de salida establecido para cada frontera. Para la salida 1 se había establecido el 60% del flujo de entrada la cual presenta un pico de trazador de 0,017; mientras que en la salida 2, con un caudal de salida del 40% se presenta un valor de trazador de 0,014 a los 10 segundos de iniciado el transitorio.

Mediante esta metodología se tiene una alternativa para realizar una estimación de contaminación en las zonas vulnerables a eventos de intrusión a través de fallos en la red. Se han presentado escenarios en donde pueden compararse eventos con diversos escenarios relacionados con los tipos de fugas, medio poroso exterior y tipo de suministro, con los cuales se observa que la afectación más importante se presenta cuando el abastecimiento no se mantiene de manera continua, no obstante la problemática de los transitorios de presión presentan escenarios de intrusión a través de fallos cuando los picos

mínimos de presión caen por debajo de la presión en el interior de la conducción. La vulnerabilidad dependerá de las concentraciones de las fuentes contaminantes que sean transportados hacia el interior de la instalación. A partir de ahí se deben plantear modelos en los cuales se analice la capacidad de actuación de los desinfectantes en el seno del agua.

# **CAPÍTULO 6**



## 6 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este documento se ha presentado un análisis físico y numérico de uno de los fenómenos que provoca problemas en la calidad del agua potable debido al fenómeno de la intrusión patógena en redes de distribución del agua. El evento de intrusión patógena en el que se basa la presente investigación ocurre como confluencia de tres circunstancias: un fallo en la conducción, un fluido contaminante en el entorno del fallo, y una bajada de presión en la conducción. En cuanto a la bajada de presión puede ser de carácter permanente o transitorio. La intrusión patógena puede dar lugar a una contaminación de carácter microbiano y causar enfermedades epidémicas, por ello su estudio reviste gran interés.

Así pues, los fallos en las conducciones además de causar fugas en la red, pueden constituir una importante fuente de contaminación del agua suministrada. Es por ello que los trabajos de mantenimiento y prevención de las fugas conllevan una mayor fiabilidad en la calidad del agua potable además de una mejora en el rendimiento del sistema. La calidad del agua es importante para preservar la salud pública y por otro lado, al evitar la contaminación del agua potable durante la distribución no se pierde la inversión realizada en el tratamiento de la misma.



## 6.1 Conclusiones

El presente trabajo se ha realizado en 6 capítulos de los cuales se presenta un resumen de las aportaciones realizadas en cada uno de ellos, con objeto de concluir finalmente.

En el **Capítulo 1** se analizó el sistema de abastecimiento y en particular se verificó que la presencia de organismos patógenos está latente dentro de las redes de distribución de agua, lo cual ha sido corroborado con los resultados de los controles de calidad en abastecimientos de la región. Se plantearon tres casos principales para relacionar la presencia bacteriológica: Fallos puntuales en el proceso de cloración, deficiencias en el proceso de muestreo y la intrusión patógena en la red de distribución. En este sentido se ha puesto de manifiesto la importancia del evento de la intrusión.

En el **Capítulo 2** se describieron los tres factores que se requieren para que se produzca la intrusión patógena. 1.- la fuente contaminante, de las cuales se analizaron muestras de agua superficiales corroborando que los organismos patógenos se encuentran en ambientes que saturan los suelos en el entorno urbano. Además, se constató que las distancias requeridas entre la red de saneamiento y la de agua en ocasiones no es la mínima requerida por lo que las fuentes contaminantes se encuentran en el entorno de las conducciones de agua. 2.- Se ha realizado un análisis de los fallos de las conducciones hasta mostrar la clasificación de los tipos de fallo, a partir de los cuales se basó la modelación de la intrusión. 3.- De los mecanismos que generan la intrusión a través de los fallos se identificaron los transitorios de presión y los servicios intermitentes de agua con los cuales se planeó la modelación.

En el **Capítulo 3** se hizo un análisis de los proyectos basados en la teoría FAVAD para los caudales de fuga, se identificaron las relaciones que se presentan entre el exponente (de la relación potencial del caudal fugado y la presión) con el material de las tuberías y con el tipo de fallo. Se realizó el modelo de intrusión análogo al de las fugas mediante la representación experimental de fallos característicos y caudales análogos a las fugas. Se contrastaron los resultados mediante la teoría de FAVAD y se mostró un análisis alternativo para la verificación de la variación del área del fallo durante la intrusión. Se simuló un escenario considerando el medio poroso en el exterior de la conducción. Finalmente se realizó la representación numérica con modelación CFD de los escenarios físicos en un régimen considerado permanente validando las correlaciones obtenidas.

En el **Capítulo 4** se desarrolló la modelación de la intrusión durante transitorios de presión, se realizaron los eventos de forma experimental y se representaron los eventos de forma numérica. Se obtuvo el ajuste de los transitorios mediante el método de las características modificado y finalmente se realizó la representación mediante la modelación CFD. La validación de los caudales de intrusión durante los transitorios se realizó con videos de alta definición.

En el **Capítulo 5** se definieron escenarios en los cuales se incluyeron simulaciones con suelos representativos de zanjas de las redes de distribución. Se compararon los caudales de intrusión que pueden disminuirse con la presencia del material poroso en el exterior. Se creó un escenario en donde se presenta una bifurcación, y se generan diversos escenarios en estado permanente y un escenario en estado no permanente, simulando un transitorio de

presión rápido en el que después se restablece el caudal, se obtuvo la pluma de intrusión por ambas salidas.

Finalmente en este **Capítulo 6** se concluye lo siguiente:

Se ha constatado la presencia de actividad bacteriológica en el entorno de las redes de distribución de agua potable, esta presencia es prácticamente nula pero no inexistente. Esto confirma la posibilidad del fenómeno de intrusión patógena cuando además en el entorno se presentan fuentes potenciales de contaminación.

Con respecto a la teoría FAVAD y la analogía del modelo de intrusión se constata que existe una variación en las áreas de los fallos longitudinales y transversales cuando estos están sometidos a eventos de intrusión. Aunque los exponentes resultantes en la intrusión se mantuvieron entorno a 0,5. Por otro lado se analiza el hecho de que el área del fallo transversal presenta un caudal de intrusión equivalente a prácticamente dos veces su propia área, esto fue corroborado con la modelación en CFD. Al contrario de lo que ocurrió con el fallo longitudinal, el cual presentó un caudal de intrusión en el que prácticamente se cerraba en su totalidad el fallo.

Con respecto a la modelación numérica CFD se verifica el ajuste con los resultados experimentales. Se confirma la capacidad de los modelos numéricos para generar escenarios que quieran ser corroborados de campo y se propone su uso para otros casos además de los ya modelados.

Para la representación del problema en régimen no permanente, se ha utilizado el método de las características. El análisis del MOC modificado para transitorio de presión generado aguas arriba de la instalación y que incluyen los efectos de disipación debida a las propiedades de la tubería y a la incorporación

de la cavitación funcionan de manera eficiente y en algunos casos se incluyó el efecto del fallo para que su efecto sea representado de forma numérica.

Se ha propuesto una metodología para el análisis numérico que implica el MOC para generar una condición de contorno en el CFD. Esta estrategia se ha mostrado muy útil, tras validarla, para representar numéricamente el problema de la intrusión en condiciones transitorias.

El análisis de los eventos de intrusión en conducciones de agua se ha realizado con fallos que producen caudales análogos a los de fugas de fácil y difícil detección. Cuantificar estos volúmenes es determinante cuando se trata de un contaminante en agua de consumo. A partir de los volúmenes de intrusión se puede establecer entonces la extensión de la afectación de la contaminación dentro de la red. Integrando la velocidad instantánea a través del área del defecto se ha propuesto una metodología para cuantificar numéricamente este volumen de intrusión.

Se han diferenciado las proporciones de los volúmenes y los tiempos en los que se producen las intrusiones, obteniendo finalmente una cuantificación de contaminación por patógenos al final del evento de intrusión ya sea en estado permanente o en transitorio. Por un lado en los eventos transitorios se observa la diferencia entre los fallos que producen caudales de fuga de fácil y difícil detección, para los escenarios que se plantearon la contaminación se triplicaba en los fallos de mayor dimensión. En los eventos simulados como intermitentes la contaminación por intrusión es inevitable cuando los tiempos sin servicio son prolongados y se presente un vaciado de las tuberías. Finalmente, cuando se ha considerado suelo en el exterior, en los eventos transitorios el volumen de intrusión y la carga contaminante se reducen considerablemente en la concentración de patógenos para fallos análogos a fugas de fácil y difícil

detección tomando en cuenta las condiciones del medio poroso exterior y las características del mismo.

La metodología de cuantificar el potencial de la intrusión en diferentes escenarios se propone para el mejoramiento del conocimiento y fiabilidad en este tipo de eventos en la operación de los sistemas de abastecimiento de agua.

Se ha considerado que el uso de las tecnologías de técnicas numéricas en las que se implican las bases de la mecánica de fluidos y de la hidráulica aplicadas en el entorno de la hidráulica urbana permiten aprovechar de mejor manera estos instrumentos para una mejor comprensión de eventos y fenómenos que acontecen en los sistemas de abastecimiento de agua durante su operación. El objetivo de mostrar una forma de cuantificar la intrusión patógena en eventos complejos se ha logrado de manera satisfactoria.

## **6.2 Desarrollos Futuros**

En cuanto a la modelación numérica se podrán plantear escenarios específicos. Se incorporarán otros factores de calidad de agua, plantear el análisis de la reacción entre los agentes contaminantes y el desinfectante del agua potable.

