



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Máster Oficial en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente**

**Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente  
Universidad Politécnica de Valencia**

# **Simulación del comportamiento hidráulico en régimen permanente y transitorio de un tramo de red residencial de distribución de agua utilizando consumos reales con alta resolución**

**TESINA DE MÁSTER**

Presentado por:  
**Javier Soriano Olivares**

Dirigido por:  
**Francisco Arregui de la Cruz  
Jorge García-Serra García**

---

Valencia, diciembre de 2008



# Índice



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## ÍNDICE DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### ÍNDICE DE LA MEMORIA

1	Introducción .....	11
2	Problemática existente .....	12
3	Antecedentes .....	14
4	Elaboración del modelo de simulación .....	16
4.1	Introducción .....	16
4.2	Descripción de la red pública.....	17
4.3	Representación del modelo hidráulico de simulación del tramo .....	18
4.3.1	Punto de entrada del tramo .....	19
4.3.2	Conexiones de las acometidas.....	21
4.3.3	Descripción de las instalaciones generales de los abonados.....	23
4.3.3.1	Instalación Tipo I .....	24
4.3.3.2	Instalación Tipo II .....	25
	Cálculo del caudal de la bomba.....	26
	Cálculo del volumen del calderín. ....	27
4.3.3.3	Instalación mixta (combinación Tipo I y Tipo II).....	28
4.3.4	Punto de salida del tramo.....	29
4.3.5	Conducciones del tramo .....	30
4.4	Caracterización de las pautas de consumo de los abonados .....	32
4.4.1	Introducción.....	32
4.4.2	Obtención de la demanda media por hora .....	33
4.4.3	Discretización de la demanda horaria .....	35
4.5	Desarrollo de las simulaciones .....	37
4.5.1	Introducción.....	37
4.5.2	Descripción del procedimiento de análisis .....	37
4.5.3	Bloques del módulo de simulación .....	38
4.5.3.1	Bloque de obtención de medidas de consumo.....	39
4.5.3.2	Bloque para la implementación de la tipología I .....	39
4.5.3.3	Bloque para la implementación de la tipología II .....	41
4.5.3.4	Bloque para la implementación de la tipología mixta.....	42
4.5.3.5	Bloque para la presentación de los resultados .....	42
4.5.4	Escenarios simulados.....	43
4.5.5	Simulación de los modelos .....	44
4.6	Presentación de resultados.....	45

5	Respuesta en régimen permanente.....	47
5.1	Introducción.....	47
5.2	Resultados de las simulaciones en régimen permanente.....	48
5.3	Análisis estadístico de los resultados en régimen permanente.....	52
5.3.1	Estimación de los parámetros de la distribución Weibull.....	54
5.3.1.1	Valores extremos de las series.....	54
5.4	Representación de los resultados de las simulaciones.....	56
5.5	Comparación de las respuestas de otro tipo de instalaciones.....	59
6	Análisis de la demanda media en viviendas.....	62
6.1	Introducción.....	62
6.2	Procedimientos para el cálculo del caudal simultáneo en un tramo.....	62
6.2.1	Procedimiento establecido en la NIA.....	62
6.2.2	Procedimiento establecido en el CTE.....	63
6.2.2.1	Cálculo del caudal máximo o caudal instalado.....	63
6.2.2.2	Cálculo de los coeficientes de simultaneidad.....	64
6.2.2.3	Cálculo del caudal de simultaneidad.....	66
6.3	Comparación con las simulaciones de los consumos de la base de datos.....	67
6.3.1	Comparación con los resultados del CTE.....	68
6.3.2	Comparación con los resultados de la NIA.....	73
6.3.3	Expresión propuesta para la obtención del caudal simultáneo.....	74
6.4	Conclusiones obtenidas.....	75
7	Respuesta en régimen transitorio.....	76
7.1	Introducción.....	76
7.2	Respuesta del tramo de red tras por la modificación de la demanda.....	77
7.3	Respuesta del tramo de red tras el arranque de un grupo de bombeo.....	81
7.3.1	Parada del grupo de bombeo.....	82
7.3.1.1	Descripción de la respuesta en el estado 1.....	82
7.3.1.2	Descripción de la respuesta en el estado 2.....	83
7.3.2	Arranque del grupo de bombeo.....	83
7.4	Influencia del tamaño del edificio en la depresión generada.....	86
7.5	Conclusiones del análisis en régimen transitorio.....	88
8	Conclusiones.....	89
9	Referencias.....	91

## ÍNDICE DE LOS ANEJOS

Anejo I. Terminología.....	95
Anejo II. Tipos de esquemas interiores de suministro.....	97
II.1 Suministro en directo (Tipo I).....	97
II.2 Suministro con grupo de velocidad fija (Tipo II).....	98
II.3 Suministro en directo y con grupo de velocidad fija (Tipo mixto) .....	99
II.4 Suministro con grupo de velocidad variable (Tipo III) .....	100
II.5 Suministro con grupo de velocidad fija y depósito auxiliar (Tipo IV).....	101
II.6 Suministro con depósito en la parte superior del edificio (Tipo V) .....	102
Anejo III. Procedimiento para la caracterización de las pautas de consumo.....	105
III.1 Adquisición de datos .....	105
III.2 Formatos de datos disponibles.....	107
III.2.1 Formato de pulso cada 0.1 litros .....	107
III.2.2 Formato de volumen cada 10 segundos .....	109
III.2.3 Formato de volumen cada 30 segundos .....	110
III.3 Selección del formato definitivo .....	110
III.4 Depuración de datos .....	111
III.5 Estructura de las base de datos de consumo.....	116
III.5.1 Estructura de la tabla de consumos.....	116
III.5.2 Estructura de las tablas secundarias .....	117
Tabla de información sobre la instalación (Pólizas) .....	117
Tabla de información sobre los días de mediciones (Información días).....	118
Tabla de valores promedio.....	118
Tabla de resultados .....	119
Anejo IV. Pendientes máximas en régimen permanente (Tipo I y Tipo III).....	121
Anejo V. Comparación respuestas según esquema de suministro .....	125
Anejo VI. Ejemplos de aplicación .....	129
VI.1 Aplicación de la gráfica de pendientes máximas en un tramo real .....	129
VI.1.1 Descripción del procedimiento .....	129
VI.1.2 Desarrollo numérico.....	131
VI.2 Aplicación práctica del procedimiento de simulación.....	132
VI.2.1 Identificación de la estructura del tramo .....	133
VI.2.2 Simplificación del tramo.....	134
VI.2.3 Desarrollo de las simulaciones .....	136
VI.2.4 Resultado de las simulaciones .....	137
VI.2.5 Validación de los resultados aplicando los criterios de la NIA. ....	139
Anejo VII. Análisis de la depresión originada por el arranque de bombas.....	141



# Memoria



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## **1 INTRODUCCIÓN**

La metodología propuesta en el presente trabajo de investigación trata de simular el comportamiento real de un tramo de red de abastecimiento, en el que están conectados una serie de edificios de viviendas. Para ello, el procedimiento se apoya en modelos de programación que representan los elementos de la instalación, tanto en lo referente a las conducciones de la red pública, como las instalaciones generales de los edificios.