La modelación se planteará para determinar la fiabilidad de las redes de abastecimiento. A la hora de tener determinada la vulnerabilidad de una zona susceptible a intrusión, podrán generarse escenarios de contaminación y la respuesta de la cloración antes de llegar a puntos de consumo próximos.

Una línea a desarrollar aunada a esta modelación es la valoración de la efectividad de la desinfección como protección del agua potable en sistemas de

abastecimiento intermitente donde los rangos sin servicio producen una potente intrusión de contaminantes.

La valoración cuantitativa de la intrusión en este tipo de eventos se podrá cuantificar para elementos específicos y accesorios de geometrías complejas. Así se considerará una más amplia variación en la estructura de la red y en las condiciones temporales de operación.

# **BIBLIOGRAFÍA**



## BIBLIOGRAFÍA

AEAAS, Manual de la cloración, Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, Editorial A. E. A. A. S., 01 de Enero de 1984, 32p.

Andey, S. P., Kelkar, P. S., Influence of intermittent and continuous modes of water supply on domestic water consumption. *Water Resources Management*. Doi: 10.1007/s11269-008-9396-8. 23, 2555-2566. 2009.

Ávila H., Saldarriaga J., Calibración de parámetros de fugas en fallas longitudinales en tuberías de PVC. *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte*, 16:32-44, diciembre de 2004.

Bergant, A., Tijsseling, A., Vítkovský, J., Covas, D., Simpson, A. y Lambert, M., Further investigation of parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing part 1: Mathematical tools. *Proceedings of the 11th International Meeting of the IAHR Work Group on the Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions*, Stuttgart, Alemania, p.12. 2003.

Besner, M. C., Ebacher, G., Jung B. S., Karney, B., Lavoie, J., Payment, P. y Prévost, M., Negative pressure in full-scale distribution system: field investigation, modeling, estimation of intrusion volumes and risk for public health. *Drinking Water Engineering and Science*. Doi:10.5194/dwes-3-101-2010. 3, pp. 101-106, 2010.

Boulos F. P., Karney W. B., Wood J. D., Lingireddy S., Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems, *American Water Works Association*, 97:5 *Journal AWWA*, pp. 111-124. Mayo de 2005.

Borga, A., Ramos H., Covas D., Dudley A. y Neuhaus, T. Dynamic effects of transient flows with cavitation in pipe systems. *Proceedings of the 9th International Conference on Pressure Surges - The Practical Application of Surge Analysis for Design and*

Operation, bHrGroup - The Fluid Engineering Centre. Chester, UK, pp. 24-26. Marzo 2004,

Boyd G. R., Wang H., Britton M. D., Howie D. C, Wood D. J., Funk J, E., Friedman M. J., Intrusion within a simulated water distribution system due to hydraulic transients I: Description of test rig and chemical tracer method. *Journal of Environmental Engineering* 130(7), ASCE, pp. 774-777. Julio de 2004a.

Boyd G. R., Wang H., Britton M. D., Howie D. C, Wood D. J., Funk J, E., Friedman M. J., Intrusion within a simulated water distribution system due to hydraulic transients II: Volumetric method and comparison results. *Journal of Environmental Engineering* 130(7), ASCE, pp. 778-783. Julio de 2004b.

Burn S., D. DeSilva, M. Eiswirth, O. Hunaidi, A. Speers, J. Thornton, Pipe leakage – future challenges and Solutions, Pipes Wagga Wagga, Australia, 1999.

Cabrera, B. J. A. y Tzatchkov V., Suministro intermitente de agua potable en México. Modelos de redes de distribución. XXI Congreso Nacional de Hidráulica. Asociación Mexicana de Hidráulica. Guadalajara, México. Octubre de 2010

Cabrera, E., Espert, V., López, P. A., “Water supply systems in drought periods. The case of Spain”, Drought management planning in water supply systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, pp. 1-21. 1999.

Chaudhry, M. H. *Applied Hydraulic Transients*, Litton Educational Publishing Inc. Van Nostrand Reinhold Co. 1987.

Clark, R. M., Grayman, W. M., *Modeling Water Quality in Drinking Water Distribution Systems*, American Water Works Association, Denver, 1998

Collins, Richard; Besner, Marie-Claude; Beck, Stephen; Karney, Bryan; Boxall, Joby. Intrusion Modelling and the Effect of Ground Water Conditions. *Water Distribution System Analysis Conference*. Tucson, September 2010.

Covas, D., Ramos, H., Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems, Instituto Superior Técnico del Departamento de Ingeniería Civil de Lisboa, Portugal, Water Pipeline Systems, BHR Group 2001.

Covas, D., Ramos, H., Young, A., Jon, D. – Transient Pressure in Water Pipe Systems. Edicao especial (special issue in pressure Recursos Hidricos, APRH. ISSN Vol. 26, N. 2, pp. 69-79, 2005.

Craun, F. M., Craun, F. G., Calderon, L. R., Beach, J. M., Waterborne outbreaks reported in the United Status, Journal of Water and Health, 04. Supl. 2, pp. 9-30. 2006.

Davis P., S. Burn, M. Moglia, S. Gould, A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines, Reliability Engineering and System Safety, no. 92, pp. 1258-1266. 2007.

Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Última modificación: 22.09.2006, <http://europa.eu/scadplus/leg/es/-l/vb/l28079.htm>; página visitada en diciembre de 2007.

Ecometta.org [http://www.ecometta.org/costas\\_litoral\\_playas.html](http://www.ecometta.org/costas_litoral_playas.html), 2010. Página visitada el 09 de febrero de 2011.

Enríquez S., A. Vázquez, L. H. Ochoa, “Control de fugas en sistemas de distribución”, Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, libro II, 2ª sección, Tema 4, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, Comisión Nacional del Agua, México, 1994. 154p.

Ferrer P.J., Aguado G.D., Abastecimiento, Distribución y Saneamiento de Aguas. REF 2001.489. DIHMA-UPV, 2007.

Fleming, K. Susceptibility of PWS to negative pressure transients. Conferencia, VA-AWWA Research Committee Seminar. Octubre, 2007.

Fluent, “User’s Guide”, Fluent 6.2, © Fluent Inc. Enero, 2005.

Friedman, M., L. Radder, S. Harrison, D. Howie, M. Britton, G. Boyd, H. Wang, R. Gullick, M. LeChevallier, D. Wood. And J. Funk. Verificacion and Control of Low Pressure Transients in Distribution Systems. AWWA Research Foundation. Denver, CO. 2004.

Fuertes, V.S.; García-Serra, J.; Iglesias, P.L.; López, G.; Martínez, F.J.; y Pérez, R.; "Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua" , Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.

Geldreich, Edwin E., "Microbial Quality of Water Supply in Distribution Systems" CRC Press LLC, ISBN 1-56670-194-5. 504pp, 1996.

Gray, N. F., "Calidad del agua potable. Problemas y soluciones", editorial Acribia, S. A., título original Drinking Water Quality. Problems and Solutions, editorial: John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, 1994. 1996, 365p.

Greyvenstein B., JE van Zyl, "An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes" Journal of water supply : research and technology, 56, 2. AQUA, 2007, 117-124.

Gualtieri, Carlo, López J. Amparo, Mora R. Jesús. "A comparison among turbulence modelling approaches in the simulation of a square dead zone" Proceedings of the 33rd IAHR 2009 Congress - Water Engineering for a Sustainable Environment. August 9-14, 2009, Vancouver, Canada.

Hanjalić, K., Closure models for incompressible turbulent flows, Lecture Notes at Von Kármán Institute, pp.75, 2004.

Hrudey, S.E, Hrudey E. 2004. Safe drinking water- Lessons from recent outbreaks in affluent nations. London, UK. IWA Publishing.

Hrudey, S.E.; Hrudey. E.; Pollard, S. 2006. Risk Management for assuring safe drink water. Environmental International Journal. 32. pp 948-957.

Hu Y., D.W.Hubble, "Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains", Canadian Journal of Civil Engineering, 34, 2007, 608-621.

Hunter P. R., Waite M., Ronchi E., "Drinking Water and Infectious Disease, Establishing the Links", CRC Press, IWA publishing, 2003

Iglesias P., F. J. Martínez, "Las tuberías en los sistemas de abastecimiento y saneamiento", Título de especialista universitario en instalaciones urbanas de agua. Centro Multidisciplinar de Modelación de Fluidos, Valencia, España, 2006.

Iglesias P.; Fuertes V.; Pérez R.; "Fluidos Incompresibles, Flujos Transitorios en Conductos Cerrados", Editorial Universidad Politécnica de Valencia, ISBN 84-9705-104-1, pp. 181, 2001.

INE, Estadística e indicadores del agua. Boletín informativo del Instituto Nacional de Estadística. ISSN 1579-2277. <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf>. 2008.

ISCI, "Legionelosis", Centro Nacional de Epidemiología, Vigilancia Epidemiológica, [http://www.isciii.es/htdocs/centros/epidemiologia/Epi\\_legionelosis.jsp](http://www.isciii.es/htdocs/centros/epidemiologia/Epi_legionelosis.jsp), Instituto de Salud Carlos III, Servicios de Información de Internet, página web visitada en Enero de 2009.

Karim M. R., Abbaszadegan M. y LeChevallier M., "Potencial for Pathogen Intrusión during Pressure Transients", Journal WWA 95:5, American Water Works Association p. 134-146, Mayo 2003.