Los modelos construidos deben ser cargados con datos de consumo para representar el comportamiento de abonados del tramo. Para ello, se han utilizado datos reales de viviendas discretizados cada 10 segundos, obtenidos éstos en diversas campañas de mediciones (en la base de datos generada en el estudio se almacenan aproximadamente 4.000 días efectivos de medidas). La utilización de datos reales persigue obtener una mayor aproximación a las exigencias reales en la instalación, a diferencia de los que ocurre cuando se utilizan datos mayorados, que en algunos casos, ocultan la verdadera capacidad del tramo.

La incorporación de estos datos de consumo reales a los modelos, y la posterior simulación con un programa de cálculo hidráulico, aportará una aproximación a las exigencias reales que se dan en el tramo de estudio, bajo un determinado escenario de programación (caracterizado por unas propiedades físicas de los elementos que lo integran). Los resultados obtenidos aproximan las condiciones de operación, concretamente aporta valores de la presión mínima que se alcanza en el punto más desfavorable del sistema, durante las horas punta de suministro y, por tanto, estas exigencias marcarán las necesidades reales de la instalación y orientarán al equipo gestor sobre las posibles decisiones para garantizar las mejores condiciones de servicio a los abonados.

El potencial que aporta el programa de simulación permitirá además introducir modificaciones en el tramo real, obteniendo en tal caso la respuesta de la red ante tales variaciones. Estas modificaciones pueden alterar no sólo la instalación general del tramo, por ejemplo como resultado de la sustitución de un diámetro de la conducción, sino además, las propias instalaciones interiores de los abonados. En esta línea, el estudio de la respuesta de cada tipología de instalación general del edificio, puede orientar sobre la posibilidad de eliminar los depósitos atmosféricos que aíslan ambas instalaciones, permitiendo la conexión directa de grupos de bombeo, o bien establecer la necesidad de incorporar variadores de frecuencia que reduzcan las perturbaciones originadas en la red pública.

El estudio en régimen permanente ha sido completado por el análisis transitorio de algunos de los posibles efectos originados durante la variación del suministro en los puntos de consumo, bien por la variación directa del mismo o por la entrada en funcionamiento de grupos de bombeo, completando con ello los efectos globales transmitidos en las acometidas a la red general de abastecimiento.

## **2 PROBLEMÁTICA EXISTENTE**

El crecimiento urbanístico genera un aumento localizado de la demanda de agua en una red, pudiendo originar una insuficiencia en la capacidad de la conducción a la que se están conectando los consumos. Es por ello, que resulta preciso conocer las limitaciones de la conducción, o disponer de alguna herramienta que oriente al equipo técnico a la hora de decidir sobre la necesidad de sustituir algún tramo de red, o acerca de la respuesta esperable de una determinada conducción. En esta línea, se pretende aportar una nueva herramienta que sirva como punto de partida a la hora de seleccionar una conducción a instalar en un tramo de red, o bien, para la validación de los procedimientos seguidos actualmente para tal menester (nótese, que los procedimientos generales seguidos para la sustitución de un tramo, pueden estar precedidos del correspondiente cálculo hidráulico, pero en ningún momento se tiene constancia de la capacidad real de la conducción instalada, pudiendo derivar en un sobredimensionado del tramo o, en el peor de los casos, en un infradimensionado del tramo a renovar).

El aumento de las exigencias de consumo, entendida ésta no sólo como un aumento en el consumo medio de las viviendas, precisa en muchas instalaciones la incorporación de sistemas auxiliares para el aumento de la presión, generalmente mediante grupos de velocidad fija. El funcionamiento de estos sistemas, si están desprovistos de depósitos atmosféricos que garantizan el aislamiento entre las instalaciones, pueden originar fluctuaciones de la presión disponible en la acometida de los edificios próximos, y en mayor medida, un descenso severo de la misma cuando se produzca el arranque simultáneo de varios grupos conectados en un mismo tramo. Este efecto es menos perjudicial en aquellos tramos en los que la conducción general está sobredimensionada, y por tanto son absorbidas gran parte de las perturbaciones. Pero en otros tramos, este efecto puede ocasionar déficits de presión que impidan el correcto suministro a las instalaciones particulares de los abonados.

Respecto a las exigencias establecidas en la reglamentación vigente (tanto el aprobado recientemente Código Técnico de la Edificación, como las ordenanzas y normativas tradicionales), son muchos los escollos introducidos en lo referente a instalaciones interiores, y acerca del aislamiento de éstas con respecto a la red general de distribución, provocando a veces incertidumbres sobre la posibilidad de disponer de un esquema de la instalación u otro, atendiendo a las perturbaciones que puedan ser originadas en la conducción general. En esta línea, se pretende obtener unas directrices que orienten a la hora de considerar la posibilidad de conectar directamente los grupos de bombeo de velocidad fija (grupo convencional definido por el CTE), directamente a la acometida de la instalación sin la interposición de elementos de aislamiento (depósito auxiliar atmosférico).

Otro aspecto significativo, relacionado éste con la calidad del agua suministrada, tiene su propósito en la posibilidad de eliminar los depósitos domiciliarios atmosféricos. Este tipo de depósitos está concebido para la reducción del efecto originado por la aspiración de la bomba, tanto durante su funcionamiento normal, como en el transitorio originado durante el arranque. Respecto a la calidad del agua, la reducción de la concentración del desinfectante con el tiempo, debido al tiempo de retención en su interior, puede comprometer la salubridad del agua, y favorecer la aparición de compuestos perjudiciales para la salud. En esta línea, el estudio también está encaminado a analizar la posibilidad de eliminar el depósito atmosférico, bien a partir de la incorporación de un grupo de bombeo (de velocidad variable o velocidad fija), o a través de un suministro en directo. La selección de una de las soluciones anteriores debe ir precedida por un análisis de las exigencias de cada una, junto con la incorporación de pautas de consumo de diferentes tipos de usuarios.

### 3 ANTECEDENTES

De los primeros estudios encaminados a la caracterización de la demanda de agua residencial se destaca las aportaciones de Wells (1994), quien analizó estadísticamente los pulsos generados en viviendas proponiendo distribuciones de probabilidad para la intensidad, la duración y el volumen para los diferentes consumos medidos.

En esta línea, Buchberger & Wu (1995) caracterizan el consumo en instalaciones interiores según pulsos rectangulares de Poisson derivados de un modelo estocástico definido por variables aleatorias. Para posteriormente generar funciones de probabilidad que aportan una aproximación a los caudales punta que pueden darse en este tipo de instalaciones. Un año después y como continuación a lo desarrollado, Buchberger & Wells (1996) aprueban algunas de las hipótesis tomadas para la caracterización de la demanda de agua residencial, validando la representación de los consumos como pulsos rectangulares aleatorios.

Años posteriores, Buchberger & Lee (1999), comprueban que la aplicación de la teoría de pulsos rectangulares de Poisson para la caracterización de la demanda de agua residencial es válida, demostrándose que los caudales de los pulsos son aditivos, requisito para asumir la validez del empleo de un proceso de pulsos rectangulares de Poisson para la caracterización de los usos residenciales del agua.

DeOreo (1996) destacó la importancia de disponer de mediciones en viviendas en continuo en el campo de la identificación de usos a partir de los pulsos registrados. En su estudio utilizó datos de consumo de viviendas y fue capaz de identificar el funcionamiento de hasta nueve aparatos diferentes.

La utilización de datos de consumo de viviendas domésticas también fue llevado a cabo por Arregui (1.998) en su tesis doctoral *“Propuestas para una metodología para el análisis y gestión del parque de contadores de agua en un abastecimiento”*, en ella, recoge las principales características de los datos de consumo utilizados en el estudio, y establece el procedimiento para la caracterización de las medidas de consumo de agua.

El primer libro publicado sobre el análisis de los usos residenciales del agua, *“Residencial End Uses of Water”* (Mayer et al. 1999), aporta datos específicos sobre consumo doméstico de agua, usos finales del consumo, influencia de factores ambientales y desarrolla un modelo de predicción de la demanda.

Más reciente, García (2003) y en García et al. (2004), se desarrolla un modelo estocástico para simular el comportamiento de los consumos domésticos de agua, suponiendo que los consumos se comportan como pulsos rectangulares de Poisson. Para ello se buscan formulaciones (funciones) para las tres variables: duración, intensidad y ocurrencia de pulsos.

Respecto al estudio sobre la influencia de los depósitos atmosféricos sobre la calidad del agua, en Iglesias (1998), se establece la reducción de la concentración del agente desinfectante del agua con el aumento del tiempo de permanencia o retención de ésta en el depósito, y por tanto, la imposibilidad de garantizar las condiciones mínimas de calidad exigidas por la normativa vigente.

## **4 ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN**

### **4.1 Introducción**

El suministro en cualquier tramo de red puede ser simulado a partir de su correspondiente modelo matemático, sin más que programar la estructura que represente los diferentes elementos que lo componen, y las solicitudes en forma de caudal demandado por los usuarios conectados a éste.

Concretamente, se persigue modelar el comportamiento hidráulico de un tramo de red pública ubicada en un núcleo urbano, que podría representar cualquier conducción general que discurre por una determinada calle y abastece a una serie de edificios de viviendas.

Para ello, se debe por un lado programar el escenario de simulación del tramo, de forma que modele los diferentes elementos que lo integran. Esto precisa un análisis detallado de todos los elementos que forman parte del sistema, entre ellos, se destaca la red pública o conducción general del tramo, la conexión en acometida, la instalación general del edificio y, por último, la instalación particular de cada abonado.

Por otro lado, para tener representado el comportamiento del tramo, es necesario incorporar las pautas de consumo de los abonados. Para ello, es posible cargar en el modelo datos promedios de consumo de cada hora, como normalmente se viene haciendo, o bien, cargar el modelo con datos reales obtenidos en mediciones realizadas en viviendas. A medida que se reduce el intervalo entre datos de consumo, mayor aproximación al comportamiento real. El módulo desarrollado carga datos de consumo de viviendas, almacenados convenientemente en una base de datos. Ésta contiene datos de consumos cada 10 segundos de unas 200 viviendas, disponiendo de una media de 10 días de mediciones por vivienda, lo que se traduce en una gran cantidad de información real de consumo, la cual es utilizada para representar las exigencias de un determinado grupo de viviendas.

Finalmente, la construcción del modelo combinará la información física relativa al tramo con la propia de los consumidores. La incorporación de los datos de consumo al modelo físico del tramo, aportará una aproximación al funcionamiento hidráulico del mismo. Si se realizan simulaciones para una misma configuración de tramo, alterando los datos de consumo de las viviendas, es posible acotar la respuesta que podría darse en un tramo de red en el que se conecta un número fijo de viviendas. El análisis hidráulico posterior a partir de los valores de las presiones originadas en el tramo bajo las diferentes cargas, aportará una aproximación del comportamiento real de un tramo, pudiendo repetir el procedimiento anterior alterando en este caso las propiedades del tramo, y valorar la influencia de cada parámetro de la instalación.

## **4.2 Descripción de la red pública**

Se trata del conjunto de conducciones generales de la red pública de abastecimiento, conducciones a las que están conectadas las acometidas que alimentan las instalaciones de los abonados y los diferentes puntos de consumo de la red.

Entre las configuraciones que pueden tener estas instalaciones, se encuentran las redes ramificada, mallada o una combinación de ambas disposiciones. La primera de ellas se caracteriza por tener definido el sentido de circulación del caudal en cada tubería, mientras que en la red mallada, el agua puede circular de forma continuada en un sentido, en otro, o variando éste en función de las características operativas de la red.

Como se ha comentado, estas conducciones están directamente conectadas a las instalaciones generales de los edificios, a través de las correspondientes acometidas, y por tanto, son los elementos que soportan directamente los efectos y perturbaciones introducidas por el suministro a cada instalación. Por tanto, funcionamientos defectuosos dentro de las instalaciones generales de los edificios, pueden transmitirse a las redes arteriales del abastecimiento, y trasladarse a otras instalaciones conectadas a la red pública. Por ejemplo, en el caso del arranque simultáneo de grupos de presión conectados en directo en un tramo de red, es posible generar depresiones que impidan el correcto suministro de instalaciones próximas, o incluso, dicho efecto puede notarse en puntos de consumo alejados si éstos operan con un reducido margen de sobrepresión.

En todo caso, este conjunto de conducciones y elementos, deben dimensionarse de forma que sean capaces de absorber los efectos originados por las instalaciones conectadas, o bien analizar bajo qué configuraciones los efectos provocados pueden ser perjudiciales para la instalación.

En esta línea, se puede trabajar con el concepto de *capacidad* de transporte de las conducciones, entendida ésta como el nivel de caudal que pueden transportar sin que la pendiente hidráulica tome valores críticos durante un periodo de tiempo específico (originando valores de pérdidas de presión elevados). El valor de dicha variable influirá a la hora de absorber los efectos del funcionamiento de grupos de bombeo conectados a las acometidas domiciliarias, o en situaciones extremas (como la derivada de la utilización de hidrantes de incendios), orientará al gestor sobre la respuesta esperable en la red ante dichas condiciones de funcionamiento. La capacidad de una conducción está directamente relacionada con el diámetro de la conducción y con el caudal circulante por la misma, y el modo en que éste se distribuye temporalmente, ya que una conducción de red general sobredimensionada, será capaz de absorber los efectos de los arranques de las bombas, mientras que un tramo de red cuya capacidad está prácticamente saturada (debido por ejemplo al crecimiento urbanístico en la zona), puede colapsarse ante variaciones sensibles del caudal detráido de las acometidas.

Otra de las circunstancias que influye en la respuesta de estas instalaciones es la *densidad de acometida* en la misma para una misma longitud de tramo, ya que un arranque simultáneo de grupos de bombeo de velocidad fija conectados en un tramo reducido de red, puede causar un descenso de la presión en la conducción pública, efecto que quizá no se hubiera originado bajo otra distribución de acometidas.