Kirmeyer G. J., Friedman M., Martel K., Howie D., LeChevalier, M., Abbaszadegan M., Karim M., Funk J., Harbour J., "Pathogen Intrusion Into Distribution Systems", American Water Works Association Research Foundation (AWWARF), USA y United States Environmental Protection Agency. Publicado por la AWWA Research Foundation y la American Water Works Association, Impreso en Estados Unidos, 2001.

Kleiner Y., B. Rajani, "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models", Urban Water, 3, 2001, 131-150.

Koch, P., Equivalent diameter of rectangular and oval ducts. Building Services Engineering Research & Technology. ISSN 0143-6244. 29,4. Pp. 341-347. 2008

Krause, P., Boyle, D. P., Bäse, F., "Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment", Advances in Geosciences, 5, pp 89-97. 2005

Lambert A., "What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems?", IWA Conference System Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management, en Brno, República Checa, ISBN 80-7204-197-5, Mayo de 2001.

Lauder, B. E. y Spalding, D. B., Matemathical models of turbulence. Academic Press. London, 1972.

Le Chevallier M. W., Gullick R. W. Gullick, Karim M. R., Friedman M., Y Funk J. E., The Potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution systems from pressure transients, *Journal of Water and Health* 01.1, 2003, International Water Association, IWA Publishing 2003. pp 3-14

López P. A., Metodología para la calibración de modelos matemáticos de dispersión de contaminantes incluyendo regímenes no permanentes. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2001.

López P. A., V. Fuertes, P. L. Iglesias, F. J. Martínez, “Modelación mediante CFD de fugas en tuberías de redes de abastecimiento”, V SEREA, Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Abastecimiento de Agua, Valencia, España, noviembre-diciembre de 2005.

López J. A., Martínez S. J., López P. G., Fuertes M. V., Análisis de la Problemática de Calidad de los Abastecimientos: Desde la Planta de Tratamiento hasta el Grifo, V Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Portugal, 2006.

López P. A., J. J. Mora, L. Salas, F. J. Martínez, “Contaminación de los sistemas de distribución de agua como consecuencia de la intrusión patógena”, VII SEREA, Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Abastecimiento de Agua, Morelia, México, Junio de 2007a.

López J. A., Martínez S. J., López P. G., Lara L. B., Modelación computacional del fenómeno de una fuga en tubería de abastecimiento, *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XXII – Nº 2, pp. 43-53, Junio 2007b.

López P. A., J. J. Mora, R. Pérez, J. Martínez, “Modelación hidrodinámica del fenómeno de intrusión en tubería de abastecimiento”, *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, ISSN 0186-4076. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Vol. XXIII No. 4, pp. 103-110. 2008.

López-Jiménez P.A., Mora-Rodriguez J., Fuertes-Miquel V., Platero-Gaona C. Modeling external pathogen intrusion in pipes during pressure transients. First European IAHR Congress. Edimburg. 2010.

LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd © LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. 7860 Angel Ridge Rd. Athens, Ohio 45701 USA, 1999-2007.

Makar J.M., "A preliminary analysis of failures in grey cast iron water pipes", *Engineering Failure Analysis*, 7, 2000, 43-53.

May J., "Pressure dependent leakage", *World Water and Environmental Engineering*, p 10, Octubre 1994.

McDonald, I. F.; El-Sayed M. S.; Mow, K. y Dullien F. A. L. "Flow through Porous Media – the Ergun Equation Revisited". *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 18 N. 3, 1979.

McInnis, D., A relative-risk framework for evaluating transient pathogen intrusion in distribution systems. *Urban Water Journal*. 1: 2, 113 – 127. 2004.

Mckenzie, R., Development of a standardized approach to evaluate burst and background losses in water distribution systems in South Africa. South African Water Research Commission. WRC Report No TT 109/99. ISBN 1 86845 490 8. Junio de 1999.

Metcalf y Eddy, Inc. *Ingeniería Aguas Residuales*. Mc Graw Hill 3ª edición. 1995.

Miles, S. L., Sinclair, R. G., Riley, M. R., Pepper I. L., Real time monitoring for pathogen in water, *Water Distribution System Analysis WDSA*. Tucson, Az. Septiembre de 2010.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., VanLiew, M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L., Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. *Transactions of the ASABE*. ISSN 00001-2351. Vol. 50(3) pp 885-900. 2007

*Multiphysics 3.5 User's Guide*, ComSol AB. Sweden, 2008.

Murray, S., McBean, E. y Ghazali M., Real-time water quality assessment with bayesian belief networks. *Water Distribution System Analysis WDSA*. Tucson, Az. Septiembre de 2010.

Pedley S., Bartram J., Rees G., Dufour A., Cotruvo J. A., "Pathogenic Mycobacteria in Water, a Guide to Public Health Consequences, Monitoring and Management", World Health Organization, International Water Assosiation IWA Publishing, 2004

Propato M., Uber J. G., "Vulnerability of Water Distribution Systems to Pathogen intrusion: How Effective is a Disinfectant Residual?" *Environmental Science & Technology*, Vol 38, No 13, p 3713-3722, 2004.

Rajani B., C. Zhan, S. Kuraoka, "Pipe - soil interaction analysis of jointed water mains", Canadian Geotechnical Journal, 33, 1996, 393-404.

Rajani B., Y. Kleiner, "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models", Urban Water, 3, 2001, 151-154.

Ramalingam, D., Lingireddy, S., Wood, D. J., Using the WCM for transient modeling of water distribution networks. Journal American Water Works Association (AWWA). 101:2. Pp 75 – 89. Febrero de 2009.

Ramos, H. Simulation and Control of Hydrotransients at Small Hydroelectric Power Plants. PhD thesis, Technical University of Lisbon, Portugal. 1995.

Ramos, H, Borga, A, Covas, D, Loureiro, D. Surge damping analysis in pipe systems: modelling and experiments. (Effet d'atténuation du coup de bélier dans les systèmes de conduits: modelation mathematique et experiences). Journal of Hydraulic Research, 42(4), 413-425, 2004.

Ramos H., Borga, A., Bergant, A., Covas, D., Almeida, A.B. – Analysis of Surge Effects in Pipe Systems by Air Release / Venting. Edicao especial (special issue in pressure transients) da revista Recursos Hidricos, APRH. ISSN Vol. 26, N. 2, pp. 45-55, 2005.

Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, Por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. , Viernes, 21 de febrero de 2003. BOE num. 45, página visitada en diciembre de 2007. [www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf](http://www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf)

Rodi, W. "Experience with Two-Layer Models Combining the k-e Model with a One-Equation Model Near the Wall", 29th Aerospace Sciences Meeting, January 7-10, Reno, NV, AIAA 91-0216. 1991.

Rojas R., Vigilancia de la calidad del agua para consumo humano, Organización Panamericana de la Salud, ISSN 1018-5119, HDT No. 99, Diciembre de 2005.

Royer D. M., White paper on improvement of structural integrity monitoring for drinking water mains, Office of Research and Developmentm U. S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/038, Marzo de 2005

Ruiz de Adana S. Manuel, Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al control de las mermas de vino en naves de crianza climatizadas. Tesis doctoral. ISBN 84-688-5941-9. Universidad de la Rioja, Servicio de publicaciones, 2004.

Salinas-Vázquez M., W. Vicente, E. Carrizosa, J. Osnaya, O. Ballesteros, "Estudio numérico y experimental de fugas en tubos elásticos", XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre de 2006.

Seica M.V., J.A. Packer, M.W.F. Grabinsky, B.J. Adams, "Evaluation of the properties of Toronto iron water mains and surrounding soil", Canadian Journal of Civil Engineering, 29, 2002, 222-237.

Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. 1994. "A New  $k-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows -- Model Development and Validation", NASA TM 106721.

Silva R.C.C., J.N.C. Guerreiro, A.F.D. Loula, "A study of pipe interacting corrosion defects using the FEM and neural networks", Advances in Engineering Software, 38, 2007, 868-875.

STAR-CCM+ 3.04.009, User's Guide, CD-Adapco, USA, 2008.

Symons, J. M., Bradley, L. C. Jr., Cleveland T. C., The drinking water dictionary. American Water works Association. ISBN 1-58321-013-X. pp. 506. Impreso en Estados Unidos, 2000.

USEPA, New or Repaired Water Mains, [en línea], preparado por la AWWA con la ayuda del Economic and Engineering Services, Inc., Agosto de 2002, [visitado desde 2006], [www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper\\_tcr\\_watermains.pdf](http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_watermains.pdf)

Van Lieverloo J. H., Mirjam Blokker E. J., Medema G., "Contamination during distribution", Microbial Risk Assessment: a scientific basis for managing drinking water safety from source to tap, Microrisk; [http://www.microrisk.com/uploads/microrisk\\_distribution\\_assessment.pdf](http://www.microrisk.com/uploads/microrisk_distribution_assessment.pdf), abril de 2006, 67pp.

Walski, T., Betz, W., Posluszny, E. T., Weir, M., Whitman, B. Understanding the hydraulics of water distributions system leaks. Proceedings of the ASCE World Water and Environmental Resources Congress, Salt Lake City. USA. June 27- July 1. 2004.

## BIBLIOGRAFÍA

Walski, T., Betzs, W., Posluszny, E.T., Weir, M., Whitman, B. "Modelling leakage reduction through pressure control. Journal AWWA. Abril 2006."

Whittle, A. J., Girod, L., Preis, A., Allen, M., Lim, H. B., Iqbal, M., Srirangarajan, S., Fu, C., Wong, K. J., Goldsmith, D., Waterwise@sg: A testbed for continuous monitoring of the water distribution system in Singapore. Water Distribution System Analysis, WDSA, Septiembre de 2010.