Finalmente, otro de los parámetros a considerar en la red de abastecimiento es el nivel de presiones que se asegura en servicio, así como la capacidad de mantener los niveles de presión en valores constantes o, por el contrario, presentar fluctuaciones de presión en función de la demanda instantánea a lo largo del día, de forma que, en horas de baja demanda, el nivel de presión en red toma valores elevados, mientras que en horas punta de demanda, el caudal circulante es máximo, de la misma forma que las pérdidas de presión en la red, registrándose en tal caso los niveles de presión mínimos de servicio. En esta línea, si los niveles de presión en una determinada zona de la red se mantienen en valores reducidos, su respuesta ante el arranque de los grupos de bombeo de la instalación puede poner en riesgo el resto de usuarios conectados a la conducción principal, incumpliendo por tanto lo referente a los valores mínimos de presión garantizados por el gestor del servicio.

### **4.3 Representación del modelo hidráulico de simulación del tramo**

Con el estudio se pretende simular el comportamiento hidráulico de un determinado tramo de red. El tramo de estudio pertenecería a una red ramificada (o bien una mallada en el caso de que el flujo durante los instantes de simulación están correctamente definidos), y estaría formado por una serie de acometidas a las que estarían conectados edificios residenciales. Estas acometidas son los puntos de conexión entre la red pública y la instalación interior de cada edificio, y serán el punto de control para evaluar lo que sucede en cada entrada del edificio. Nótese, que la longitud de la acometida suele ser reducido, de la misma forma que los elementos conectados a ésta (collarín y/o llave de toma, tubo de acometida y llave de registro) y, por tanto, se puede asumir que las propiedades en la acometida no son muy dispares a las que se tienen en el interior de la instalación general del edificio.

Para la simulación de la respuesta del tramo en régimen permanente se utiliza el programa de cálculo hidráulico Epanet. Éste permite modelar un tramo de red convenientemente definido y simular el comportamiento del mismo con elevada fidelidad. Ésta depende en todo caso, de la precisión con la que se define el modelo matemático del tramo y con la que se programan las exigencias reales del mismo.

El esquema representativo del tramo a modelar estaría definido, por un lado, a partir de sus características físicas del mismo (longitudes parciales de las conducciones, diámetros instalados, materiales empleados, cotas, etcétera), y por

otro, a partir de los diferentes caudales de consumo asignados a cada nudo del sistema.

La siguiente figura muestra una estructura básica de un tramo de red.

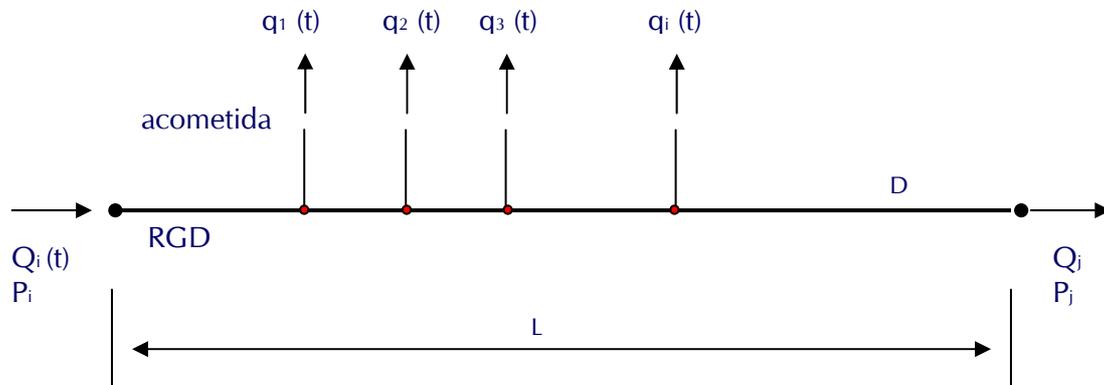


FIGURA 1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN TRAMO DE RED RAMIFICADO.

La conducción general RGD (red general de distribución) se corresponde con el conjunto de tuberías instaladas en un determinado tramo del abastecimiento y representa el tramo que discurre por una o varias calles de la red, y a la que están unidas una serie de acometidas correspondientes a los edificios que se suministran desde ella. El tramo queda delimitado entre un nudo inicial y otro final, del que deben conocerse las principales propiedades físicas e hidráulicas. En cuanto a las propiedades de la conducción, depende de cada tramo, y éstas pueden ser programadas durante el proceso de construcción del modelo del tramo fijando sus principales propiedades.

De los diferentes ramales correspondientes a cada una de las acometidas, se extrae un determinado caudal variable con el tiempo,  $q_i(t)$ , función de la simultaneidad en el consumo de cada una de las viviendas, y de la tipología de esquema adoptada en la instalación general del edificio.

A continuación se detallan las principales características de los elementos que componen el tramo, junto con algunas de las consideraciones tomadas en el estudio.

#### 4.3.1 Punto de entrada del tramo

El punto de entrada de agua en el tramo representa el punto inicial donde el tramo está conectado a una conducción igual o mayor, o bien un ramal concreto de la red arterial.

La principal variable que caracteriza este nudo está relacionada con la presión disponible en el mismo, correspondiente al nivel máximo de presión que se puede alcanzar en el tramo definido durante el funcionamiento normal. Nótese, que el suministro a cada uno de los nudos de acometidas situados aguas abajo, introduce

unas pérdidas por fricción que reducen la presión disponible en cada punto de alimentación que integra el tramo de red.

La forma adoptada para representar el punto de entrada de agua en el modelo de simulación ha sido mediante un embalse, situado a una cota determinada con la finalidad de que represente una presión fija a la entrada del tramo de red. Mediante la implementación del embalse en el modelo, y fijado la altura de agua disponible, es posible mantener unas condiciones constantes de presión en tal nudo durante toda la simulación.

Si, a lo largo del tiempo de simulación, el tramo a estudio experimenta variaciones de presión significativas en la entrada, es posible representar tales fluctuaciones a partir de un embalse al que se le asigna su correspondiente *curva de modulación*. En este caso, la presión, o lo que es lo mismo, el nivel de agua en el embalse, dependería del instante de simulación, y por tanto, sería posible ajustar la respuesta real de la red a partir del comportamiento de dicho embalse de nivel variable.

Cabe destacar que, en el funcionamiento real de un tramo de red, existe una fluctuación de presiones a la entrada del tramo a lo largo del día, ya que la red forma parte de una instalación mayor, y alteraciones en el consumo de otros puntos de la red conlleva alteraciones en la presión de la entrada. Pero, utilizando el mencionado embalse de nivel fijo, es posible representar unas condiciones de presión constantes (a partir de la diferencia de cotas entre los elementos) asociadas al mínimo valor en el rango de presiones que garantiza el gestor del suministro, de tal forma que, como el gestor asegura dichas condiciones mínimas de presión durante el funcionamiento normal de la red, éstas servirán como referencia.

En las simulaciones programadas, se ha mantenido el nivel del embalse constante. La equivalencia con el punto de entrada real es notable si se considera que las presiones en el punto inicial van a permanecer constante durante toda la simulación. Inicialmente se ha impuesto que la cota del nudo de entrada sea 380 metros, mientras que la cota del resto de elementos es de 350 metros, con ello se consigue disponer de una altura útil en todos los puntos de consumo de 30 metros de columna de agua en condiciones estáticas. Nótese, que el valor de la presión mínima que se dará en la red durante el funcionamiento normal será próximo al valor anterior, siendo éste un valor razonable como rango inferior de presiones de suministro, ya que, como sucede en la red de agua potable de Valencia, la entidad gestora establece en su Reglamento del Servicio, también un valor mínimo de 25 mca.

Finalmente se concluye que la definición del elemento de entrada en la red aporta un comportamiento hidráulico muy similar al real para las condiciones descritas anteriormente, no haciendo falta introducir información acerca de más parámetros, ya que, por ejemplo, el caudal inyectado en la red será función del consumo cargado en cada uno de los nudos, tanto los correspondientes a nudos de acometida, como el nudo final del tramo.

#### 4.3.2 Conexiones de las acometidas

Se trata de simular el comportamiento real que se da en las diferentes acometidas conectadas a la tubería general de la calle. Dichas acometidas son los tramos de unión entre las instalaciones generales de los edificios con la red general pública.

Hidráulicamente estas acometidas pueden ser representadas mediante nudos de consumo, imponiendo una cierta demanda y una evolución temporal de la misma. De esta forma, si se conocen los dos parámetros anteriores, se puede simular el comportamiento de cualquier consumidor. Básicamente se trata de simplificar la red, de forma que no sea necesaria la consideración de los tramos conectados aguas abajo de la acometida, ya que si se dispone de la información sobre el consumo de la totalidad de estos usuarios, es posible trasladar dicha información al nudo situado aguas arriba mediante el procesamiento de estos datos.

La información necesaria para definir estos elementos es, por un lado las condiciones topológicas del mismo, a partir de las coordenadas de su ubicación y, por otro lado, la caracterización de su consumo.

En el primero de los casos, las coordenadas marcarán la distancia entre los diferentes elementos, información necesaria para la determinación de la longitud de cada uno de los tramos entre acometidas, cuyo análisis se realizará en el apartado posterior cuando se traten las conducciones. Y en lo referente a las cotas o elevación de los nudos, ya se comentó en el apartado anterior, todos los nudos se situarán con una misma elevación, de forma que representen el perfil topológico del tramo de una calle sin desniveles, de esta forma se consigue que la influencia de la pendiente física de una calle en los valores de presiones sea nula. En el caso de representar el comportamiento de una conducción de una red que discurre por un trazado escarpado, es posible alterar las cotas de cada uno de los nudos e imponer los valores correspondientes a las alturas reales.

Respecto a los parámetros de consumo en cada uno de los nudos de acometida, el funcionamiento real está caracterizado por la demanda de un caudal variable en el tiempo, correspondiente a la suma de las demandas de cada una de las viviendas conectadas a la acometida correspondiente, y correctamente transformada en el caso de que la instalación disponga de elementos que alteren tal comportamiento (como sucede si se interpone en la instalación general algún elemento de almacenamiento tipo aljibe o un equipo de bombeo). En términos generales, las condiciones de consumo de un nudo de acometida estarán representadas por una demanda media y una curva de modulación que tenga en cuenta la variabilidad del consumo en cada uno de los periodos de simulación considerados.

La demanda media o *demanda base* de agua se obtiene a partir de la contabilización del consumo total de todos los usuarios conectados aguas abajo del nudo para el tiempo total de simulación, y el posterior cálculo del valor medio del mismo. La determinación del consumo medio precisa primeramente establecer

el número de usuarios conectados a cada nudo. Para ello, se establece que cada acometida alimentará a un único edificio (hipótesis tomada para acotar el consumo en cada nudo) de forma que, la determinación del número de usuarios conectados a un mismo nudo, parte de la determinación del número de viviendas por edificio. Con la finalidad de flexibilizar este parámetro, se realizará en las diferentes simulaciones, variaciones de este número, y de esta forma se obtendrá la respuesta de la red para cada una de las situaciones previstas.

Mientras que la curva de modulación del total de consumidores se obtendrá a partir de los patrones de consumo de los consumidores durante el periodo de análisis y el posterior cálculo de cada uno de los factores de la curva principal para los mismos instantes de cálculo, atendiendo en todo caso a la tipología de la instalación interior.

Del mismo modo, hay que identificar la curva de modulación correspondiente a cada acometida. Esta curva representará la evolución temporal de la demanda en la red y estará compuesta por tantos factores de modulación como intervalos se estimen necesarios. Como el presente estudio trata de identificar bajo qué situaciones de demanda es posible tener problemas en la presión de suministro, se estudiará el comportamiento de la red durante una única hora de suministro, siendo ésta la correspondiente a horas de mayor consumo, con tal de simular las condiciones más exigentes. Por tanto, la curva de modulación que se deberá cargar a cada nudo deberá tener un total de 360 factores, correspondiente cada uno de ellos a cada uno de los intervalos de 10 segundos en los que se divide la hora de análisis. Y el valor de cada coeficiente se obtendrá a partir de la suma de cada uno de los factores de los patrones de consumo de los usuarios, promediado con la totalidad de consumo por nudo.

Otra de las posibilidades que permite en módulo de simulación es modificar el número de nudos de la red, flexibilizando la posibilidad de representar redes de diferente tamaño.

Los parámetros de consumo que describen las solicitudes en cada acometida dependen, como se ha comentado, de la tipología de la instalación y, por tanto, es necesario analizar cada una de las tipologías de instalaciones generales de edificios más comunes. El análisis permitirá detectar cómo éstas alteran el comportamiento de los abonados del edificio para posteriormente trasladarlo, convenientemente transformado, a las acometidas que forman parte del tramo.

### **4.3.3 Descripción de las instalaciones generales de los abonados**

La asignación de los requerimientos a cada una de las acometidas parte del análisis de las instalaciones generales de los edificios. Por tanto, es necesario caracterizar las diferentes tipologías de instalaciones generales de suministro, con ello se consigue simular el consumo en el interior del edificio, pero más concretamente, el modo en el que un nudo de acometida percibe las solicitudes introducidas por el consumo de los abonados.

Como se ha comentado, para cada variante, el módulo deberá calcular los factores de modulación con tal de aproximarse a cada una de las respuestas, para permitir posteriormente, evaluar el comportamiento de la red bajo cada una de las tipologías.

Los esquemas de suministro más comunes en las instalaciones generales de los edificios se incluyen en una de las siguientes tipologías:

- Suministro en directo (Tipo I)
- Suministro con grupo de bombeo de velocidad fija (Tipo II)
- Suministro con grupo de bombeo de velocidad variable (Tipo III)
- Suministro con depósito de almacenamiento intermedio:
  - Depósito en la parte inferior del edificio con grupo de bombeo (Tipo IV)
  - Depósito en la parte superior del edificio (Tipo V)

En el Anejo II. Tipos de esquemas interiores de suministro en edificios, se describe cada uno de los esquemas interiores de suministro, especificándose sus principales características.

La obtención de la curva de modulación en cada uno de los nudos comentada anteriormente, es válida cuando el consumo se realiza de forma directa por parte de los usuarios (suministro Tipo I), es decir, sin que exista ningún elemento que interfiera en esa modulación, como sucedería en caso de existir un depósito entre la acometida y el propio consumidor. Pero el módulo de cálculo propuesto incorpora, además de la situación anterior, otras modalidades de consumo que deberán ser correctamente trasladadas al nudo de la red con tal de que la simulación sea correcta.