Wiggert DC, Hatfield FJ, Stuckenbruck S. Analysis of liquid and structural transients by the method of characteristics. ASME Journal of Fluids Engineering 1987; 109(2): 161-165.

Wilcox, D.C., Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, 2002.

Wylie, E. B. and Streeter, V. L. Fluid Transients in Systems, Prentice Hall. 1993.

Zloczower, N. y Charuv, K. K., Control of transient induced contaminant leakage and infiltration by implementation of air valves. Water Environment Federation. Collection Systems. 2009.

**PUBLICACIONES**



## **PUBLICACIONES VINCULADAS**

### **1. ARTÍCULOS EN REVISTAS**

Intrusion Problematic During Water Supply Systems Operation. Jesús Mora Rodríguez, P. Amparo López Jiménez, Helena Ramos. International Journal on Energy and Environment. Editorial International Energy and Environment Foundation. ISSN 2076-2895 (impreso), ISSN 2076-2909. Vol. 2, No. 3, pp. 391-400. 2011.

Computational Fluid Dynamics (CFD) Models in the Learning Process of Hydraulic Engineering. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Javier Martínez Solano, Joaquín Izquierdo. Computer Applications in Engineering Education. Editorial Wiley Periodicals, Inc. 14: 1A9, 2009. ISSN. 1061-3773. Vol. 18. No. 2, pp. 252-260. 2010.

Modelación Hidrodinámica del Fenómeno de Intrusión en Tubería de Abastecimiento. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Rafael Pérez García, Javier Martínez Solano. Ingeniería Hidráulica en México, ISSN 0186-4076. Editorial Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Vol. XXIII, No. 4, pp. 103-110. 2008.

Enviados en 2011:

CFD and Experimental Analysis of Pathogen Intrusion in Drinking Systems. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Helena Ramos. Water Resources Management.

Pathogen Intrusion Into Pipes: Risk of Drinking Water Contamination During Distribution. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez. Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA.

## 2. CONTRIBUCIONES A CONGRESOS

Modelling External Pathogen Intrusion in Pipes during Pressure Transients. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Vicente Fuertes-Miquel. IAHR, First European Congress. Edimburgo, Escocia. Mayo de 2010.

3D Computational Model of External Intrusion in a Pipe Across Defects. P. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Francisco García Mares, Vicente Fuertes-Miquel. IEMSS. Modelling for Enviroment's Sake. ISBN 978-88-903574-1-1. Ottawa, Canada. 2010.

Caudal de Intrusión en Tuberías a través de Diversos Fallos. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Javier Martínez Solano, Vicente Fuertes Miquel. XXIV Congreso Latinoamericano De Hidráulica. ISBN 978-9974-0-0690-4. Punta Del Este, Uruguay. 2010.

La Intrusión a través de Orificios en Tuberías, Modelo en 3D. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Francisco García Mares, Xitlali Delgado Galván. IX Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua y Saneamiento, Serea 2009. ISBN 978-84-89487-30-7, pp. 69-80. Valencia, España, 2009.

Estimación del Volumen de Intrusión en Régimen Transitorio en una Conducción. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Vicente Fuertes Miquel, Javier Martínez Solano. IX Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua y Saneamiento, Serea 2009. ISBN 978-84-89487-30-7. Valencia, España, 2009.

La Intrusión Patógena Simulada con un Modelo CFD. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Javier Martínez Solano, Gonzálo López Patiño. Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA 2009. ISBN 978-90-78046-09-7. Madrid, España, 2009.

CFD Model of Flow Intrusion through a Failure inside a Pipe Caused by Negative Pressure. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Francisco García Mares, Xitlali Delgado Galván. International Workshop on Environmental Hydraulics. Theoretical, Experimental and Computational Solutions, IWEH, 2009. ISBN 978-84-89487-28-4. Valencia, España, 2009.

Simulation of External Contamination into Water Distribution Systems through Defects in Pipes. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Francisco García Mares, Gonzalo López Patiño. European Geosciences Union, General Assembly 2009. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU 2009-3355-1. Vienna, Austria, 2009.

A Comparison among Turbulence Modelling Approaches in the Simulation of a Square Dead Zone. Carlo Gualtieri, Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment. ISBN 978-90-78046-08-0. Vancouver, Canada, 2009.

Modelación de la Intrusión Patógena En Redes De Agua Potable. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Vicente Fuertes Miquel, Gonzalo López Patiño. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. ISBN 978-958-719-075-5. Cartagena de Indias, Colombia, 2008.

Estudio Sobre la Modelación de Defectos en Tuberías. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Xitlali Delgado Galván, Carlos Alonso Guzmán. VIII Seminario Iberoamericano – SEREA. Influencia sobre el Cambio Climático, la Eficiencia Energética, de Operaciones y Sistemas de Seguridad en el Abastecimiento y el Drenaje Urbano. ISBN 978-989-95838-0-1. Lisboa, Portugal, 2008.

Modelación del Impacto del Fenómeno de la Intrusión Patógena sobre la Calidad del Agua de Distribución. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Javier Martínez Solano, Gonzalo López Patiño. VIII Seminario Iberoamericano – SEREA. Influencia sobre el Cambio Climático, la Eficiencia Energética, de Operaciones y Sistemas de Seguridad en el Abastecimiento y el Drenaje Urbano. ISBN 978-989-95838-0-1. Lisboa, Portugal, 2008.

Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Models in Hydraulic Engineering Teaching. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Vicente S. Fuertes Miquel, Joaquín Izquierdo. International Technology, Education and Development Conference. INTED, ISBN 978-84-612-0190-7. Valencia, España, 2008.

Modelling External Intrusion into Water Distribution Systems. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Vicente S. Fuertes Miquel, Javier Martínez Solano. International Congress on Environmental Modelling and Software. IEMSS, ISBN 978-84-7653-074-0. Barcelona, España, 2008.

Representación de la Intrusión en Redes de Distribución de Agua, Contrastando un Modelo Físico frente a uno Computacional. Jesús Mora Rodríguez, Amparo López Jiménez, Javier Martínez Solano, Lizbeth Salas Lechuga. VII Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, SEREA. ISBN 84-89-487-25-1. Morelia, México, 2007.

Contaminación de los Sistemas de Distribución de Agua como Consecuencia de la Intrusión Patógena. Amparo López Jiménez, Jesús Mora Rodríguez, Lizbeth Salas Lechuga, Javier Martínez Solano. VII Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, SEREA. ISBN 84-89-487-25-1. Morelia, México, 2007.

La Necesidad de un Adecuado Tratamiento de los Datos en la Modelación Hidrodinámica. Caso de Estudio: Análisis Estadístico de Mediciones en Modelos Físicos. Amparo López Jiménez, Manuel Herrera-Fernández, Jesús Mora Rodríguez, Francisco García-Mares. VII Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, SEREA. ISBN 84-89-487-25-1. Morelia, México, 2007.

**ANEXOS**



# ANEXOS

## ANEXO 1. Resumen de datos de los estudios para fugas

### Características de las fugas (parte 1)

NF	material	D (mm)	clase	Espesor (mm)	forma falla	L (mm)	Nota	Espesor
1	asbesto cemento	100		12	grieta longitudinal en y			
2	asbesto cemento	100		12	grieta longitudinal en y			
3	asbesto cemento	100		12	grieta longitudinal en y			
4	acero				alto grado de corrosión			
5	acero				alto grado de corrosión			
6	acero				alto grado de corrosión			
7	acero				agujero redondo			
8	upvc	110	6	3	agujero redondo	12	mm (D)	
9	upvc	110	6	3	grieta circunferencial	90	mm	1
10	upvc	110	6	3	grieta circunferencial	170	mm	1
11	upvc	110	6	3	grieta circunferencial	270	mm	1
12	upvc	110	6	3	grieta longitudinal	86	mm	1
13	upvc	110	6	3	grieta longitudinal	100	mm	1
14	upvc	110	6	3	grieta longitudinal	150	mm	1
15	metal				agujero circular			
16	pvc				agujero circular			
17	polietileno				agujero circular			
18	asbesto cemento				agujero circular			
19	pvc				corte longitudinal		LW BAJO	
20	pvc				corte longitudinal		LW 500	
21	asbesto cemento							
22	pvc	50,8	21 RDE	2,42	corte longitudinal	50	mm	
23	pvc	50,8	22 RDE	2,42	corte longitudinal	70	mm	
24	pvc	50,8	23 RDE	2,42	corte longitudinal	90	mm	
25	pvc	50,8	24 RDE	2,42	corte longitudinal	100	mm	
26	pvc	50,8	25 RDE	2,42	corte longitudinal	130	mm	
27	pvc	50,8	26 RDE	2,42	corte longitudinal	160	mm	
28	pvc	50,8	27 RDE	2,42	corte longitudinal	167	mm	
29	pvc	63,5	28 RDE	3,02	corte longitudinal	60	mm	
30	pvc	63,5	29 RDE	3,02	corte longitudinal	90	mm	
31	pvc	63,5	30 RDE	3,02	corte longitudinal	120	mm	
32	pvc	63,5	31 RDE	3,02	corte longitudinal	150	mm	
33	pvc	76,2	32 RDE	3,63	corte longitudinal	80	mm	
34	pvc	76,2	33 RDE	3,63	corte longitudinal	110	mm	
35	pvc	76,2	34 RDE	3,63	corte longitudinal	150	mm	
36	pvc	76,2	35 RDE	3,63	corte longitudinal	221	mm	
37	pvc	76,2	36 RDE	3,63	corte longitudinal	230	mm	
38	pvc	101,6	37 RDE	4,84	corte longitudinal	60	mm	