Las modalidades de instalaciones consideradas en el estudio son las tres variantes que a continuación se detallan:

- Suministro en directo para la totalidad de viviendas del edificio (Tipo I)
- Suministro mediante grupo de bombeo y calderín (Tipo II)

- Suministro mixto; viviendas en directo y viviendas con grupo de bombeo

#### 4.3.3.1 Instalación Tipo I

Se trata de la simulación del comportamiento de una red alimentada en directo, de forma que la presión a la entrada en la acometida debe ser suficiente para abastecer al abonado situado en los últimos pisos del inmueble, garantizando el valor mínimo para asegurar el correcto suministro de los aparatos de la instalación.

El siguiente esquema representa la instalación Tipo I, siendo el número de abonados que se suministran a partir de la acometida igual al número de viviendas del edificio.

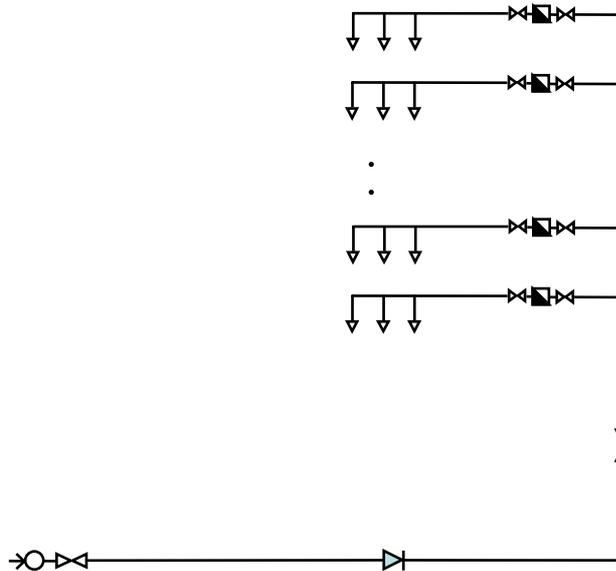


FIGURA 2. INSTALACIÓN GENERAL DE UN SUMINISTRO EN DIRECTO (TIPO I).

Una hipótesis tomada en el presente estudio es considerar que las solicitaciones introducidas con un grupo de velocidad variable (Tipo III, grupo motobomba equipado con variador de frecuencia) son similares a las originadas en un esquema en directo. De hecho, los volúmenes de los calderines en estas instalaciones son muy reducidos, debido a las características propias del funcionamiento del grupo.

La determinación de los parámetros de consumo para el nudo correspondiente se realiza sumando cada una de las curvas de modulación de las diferentes viviendas, obteniendo el factor mediante la división del valor anterior entre el consumo total de la línea para cada uno de los periodos.

$$f_{cm\_I}(t) = \frac{\sum_{i \in N_{viv}} q_i(t)}{Q_T} \quad \forall t = 1 \dots N_{fact} \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo  $Q_T$  el caudal total consumido en el nudo durante todo el periodo,  $q_i$  el valor del caudal consumido en las viviendas del edificio ( $N_{viv}$ ) en cada uno de los periodos y  $N_{fact}$  el número de intervalos de análisis.

#### 4.3.3.2 Instalación Tipo II

La tipología II se caracteriza por tratarse de un sistema de suministro que únicamente consta de un grupo de bombeo y un calderín, tal como muestra el siguiente esquema:

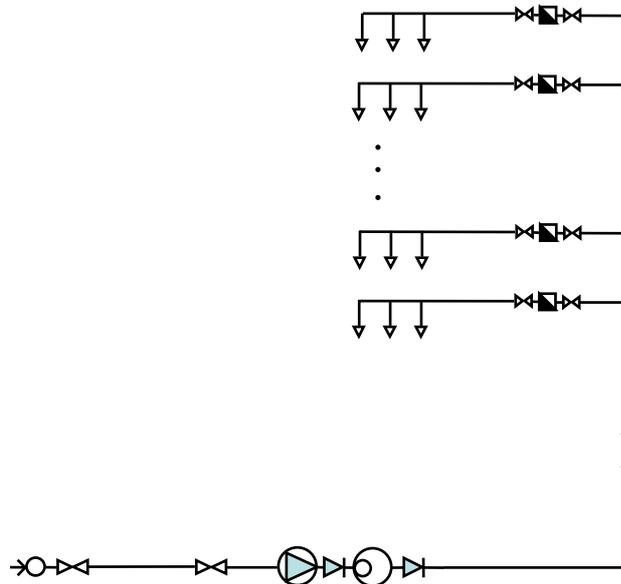


FIGURA 3. INSTALACIÓN GENERAL DE UN SUMINISTRO CON GRUPO DE BOMBEO DE VELOCIDAD FIJA (TIPO II)

Como se puede apreciar, este tipo de configuración suele darse las instalaciones que no disponen de un valor de presión suficiente a la entrada de la acometida para garantizar la presión mínima necesaria para el correcto funcionamiento de los aparatos. Por otro lado, ésta es la instalación más exigente desde el punto de vista hidráulico, ya que todo el agua que inyecta en la red debe pasar por el grupo de bombeo y, en el caso de que la simultaneidad en los arranques sea alta para la totalidad de nudos de la red, se producirá un descenso considerable en la presión de los nudos más alejados del punto de alimentación.

Para esta tipología será necesario tener en cuenta el comportamiento del grupo de bombeo. En el caso del *calderín*, puede darse la situación de que la bomba esté parada y el suministro se realice únicamente a partir del agua a presión almacenada en el acumulador, en tal caso, el factor de modulación que se debería cargar al nudo principal sería nulo (nótese que no se detrae agua de la acometida del edificio). Y la otra posibilidad se daría cuando el grupo de bombeo está activado y suministre fluido al calderín y a las viviendas. En estas condiciones, el factor de la curva de modulación sería el correspondiente al caudal bombeado por el grupo, dividido por el volumen total consumido por las viviendas en el periodo de estudio.

Por tanto, se concluye que para esta tipología de suministro se darán los siguientes factores en la curva de modulación del nudo de acometida:

$$\begin{cases} f_{cm\_II}(t) = 0 & \text{si } V_{cal} > 0 & \forall t = 1 \dots N_{fact} \text{ (en ciclo de vaciado)} \\ f_{cm\_II}(t) = \frac{q_b}{Q_T} & \text{si } V_{cal} = 0 & \forall t = 1 \dots N_{fact} \text{ (en ciclo de llenado)} \end{cases} \quad \text{EC. 2}$$

Siendo  $q_b$  el caudal de bombeo y  $V_{cal}$  el volumen de agua acumulado en el calderín hasta el punto de arranque de la bomba. Como se observa en la expresión anterior, el valor del factor de modulación es función del ciclo que está realizando el calderín. En un caso se producirá el vaciado del mismo, suministrando a la instalación mediante éste, y en otro caso, se suministrará a partir del grupo de bombeo, procediendo además al llenado del depósito a presión.

Estrictamente el caudal bombeo no permanecería constante, éste es función de la presión del volumen de agua en el calderín, pero en las simulaciones se considerará constante, ya que se estima que la variación del mismo es pequeña y, en todo caso, el caudal bombeado sería inferior en los instantes posteriores al arranque, ya que la curva resistente en ese punto es ascendente y por tanto, las condiciones de funcionamiento serían menos exigentes.

A continuación se detalla el procedimiento de cálculo de las principales variables del grupo de bombeo.

#### *Cálculo del caudal de la bomba*

Los cálculos se han realizado a partir de las recomendaciones de las antiguas Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de suministro de Agua (NIA), y siguiendo en todo caso las directrices impuestas por el Código Técnico de la Edificación (CTE) en la materia de suministro de agua. A partir de estos documentos, se establece que el caudal que deberá ser capaz de aportar la bomba se obtiene según la siguiente expresión (ésta tiene en cuenta el caudal instalado en cada una de las viviendas y los correspondientes coeficientes de simultaneidad):

$$Q_{punta} = N_{viv} k_1 k_2 Q_{inst} \quad \text{EC. 3}$$

Donde  $N_{viv}$  representa el número de viviendas suministradas mediante el grupo de bombeo,  $k_1$  es el coeficiente de simultaneidad que tiene en cuenta el número de aparatos de una vivienda que están siendo utilizados al mismo tiempo,  $k_2$  es el coeficiente de simultaneidad que tiene en cuenta el número de viviendas que están consumiendo agua durante el mismo instante y  $Q_{inst}$  es el caudal instalado en cada una de las viviendas, función del tipo de vivienda y del número de aparatos que consumen agua en la instalación.

Se ha considerado las viviendas como Tipo D (según NIA), que corresponden a viviendas con dos cuartos de baño completos, lavadora, lavavajillas, fregadera y

office, con un total de 12 aparatos, obteniéndose en tal caso un caudal instalado de 1,96 lps ( $Q_{\text{inst}} = 1.958$  lps).

La variable  $N_{\text{viv}}$  será función del número de viviendas alimentadas con el grupo de bombeo que se considere en cada simulación. Por tanto, si se desea evaluar el efecto introducido sobre las presiones en la red a partir de la variación del número de viviendas alimentadas por bombeo, éste será uno de los parámetros que influyan en su comportamiento. Nótese que para la simulación Tipo II, todas las viviendas conectadas a un nudo deberán suministrarse mediante el grupo de bombeo, de forma que  $N_{\text{viv}}$  tomará el valor del número total de viviendas por nudo. Mientras que en el caso de la simulación de una instalación Tipo mixta, será necesario establecer qué proporción de la totalidad de viviendas conectados a una misma acometida se suministran en directo y qué cantidad de viviendas a partir del grupo hidropresor.

El coeficiente  $k_1$  se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo  $n$  el número de aparatos de los que dispone la vivienda, para Tipo D,  $n = 12$  aparatos. De tal forma que  $k_1$  toma un valor de 0,3.

El coeficiente  $k_2$  se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$k_2 = \frac{19 + N_{\text{viv}}}{10(N_{\text{viv}} + 1)} \quad \text{Ec. 5}$$

Variable que será función del número de viviendas suministradas a través del grupo de bombeo como se indicó anteriormente.

*Cálculo del volumen del calderín.*

En las tipología II y mixta, se considera la instalación de calderines a la salida del grupo de bombeo, cuyo volumen total se ha calculado para ambas situaciones a partir de la fórmula siguiente, obtenida siguiendo la Normativa Canaria para un número de arranques máximo por hora de 20 y una diferencia en el rango de presiones de suministro de 15 mca.:

$$V_T = K \frac{6,25 Q_b (p_p + 10,33)}{100 N_b} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $K$  tiene en cuenta el tipo de renovación de aire empleado; 1 para calderines de membrana, 2 para compresor y 2,5 para inyectar. Siguiendo las exigencias del CTE, se consideran sólo calderines de membrana.  $Q_b$  es el caudal en lpm que trasiega la bomba (valor cuyo cálculo se ha presentado anteriormente),  $N_b$  es el

número de bombas que trabajan en alternancia y  $p_p$  es la presión de paro del grupo de bombeo en mca. Para ambos casos se considerará que  $K=1$ ,  $N_b=1$  (sólo trabaja una bomba en alternancia) y  $p_p=60$  mca.

En el caso de la instalación Tipo II y, como es lógico pensar, el volumen del calderín será mayor que en la tipología mixta, ya que el caudal de bombeo es mayor, puesto que el número de viviendas conectadas al grupo de presión en la tipología mixta es una proporción del número de viviendas total del edificio.

#### 4.3.3.3 Instalación mixta (combinación Tipo I y Tipo II)

Se trata de una combinación de las tipologías anteriores y está formado por un conjunto de viviendas que son alimentadas en directo, ya que la presión en la red es suficiente para garantizar presiones razonables para estos puntos de consumo, mientras que las viviendas situadas en el pisos más elevados del inmueble precisan de grupo de presión para elevar el agua hasta los puntos de consumo con un valor suficiente.

En este caso, la modulación del consumo se construirá a partir de la superposición de los dos casos anteriores; por un lado, un número determinados de viviendas estarán suministradas en directo ( $N_{viv\_dir}$ ), mientras que en el resto ( $N_{viv\_bomb}$ ) el suministro se realizará a partir del grupo de presión. Para las simulaciones se ha considerado que, bajo ésta tipología, el 33% de la instalación se suministra a partir de grupos de bombeo de velocidad fija y el resto de viviendas se suministrarían en directo.

Para las viviendas en directo se cumplirá:

$$f_{cm\_III\_dir}(t) = \frac{\sum_{i \in N_{viv\_dir}} q_i(t)}{Q_T} \quad \forall t = 1 \dots N_{fact} \quad \text{EC. 7}$$

Y para las viviendas suministradas con calderín:

$$\begin{cases} f_{cm\_III\_bomb}(t) = 0 & \text{si } V_{cal} > 0 & \forall t = 1 \dots N_{fact} \text{ (en ciclo de vaciado)} \\ f_{cm\_III\_bomb}(t) = \frac{q_b}{Q_T} & \text{si } V_{cal} = 0 & \forall t = 1 \dots N_{fact} \text{ (en ciclo de llenado)} \end{cases} \quad \text{EC. 8}$$

Y para el nudo de la red se deberá cumplir:

$$f_{cm\_III}(t) = f_{cm\_III\_dir}(t) + f_{cm\_III\_bomb}(t) \quad \forall t = 1 \dots N_{fact} \quad \text{EC. 9}$$

La determinación de las variables que definen el comportamiento del grupo de bombeo se realiza de forma similar a las expuestas anteriormente para el suministro Tipo II, en el que todo el caudal pasaba a través del grupo de bombeo de la instalación general del edificio.