39	pvc	101,6	38 RDE	4,84	corte longitudinal	90	mm	
40	pvc	101,6	39 RDE	4,84	corte longitudinal	131	mm	
41	pvc	101,6	40 RDE	4,84	corte longitudinal	170	mm	
42	pvc	19,5						< 1 mm
<b>POR RANGOS</b>								
43	metal (rango 1 min)	60			agujero taladrado	1	mm (D)	
44	metal (rango 1 max)	180			agujero taladrado	5	mm (D)	
45	metal (rango 2 min)				agujero por corrosión, rajadura en acero galvanizado, cobre o plomo			
46	plástico (rango 2 max)							
47	polietileno (rango 3 min)	22	D		rajadura	10	mm	
48	polietileno (rango 3 max)	22	D		rajadura	20	mm	
49	cobre	15			orificio redondo	1	mm (D)	
50	cobre	15			orificio redondo	1	mm (D)	
51	cobre	15			orificio redondo	1	mm (D)	
52	cobre	15			orificio redondo	1	mm (D)	
53	cobre	15			orificio redondo	1	mm (D)	

### Características de las fugas (parte 2)

NF	Q min	Q max	U	P min	P max	U	Cd	N	R <sup>2</sup>	Re	descarga
1	1,05	2,95	l/s	2,2	6,4	m	0,5372	0,9058	0,9983	5000	atmosfera
2	1,22	2,9	l/s	4	12,1	m	0,3928	0,7876	0,9579	5000	atmosfera
3	1,2	2,8	l/s	1,9	3,9	m	0,7017	1,0413	0,9811	5000	atmosfera
4								1,96			atmosfera
5								2,3			atmosfera
6								0,67			atmosfera
7								0,518			atmosfera
8								0,524		10000	atmosfera
9								0,41		10000	atmosfera
10								0,5		10000	atmosfera
11								0,53		10000	atmosfera
12								1,51		10000	atmosfera
13								1,46		10000	atmosfera
14								1,85		10000	atmosfera
15								0,5	near	> 4000	
16								0,5	near	> 4000	
17								0,5	likely to be near	> 4000	
18								0,5	likely to be near	> 4000	
19								0,5			
20								2			
21								0,8-1,0			
22							11,5	1,49	0,995		
23							17	1,55	0,999		
24							22,26	1,6	0,999		
25							27,73	1,7	0,999		
26							61,06	1,67	0,998		

27							65,48	1,86	0,999	
28							59,65	1,94	0,999	
29							10,57	1,4	0,998	
30							24,34	1,43	0,998	
31							30,46	1,71	0,998	
32							37,16	1,82	0,998	
33							16,12	1,56	0,997	
34							32,27	1,59	0,999	
35							49,26	1,79	0,999	
36							90,66	1,93	0,998	
37							86,8	1,01	0,999	
38							1,86	1,88	0,997	
39							11,55	1,65	0,999	
40							35,78	1,62	0,999	
41							49,26	1,79	0,997	
42			l/s			kPa	0,0007	1,36		
43	24	900	l/h	2	60	m		0,36		arena
44	24	900	l/h	2	60	m		0,7		agua
		1500	l/h					0,51		
		1500	l/h					0,54		
45	0	4000	l/h	10	75	m		0,5		
46	0	4000	l/h	10	75	m		1,5		
47	0	700	l/h	10	100	m		1,39-1,72		
48	0	5000	l/h	10	100	m		1,23-1,97		
49							0,37			200
50							0,78			3000
51							0,7			3000
52							0,85			8000
53							0,75			8000-17000



## ANEXO 2. Mediciones de los fallos longitudinales y transversales

Mediciones con el juego de galgas para el fallo longitudinal de 44,5mm

Lectura	Longitud (mm)	Ancho (mm)
1	44,5	0,05
2	41,0	0,10
3	34,5	0,15

Mediciones con vernier para el fallo longitudinal de 4,0mm

Lectura	Longitud (mm)	Ancho (mm)
1	4,0	0,28

Mediciones con el juego de galgas para el fallo transversal de 48,5mm

Lectura	Longitud (mm)	Ancho (mm)
1	48,3	0,05
2	37,5	0,10
3	34,5	0,15
4	26,6	0,20
5	20,3	0,25
6	15,7	0,30

Mediciones con vernier para el fallo transversal de 3,1mm

Lectura	Longitud (mm)	Ancho (mm)
1	3,1	0,28
2	1,7	0,48



**ANEXO 3. Resultados del modelo físico de intrusión en estado permanente. Fallos circulares**

**Diámetro 1,0mm**

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	1791,72	-0,104	480,6	1706	3,56E-06
1.2	1788,76	-0,103	480,8	1806	3,76E-06
1.3	1795,14	-0,103	480,8	1736	3,62E-06
1.4	1791,76	-0,103	480,9	1782	3,71E-06
1.5	1789,32	-0,103	480,7	1762	3,67E-06
1.6	1791,82	-0,102	480,7	1753	3,65E-06
1.7	1792,67	-0,102	480,9	1792	3,73E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1793,62	-0,205	480,7	2373	4,95E-06
2.2	1748,74	-0,204	481,6	2335	4,86E-06
2.3	1746,01	-0,203	480,7	2359	4,92E-06
2.4	1742,95	-0,203	480,7	2303	4,80E-06
2.5	1744,53	-0,204	481,1	2363	4,92E-06
2.6	1745,38	-0,203	480,9	2306	4,81E-06
2.7	1751,67	-0,203	482,0	2372	4,93E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	1733,96	-0,293	481,4	2690	5,59E-06
3.2	1736,41	-0,291	480,8	2740	5,70E-06
3.3	1735,48	-0,291	481,0	2663	5,54E-06
3.4	1741,09	-0,292	481,4	2741	5,70E-06
3.5	1743,41	-0,289	480,7	2662	5,54E-06
3.6	1744,21	-0,289	480,9	2710	5,64E-06
3.7	1737,21	-0,289	480,2	2661	5,55E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	1652,55	-0,388	480,1	3015	6,29E-06
4.2	1650,71	-0,388	480,9	3085	6,43E-06
4.3	1639,98	-0,382	481,0	3037	6,32E-06
4.4	1646,33	-0,382	481,2	3090	6,43E-06
4.5	1640,07	-0,382	480,9	3031	6,31E-06
4.6	1640,14	-0,382	481,3	3057	6,36E-06
4.7	1639,56	-0,379	481,0	3065	6,38E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
5.1	1565,99	-0,477	481,0	3459	7,20E-06
5.2	1559,94	-0,473	480,6	3431	7,15E-06
5.3	1564,22	-0,477	609,5	4310	7,08E-06
5.4	1575,13	-0,479	480,8	3473	7,24E-06
5.5	1577,17	-0,480	481,0	3401	7,09E-06
5.6	1577,90	-0,481	480,9	3425	7,14E-06
5.7	1575,45	-0,483	484,1	3425	7,09E-06

### Diámetro 1,5mm

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	2299,59	-0,070	35,09	240,1	6,855E-06
1.2	2299,59	-0,070	35,12	238,8	6,812E-06
1.3	2299,58	-0,069	35,05	240,6	6,877E-06
1.4	2299,57	-0,069	35,05	237,9	6,800E-06
1.5	2299,58	-0,069	35,10	238,7	6,813E-06
1.6	2299,59	-0,070	35,19	241,9	6,887E-06
1.7	2272,55	-0,070	35,01	237,2	6,787E-06
1.8	2327,30	-0,069	35,03	238,9	6,832E-06
1.9	2272,54	-0,069	35,00	239,1	6,844E-06
1.10	2327,25	-0,070	35,10	240,4	6,861E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	2926,72	-0,095	28,13	228,3	8,131E-06
2.2	2926,70	-0,096	29,06	232,7	8,022E-06
2.3	2926,72	-0,097	30,19	243,2	8,070E-06
2.4	2926,74	-0,097	30,11	244,3	8,128E-06
2.5	2926,71	-0,095	30,08	243,0	8,093E-06
2.6	2926,74	-0,095	30,12	242,0	8,049E-06
2.7	2926,74	-0,096	30,04	238,2	7,944E-06
2.8	2926,73	-0,095	30,15	242,7	8,064E-06
2.9	2926,69	-0,097	30,05	240,8	8,028E-06
2.10	2926,71	-0,096	30,18	243,1	8,070E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	2195,13	-0,192	25,08	239,8	9,579E-06
3.2	2195,10	-0,191	25,25	242,3	9,613E-06
3.3	2220,36	-0,191	25,03	238,7	9,554E-06
3.4	2195,11	-0,191	25,06	238,9	9,550E-06
3.5	2195,10	-0,192	25,09	240,6	9,607E-06
3.6	2195,06	-0,190	25,19	239,6	9,529E-06
3.7	2195,12	-0,193	25,07	239,9	9,586E-06
3.8	2220,37	-0,193	25,01	238,7	9,561E-06
3.9	2170,48	-0,191	25,23	242,2	9,617E-06
3.10	2195,14	-0,193	25,09	242,5	9,683E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	2146,21	-0,246	22,89	240,5	1,053E-05
4.2	2194,97	-0,245	23,05	243,1	1,057E-05
4.3	2146,22	-0,246	23,08	243,1	1,055E-05
4.4	2146,22	-0,244	23,17	244,1	1,055E-05
4.5	2146,19	-0,246	23,01	242,6	1,056E-05
4.6	2170,30	-0,247	22,92	241,6	1,056E-05
4.7	2170,29	-0,247	23,14	244,6	1,059E-05
4.8	2146,21	-0,246	23,19	244,6	1,057E-05
4.9	2194,96	-0,246	23,08	243,3	1,056E-05
4.10	2146,20	-0,245	22,75	240,5	1,059E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
5.1	2122,54	-0,306	20,08	232,1	1,158E-05
5.2	2146,11	-0,305	20,07	230,7	1,152E-05
5.3	2146,12	-0,306	20,07	232,3	1,160E-05
5.4	2146,13	-0,306	20,26	233,0	1,152E-05
5.5	2146,13	-0,306	20,07	233,6	1,166E-05
5.6	2122,53	-0,308	20,03	232,6	1,163E-05
5.7	2122,54	-0,307	20,04	231,6	1,158E-05
5.8	2146,10	-0,307	20,09	230,0	1,147E-05
5.9	2122,51	-0,308	19,99	230,6	1,156E-05
5.10	2122,57	-0,308	20,12	233,5	1,163E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
6.1	2146,08	-0,423	18,20	240,4	1,323E-05
6.2	2146,09	-0,422	17,89	236,2	1,323E-05
6.3	2099,44	-0,422	18,09	240,7	1,333E-05
6.4	2146,08	-0,422	18,22	240,2	1,321E-05
6.5	2099,44	-0,423	18,08	240,1	1,330E-05
6.6	2122,51	-0,421	18,06	241,7	1,341E-05
6.7	2122,49	-0,421	18,07	239,1	1,326E-05
6.8	2122,49	-0,421	18,09	239,9	1,329E-05
6.9	2146,08	-0,422	18,16	241,4	1,332E-05
6.10	2122,51	-0,423	18,04	238,4	1,324E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
7.1	2099,39	-0,527	16,05	235,3	1,469E-05
7.2	2099,40	-0,526	16,10	235,7	1,467E-05
7.3	2076,84	-0,527	15,96	234,5	1,472E-05
7.4	2099,39	-0,526	15,95	237,1	1,489E-05
7.5	2076,83	-0,526	16,03	236,0	1,475E-05
7.6	2099,39	-0,526	16,07	236,7	1,476E-05

7.7	2099,38	-0,525	15,96	236,1	1,482E-05
7.8	2076,83	-0,525	16,17	237,7	1,473E-05
7.9	2099,41	-0,523	16,10	237,6	1,478E-05
7.10	2099,39	-0,525	16,09	236,5	1,473E-05

### Diámetro 4,0mm

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	2055,26	-0,064	90,30	4072	4,518E-05
1.2	1991,71	-0,065	90,02	4090	4,552E-05
1.3	2055,25	-0,064	90,17	4089	4,543E-05
1.4	1991,70	-0,064	89,93	4086	4,552E-05
1.5	2033,61	-0,064	90,24	4092	4,543E-05
1.6	2033,62	-0,064	89,97	4085	4,549E-05
1.7	2012,44	-0,064	90,36	4079	4,522E-05
1.8	2033,64	-0,064	89,99	4068	4,529E-05
1.9	1991,72	-0,064	91,18	4124	4,531E-05
1.10	2012,44	-0,064	90,56	4096	4,531E-05
1.11	2033,63	-0,064	90,19	4080	4,532E-05
1.12	2012,46	-0,065	90,09	4080	4,537E-05
1.13	2033,67	-0,064	89,90	4068	4,533E-05
1.14	1991,74	-0,064	90,03	4069	4,528E-05
1.15	2033,66	-0,065	90,00	4070	4,530E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1991,68	-0,118	80,03	4330	5,420E-05
2.2	2033,61	-0,118	80,01	4331	5,423E-05
2.3	1991,69	-0,119	80,03	4323	5,411E-05
2.4	2012,44	-0,119	79,94	4315	5,408E-05
2.5	2012,44	-0,119	80,07	4332	5,420E-05
2.6	1971,38	-0,119	80,23	4351	5,433E-05
2.7	2033,62	-0,119	80,00	4339	5,434E-05
2.8	1991,69	-0,120	80,17	4345	5,430E-05
2.9	2012,44	-0,119	80,15	4332	5,415E-05
2.10	2012,47	-0,119	80,03	4340	5,433E-05
2.11	1971,40	-0,119	80,02	4349	5,445E-05
2.12	2012,45	-0,118	79,97	4330	5,424E-05
2.13	1971,37	-0,119	79,92	4333	5,431E-05
2.14	1991,72	-0,119	79,97	4347	5,446E-05
2.15	2012,44	-0,118	80,06	4352	5,446E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	2012,58	-0,181	70,07	4412	6,308E-05
3.2	1991,81	-0,179	69,97	4407	6,310E-05
3.3	1971,49	-0,180	70,01	4408	6,308E-05

3.4	2012,54	-0,179	70,05	4408	6,304E-05
3.5	1971,50	-0,178	70,08	4405	6,297E-05
3.6	2012,56	-0,179	70,12	4426	6,323E-05
3.7	2012,56	-0,179	70,04	4406	6,302E-05
3.8	1971,50	-0,179	69,89	4385	6,285E-05
3.9	2012,56	-0,179	70,09	4390	6,275E-05
3.10	1971,49	-0,179	70,16	4401	6,284E-05
3.11	2012,58	-0,179	70,01	4401	6,298E-05
3.12	2012,58	-0,180	69,98	4395	6,292E-05
3.13	1951,61	-0,178	70,03	4394	6,286E-05
3.14	2012,58	-0,178	70,13	4411	6,301E-05
3.15	1971,52	-0,179	70,27	4423	6,306E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	1932,11	-0,251	59,97	4325	7,225E-05
4.2	1971,56	-0,252	59,99	4323	7,219E-05
4.3	1951,62	-0,253	60,07	4336	7,231E-05
4.4	1951,63	-0,251	59,89	4313	7,215E-05
4.5	1971,52	-0,253	59,99	4345	7,256E-05
4.6	1951,62	-0,253	59,95	4331	7,237E-05
4.7	1991,85	-0,252	60,02	4342	7,247E-05
4.8	1932,10	-0,251	59,94	4337	7,249E-05
4.9	1971,52	-0,252	60,07	4350	7,255E-05
4.10	1991,83	-0,251	59,97	4329	7,232E-05
4.11	1932,11	-0,254	59,87	4343	7,267E-05
4.12	1991,87	-0,252	59,10	4284	7,262E-05
4.13	1951,62	-0,252	59,99	4335	7,239E-05
4.14	1951,64	-0,251	60,08	4351	7,255E-05
4.15	1971,55	-0,252	60,03	4345	7,251E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
5.1	1951,69	-0,296	55,13	4237	7,699E-05
5.2	1932,15	-0,296	59,86	4605	7,707E-05
5.3	1971,59	-0,295	54,96	4227	7,705E-05
5.4	1913,03	-0,296	55,15	4241	7,704E-05
5.5	1951,67	-0,295	55,18	4239	7,696E-05
5.6	1971,56	-0,295	55,10	4239	7,707E-05
5.7	1932,15	-0,295	55,18	4241	7,700E-05
5.8	1971,60	-0,294	55,06	4236	7,707E-05
5.9	1932,15	-0,295	55,05	4242	7,720E-05
5.10	1951,67	-0,294	55,24	4260	7,726E-05
5.11	1971,59	-0,296	54,99	4243	7,730E-05
5.12	1932,17	-0,295	55,13	4248	7,719E-05
5.13	1971,58	-0,294	54,98	4233	7,713E-05
5.14	1932,17	-0,296	54,88	4233	7,727E-05
5.15	1951,66	-0,295	54,99	4234	7,713E-05

**Diámetro 5,0mm**

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	2885,01	-0,211	360,10	34520	9,586E-05
1.2	2928,79	-0,209	390,48	37260	9,542E-05
1.3	2928,75	-0,214	390,11	37860	9,705E-05
1.4	2884,97	-0,194	360,29	34975	9,707E-05
1.5	2928,71	-0,207	348,23	33250	9,548E-05
1.6	2884,83	-0,200	390,14	37610	9,640E-05
1.7	2928,59	-0,216	390,06	37235	9,546E-05
1.8	2884,85	-0,208	389,10	37730	9,697E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	2842,39	-0,373	300,45	37265	1,240E-04
2.2	2830,96	-0,369	300,37	37622	1,253E-04
2.3	2884,99	-0,372	302,33	37140	1,228E-04
2.4	2842,54	-0,371	291,01	34780	1,195E-04
2.5	2801,29	-0,369	303,10	37190	1,227E-04
2.6	2801,38	-0,361	304,04	37033	1,218E-04
2.7	2842,77	-0,374	304,93	37110	1,217E-04
2.8	2801,38	-0,366	304,14	37040	1,218E-04

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	2273,92	-0,554	244,58	35883	1,467E-04
3.2	2684,65	-0,523	243,47	35820	1,471E-04
3.3	2684,61	-0,519	244,11	36895	1,511E-04
3.4	2722,40	-0,526	241,78	35400	1,464E-04
3.5	2722,08	-0,531	244,21	35460	1,452E-04
3.6	2760,97	-0,531	257,89	37438	1,452E-04
3.7	2684,27	-0,530	244,51	34671	1,418E-04
3.8	2684,70	-0,516	243,54	35375	1,453E-04

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	2510,53	-0,685	258,00	42196	1,636E-04
4.2	2510,03	-0,665	242,67	40064	1,651E-04
4.3	2509,97	-0,663	241,53	39889	1,652E-04
4.4	2510,12	-0,674	242,25	39167	1,617E-04
4.5	2510,16	-0,661	240,58	33705	1,635E-04
4.6	2510,21	-0,663	240,20	38999	1,624E-04
4.7	2510,43	-0,670	241,39	39530	1,638E-04
4.8	2478,20	-0,671	244,23	39840	1,631E-04

**ANEXO 4. Resultados del modelo físico de intrusión en estado permanente. Fallos longitudinales y transversales.**

**Longitudinal 4,0mm**

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	1934,94	-0,196	480,39	3821	7,970E-06
1.2	1861,42	-0,196	480,44	3780	7,884E-06
1.3	1858,83	-0,197	480,02	3741	7,810E-06
1.4	1863,57	-0,197	480,33	3648	7,611E-06
1.5	1867,91	-0,198	480,27	3533	7,372E-06
1.6	1872,45	-0,197	480,15	3498	7,302E-06
1.7	1865,27	-0,197	480,24	3592	7,497E-06
1.8	1862,61	-0,196	480,34	3748	7,821E-06
1.9	1867,08	-0,197	480,02	3732	7,793E-06
1.10	1869,02	-0,197	482,38	3763	7,820E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1834,59	-0,356	480,29	4861	1,014E-05
2.2	1830,29	-0,352	480,33	4834	1,008E-05
2.3	1823,44	-0,352	480,57	4614	9,619E-06
2.4	1825,23	-0,351	480,83	4470	9,314E-06
2.5	1827,09	-0,351	480,38	4428	9,236E-06
2.6	1826,16	-0,350	496,62	4581	9,243E-06
2.7	1825,43	-0,351	480,31	4419	9,219E-06
2.8	1827,23	-0,350	480,57	4396	9,167E-06
2.9	1825,56	-0,352	480,41	4372	9,120E-06
2.10	1829,96	-0,353	480,31	4010	8,367E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	1796,95	-0,467	360,51	4117	1,145E-05
3.2	1796,94	-0,469	360,40	4107	1,143E-05
3.3	1796,10	-0,468	360,41	4118	1,146E-05
3.4	1794,48	-0,467	360,40	4099	1,140E-05
3.5	1798,64	-0,467	360,31	4067	1,132E-05
3.6	1793,68	-0,468	360,51	4092	1,138E-05
3.7	1796,27	-0,468	350,68	3966	1,134E-05
3.8	1793,64	-0,467	360,58	4079	1,134E-05
3.9	1791,17	-0,466	360,37	4074	1,134E-05
3.10	1791,20	-0,466	360,39	4067	1,132E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	1769,93	-0,555	270,43	3330	1,235E-05
4.2	1770,77	-0,556	270,45	3343	1,240E-05
4.3	1769,98	-0,556	270,58	3375	1,251E-05
4.4	1775,70	-0,555	270,31	3370	1,251E-05
4.5	1773,31	-0,557	270,41	3379	1,254E-05
4.6	1768,35	-0,555	270,38	3378	1,253E-05
4.7	1770,07	-0,555	270,47	3375	1,252E-05
4.8	1771,66	-0,555	270,54	3375	1,252E-05
4.9	1768,42	-0,554	270,38	3368	1,250E-05
4.10	1770,90	-0,553	270,41	3389	1,258E-05

### Longitudinal 44,5mm

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	1853,15	-0,111	723,21	752	1,040E-06
1.2	1855,87	-0,111	600,85	539	8,975E-07
1.3	1855,91	-0,110	607,99	480	7,899E-07
1.4	1851,49	-0,108	632,53	491	7,767E-07
1.5	1853,31	-0,109	608,63	532	8,746E-07
1.6	1851,46	-0,109	633,60	511	8,070E-07
1.7	1853,60	-0,107	600,91	669	1,114E-06
1.8	1859,03	-0,106	600,84	610	1,016E-06
1.9	1849,37	-0,106	600,74	653	1,088E-06
1.10	1855,60	-0,106	600,73	610	1,016E-06
1.11	1853,77	-0,106	601,05	660	1,099E-06
1.12	1856,51	-0,106	600,89	610	1,016E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1853,07	-0,155	600,83	743	1,238E-06
2.2	1841,00	-0,155	603,69	684	1,134E-06
2.3	1840,16	-0,158	812,05	1012	1,247E-06
2.4	1840,95	-0,157	817,12	1066	1,305E-06
2.5	1849,93	-0,158	600,73	811	1,351E-06
2.6	1849,86	-0,157	1180,81	1435	1,216E-06
2.7	1852,54	-0,157	600,66	748	1,247E-06
2.8	1868,27	-0,158	606,79	590	9,734E-07
2.9	1850,20	-0,154	600,97	604	1,006E-06
2.10	1844,89	-0,153	607,10	552	9,098E-07
2.11	1844,01	-0,153	600,70	577	9,609E-07
2.12	1849,26	-0,152	614,97	529	8,608E-07

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	1842,08	-0,205	600,50	833	1,389E-06
3.2	1841,13	-0,203	602,37	777	1,292E-06
3.3	1834,96	-0,201	600,75	819	1,365E-06
3.4	1833,40	-0,203	602,02	766	1,274E-06
3.5	1828,18	-0,204	600,64	809	1,349E-06
3.6	1832,75	-0,201	765,27	991	1,298E-06
3.7	1842,40	-0,202	600,63	737	1,230E-06
3.8	1838,98	-0,201	600,78	794	1,324E-06
3.9	1836,33	-0,201	601,03	748	1,247E-06
3.10	1837,20	-0,200	623,42	827	1,330E-06
3.11	1831,18	-0,199	600,77	745	1,243E-06
3.12	1832,90	-0,201	726,45	942	1,300E-06

### Transversal 3,1mm

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	1841,84	-0,200	480,53	2706	5,646E-06
1.2	1845,40	-0,201	480,44	2676	5,585E-06
1.3	1845,38	-0,201	480,55	2720	5,676E-06
1.4	1844,54	-0,201	480,38	2661	5,555E-06
1.5	1846,28	-0,200	480,59	2691	5,616E-06
1.6	1842,79	-0,200	480,47	2660	5,553E-06
1.7	1845,48	-0,200	480,44	2686	5,608E-06
1.8	1844,64	-0,200	480,38	2616	5,462E-06
1.9	1844,63	-0,201	480,50	2669	5,572E-06
1.10	1841,96	-0,200	480,53	2589	5,405E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1824,87	-0,286	480,40	3011	6,281E-06
2.2	1823,20	-0,285	480,47	3069	6,402E-06
2.3	1819,77	-0,285	480,43	3015	6,290E-06
2.4	1821,50	-0,285	480,37	3067	6,399E-06
2.5	1823,29	-0,285	550,95	3472	6,317E-06
2.6	1823,36	-0,284	481,58	3093	6,438E-06
2.7	1821,66	-0,284	512,37	3219	6,298E-06
2.8	1822,59	-0,284	480,34	3081	6,430E-06
2.9	1819,98	-0,284	480,49	3011	6,283E-06
2.10	1817,49	-0,284	480,61	3068	6,400E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	1781,59	-0,395	480,42	3746	7,821E-06
3.2	1783,31	-0,393	480,65	3774	7,876E-06
3.3	1785,78	-0,394	480,96	3743	7,806E-06

3.4	1784,93	-0,395	480,34	3876	8,095E-06
3.5	1785,02	-0,393	480,37	3802	7,940E-06
3.6	1783,15	-0,394	480,40	3867	8,076E-06
3.7	1784,23	-0,395	480,57	3807	7,949E-06
3.8	1785,30	-0,394	480,59	3866	8,072E-06
3.9	1786,61	-0,395	480,39	3822	7,983E-06
3.10	1790,92	-0,395	480,31	3841	8,025E-06

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	1768,56	-0,490	420,63	3827	9,116E-06
4.2	1769,40	-0,489	420,29	3844	9,164E-06
4.3	1771,08	-0,488	420,37	3791	9,037E-06
4.4	1762,28	-0,487	420,60	3861	9,199E-06
4.5	1766,31	-0,488	420,57	3801	9,057E-06
4.6	1763,96	-0,487	420,45	3838	9,148E-06
4.7	1766,63	-0,485	420,51	3820	9,105E-06

Se hicieron 7 lecturas en este escenario

### Transversal 48,5mm

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
1.1	1887,68	-0,053	50,41	3429	6,822E-05
1.2	1878,45	-0,052	50,54	3432	6,811E-05
1.3	1875,79	-0,052	50,37	3396	6,763E-05
1.4	1877,48	-0,052	50,49	3419	6,793E-05
1.5	1876,70	-0,052	50,63	3397	6,730E-05
1.6	1875,71	-0,052	50,40	3385	6,737E-05
1.7	1872,15	-0,052	50,50	3383	6,720E-05
1.8	1870,37	-0,052	50,63	3342	6,622E-05
1.9	1868,49	-0,052	50,93	3388	6,674E-05
1.10	1875,67	-0,052	52,21	3453	6,635E-05

Se hicieron 10 lecturas en este escenario

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
2.1	1883,63	-0,103	40,52	3403	8,418E-05
2.2	1872,67	-0,101	40,36	3371	8,372E-05
2.3	1869,08	-0,101	47,05	3927	8,366E-05
2.4	1870,72	-0,101	40,37	3368	8,363E-05
2.5	1871,80	-0,101	40,49	3364	8,329E-05
2.6	1874,50	-0,101	40,60	3377	8,339E-05
2.7	1870,94	-0,101	42,73	3565	8,364E-05
2.8	1870,89	-0,100	40,76	3367	8,282E-05
2.9	1868,32	-0,100	40,44	3354	8,316E-05
2.10	1872,79	-0,100	40,64	3359	8,287E-05
2.11	1869,23	-0,100	40,57	3367	8,321E-05
2.12	1868,25	-0,100	40,42	3374	8,370E-05

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
3.1	1864,84	-0,146	35,33	3686	1,046E-04
3.2	1861,20	-0,145	35,02	3647	1,044E-04
3.3	1857,62	-0,146	35,20	3618	1,031E-04
3.4	1859,52	-0,146	34,94	3580	1,028E-04
3.5	1851,47	-0,145	35,09	3578	1,023E-04
3.6	1855,83	-0,146	35,52	3618	1,022E-04
3.7	1855,01	-0,146	40,63	4130	1,020E-04
3.8	1856,74	-0,146	35,67	3600	1,012E-04
3.9	1856,79	-0,146	35,77	3615	1,014E-04
3.10	1855,92	-0,146	35,49	3592	1,015E-04
3.11	1857,63	-0,147	35,67	3590	1,010E-04
3.12	1857,70	-0,145	40,75	4082	1,005E-04

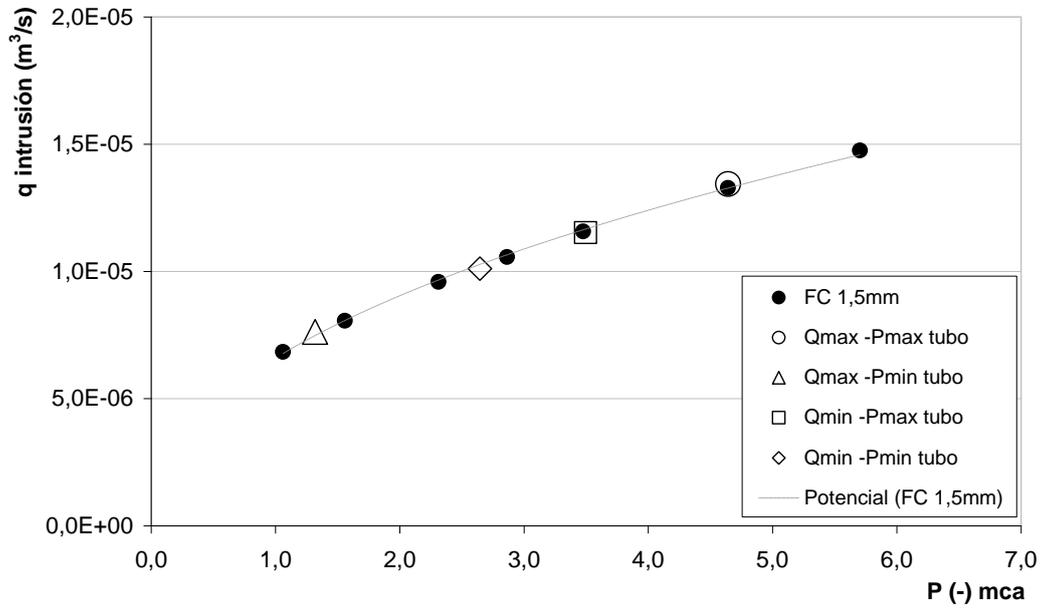
lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
4.1	1843,59	-0,197	30,58	3457	1,134E-04
4.2	1840,07	-0,197	30,49	3440	1,132E-04
4.3	1844,46	-0,197	30,66	3462	1,133E-04
4.4	1842,75	-0,197	35,83	4046	1,133E-04
4.5	1844,53	-0,197	30,66	3451	1,129E-04
4.6	1840,98	-0,196	30,87	3447	1,120E-04
4.7	1841,85	-0,197	30,58	3461	1,136E-04
4.8	1843,66	-0,197	30,46	3464	1,141E-04
4.9	1843,67	-0,197	30,63	3456	1,132E-04
4.10	1843,62	-0,197	30,78	3517	1,147E-04
4.11	1840,12	-0,196	30,32	3425	1,134E-04
4.12	1844,44	-0,196	30,61	3470	1,138E-04

lectura	Q tubo (l/h)	P tubo (bar)	t (s)	peso intr (gr)	Q intr (m <sup>3</sup> /s)
5.1	1833,23	-0,243	30,67	3889	1,273E-04
5.2	1831,46	-0,242	30,61	3859	1,265E-04
5.3	1831,50	-0,243	30,71	3892	1,272E-04
5.4	1830,56	-0,243	30,87	3896	1,267E-04
5.5	1827,96	-0,243	30,73	3886	1,269E-04
5.6	1828,90	-0,243	30,93	3882	1,260E-04
5.7	1832,35	-0,244	30,68	3899	1,276E-04
5.8	1827,11	-0,244	30,74	3883	1,268E-04
5.9	1830,63	-0,244	30,73	3907	1,276E-04
5.10	1828,85	-0,244	30,56	3896	1,280E-04
5.11	1828,88	-0,244	30,66	3960	1,297E-04
5.12	1828,05	-0,244	30,72	3887	1,270E-04

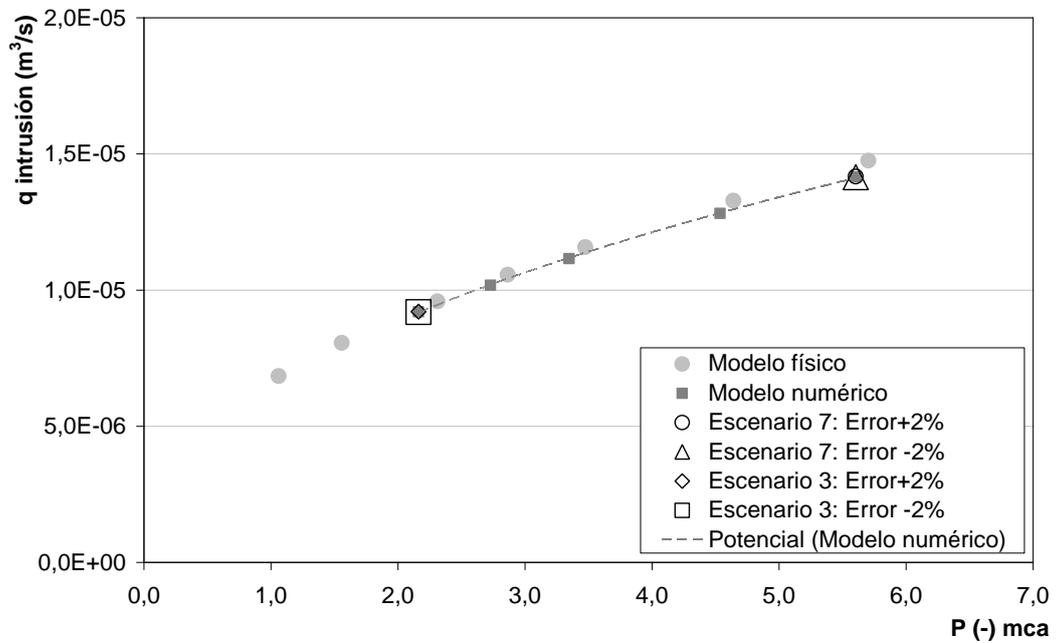


### ANEXO 5. Validación del modelo físico con el fallo circular de 1,5mm.

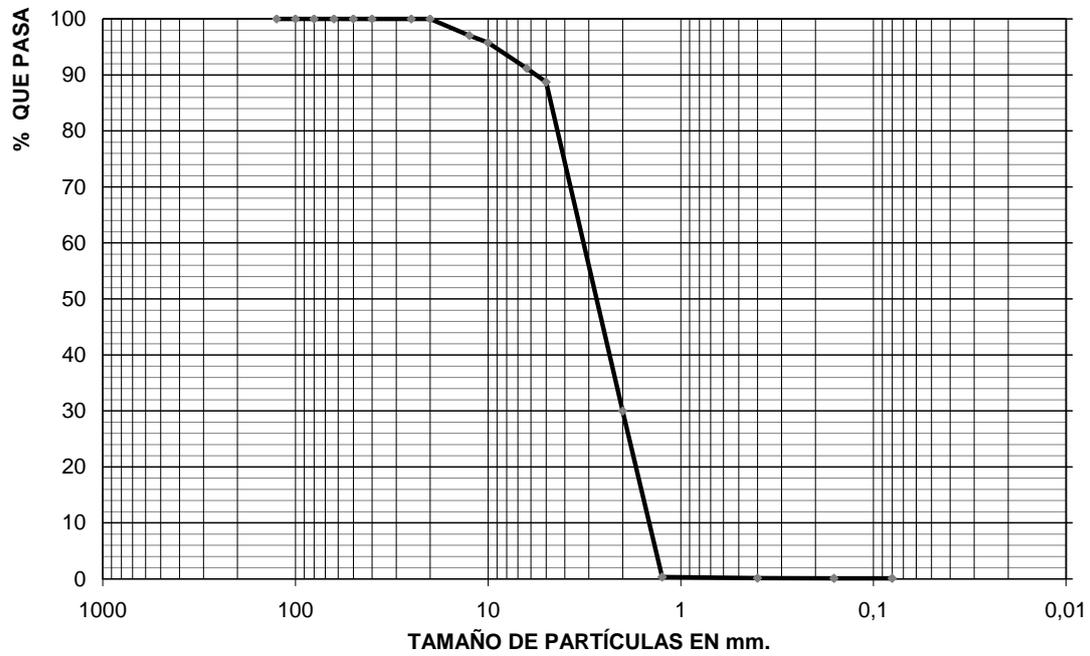
#### Variando caudal y presión en la conducción



#### Validación respecto al error del contador





**ANEXO 6. Granulometría del material poroso.****a) Arena****b) Zahorra**