La siguiente figura muestra un esquema típico de esta tipología de instalación, en la que se puede apreciar dos ramales de alimentación; uno de ellos alimentaría en directo a la parte baja de la instalación, mientras que otro de los ramales conectaría con el grupo de bombeo que eleva agua a la parte alta de la instalación:

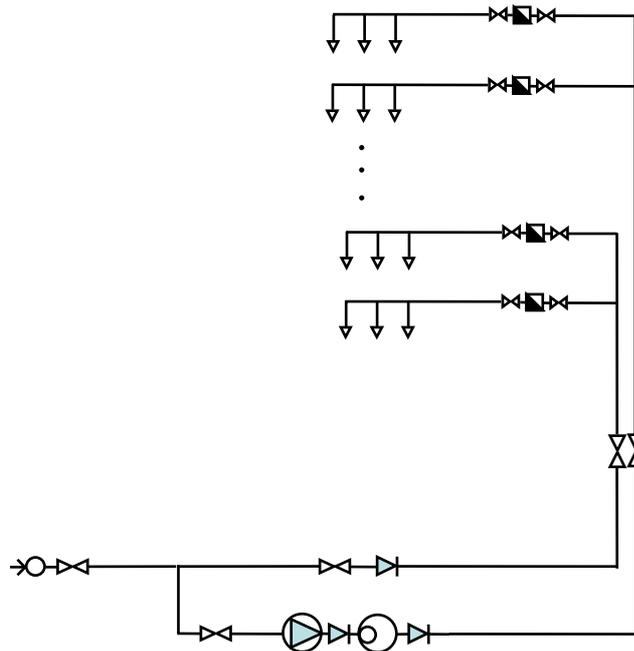


FIGURA 4. INSTALACIÓN GENERAL DE UN SUMINISTRO MIXTO (COMBINACIÓN DIRECTO Y GRUPO DE BOMBEO).

#### **4.3.4 Punto de salida del tramo**

El punto de salida de la red se corresponde con el punto de control de la presión, ya que se trata del punto más alejado del nudo de suministro, y por tanto, el nudo que experimentará las condiciones mínimas de presión durante el funcionamiento. Téngase en cuenta, que la presión en dicho nudo será el valor resultante de restar, a la presión disponible a la entrada del tramo, el valor correspondiente a las pérdidas por fricción en las conducciones y resto de elementos.

La cota del nudo se ha mantenido en el mismo valor que en los casos anteriores por la misma razón que se expuso anteriormente, de forma que todos los nudos de la red, salvo el de entrada, se mantendrían a un mismo nivel, representando un tramo llano de la red de suministro.

Respecto a los parámetros relacionados con el consumo se han impuesto de forma diferente al resto de nudos. La razón es debida a que, a este nudo, se le puede asignar un caudal constante que circula por el tramo independiente de los caudales consumidos en los edificios del tramo. Éste puede estar relacionado con el caudal demandado por puntos de consumo situados aguas abajo del tramo, o bien introducido para representar las posibles fugas que se pueden dar en la red. Por tanto, por un lado, no se ha cargado ninguna curva de modulación, ya que a este nudo no se le asocia ninguna vivienda por tratarse de un nudo de análisis, así que todos los factores de la curva de modulación correspondiente son unitarios para todos los instantes de la simulación. Y, por otro lado, sí que se le ha cargado una demanda media hipotética. El valor del caudal demandado por dicho nudo es el correspondiente que establece una velocidad de 0.5 metros por segundo por el tramo independientemente de los caudales demandados por los nudos (se fija a partir de la velocidad del agua para afectar de forma idéntica a cualquier diámetro de conducción). Este caudal puede ser modificado con tal de evaluar el efecto que introduce dicha variación en el sistema.

#### **4.3.5 Conducciones del tramo**

Como se ha definido anteriormente, el tramo de red está compuesto por una serie de conducciones a las que se conectan las acometidas de cada uno de los edificios del tramo. En el modelo se deben definir las principales propiedades de estas conducciones. Estas propiedades son el tipo de material de la tubería, su diámetro y su longitud.

En el caso de querer simular un tramo concreto de red real, dichos valores se pueden conocer con elevada precisión, bien a partir de la medición directa en campo, o a partir de las propiedades facilitadas por el fabricante en la correspondiente documentación técnica de la tubería.

Respecto a la longitud de la conducción del tramo, y tal como se ha mostrado en la Figura 1, es suma de las longitudes de cada una de las conducciones que forman el tramo, pudiéndose incluso trabajar con una longitud equivalente de tubería si se quisiera incluir las pérdidas menores originadas por los elementos del tramo. Éste está delimitado por un nudo de entrada y otro de salida, y en posiciones intermedias, se ubican los diferentes nudos correspondientes a las acometidas. Por tanto, es posible definir una longitud total de tramo, y mantener un número determinado de acometidas, representando un tramo en el que todos los edificios son equidistantes, o bien imponer una determinada distancia entre cada acometida, de forma que es posible modificar la distancia entre dos nudos consecutivos, tanto de forma constante para todos los nudos, como particularmente para cada uno de los nudos de la red.

En el caso del diámetro de la conducción principal, debe fijarse el valor correspondiente al diámetro interior de la conducción, bien a partir de una medida directa si es posible o, como se ha comentado, a partir de los datos

proporcionados por el catálogo del fabricante. De forma general, en las simulaciones realizadas se mantiene un valor constante para toda la conducción principal del tramo, tal como suele suceder en la mayoría de tramos de una red de abastecimiento. No obstante, el módulo de simulación permite la introducción de diferentes valores de diámetros para cada una de las partes en las que se divide el tramo de análisis (conducciones definidas entre dos acometidas consecutivas).

Otra de las propiedades a considerar en el modelo es la relacionada con el material de la conducción. Éste se tiene en cuenta a partir de la rugosidad media de la tubería. Particularmente, el valor de la rugosidad del material se puede obtener a partir de los valores propuestos por diferentes autores, o bien, seleccionar un valor característico que sea aceptable en la mayoría de situaciones, por ejemplo 0.1 mm como propone Epanet para un primer cálculo estimativo.

## 4.4 Caracterización de las pautas de consumo de los abonados

### 4.4.1 Introducción

En este apartado se resume el procedimiento seguido para la obtención de la información acerca de las pautas de consumo de agua de los usuarios de una red urbana. Dicha información servirá para cargar los modelos de simulación comentados anteriormente. La combinación de ambas informaciones (escenario hidráulico del tramo y la información acerca de la demanda de agua en instalaciones interiores), convenientemente asociadas, puede utilizarse para construir modelos de simulación que representen el comportamiento real en un tramo de red y, a partir de la simulación de los mismos, aportar una aproximación a la respuesta que se podría esperar del sistema.

Dado un modelo hidráulico de un tramo, es preciso fijar los consumos en cada una de las viviendas que integran cada edificio conectado a éste. Se trata por tanto de utilizar, para la carga del modelo hidráulico, datos de viviendas reales para “alimentar” los edificios hipotéticos del tramo. Nótese que este procedimiento es diferente al que comúnmente se viene realizando, donde se acude a datos de consumo mayorados de viviendas tipo, cuya respuesta garantiza un margen de seguridad sobre las exigencias reales del tramo.

La etapa previa a la caracterización de las pautas de consumo es la generación de una base de datos que concentre toda la información organizada de los consumos de las viviendas. Los datos de consumo utilizados han sido obtenidos en diferentes campañas de mediciones, éstas se realizaron en el marco del Proyecto *Propuestas metodológicas para el cálculo de la vida útil de los contadores de agua en un abastecimiento (DPI2000-0657)*. En el Anejo III. Procedimiento para la caracterización de las pautas de consumo, se puede comprobar los pasos seguidos hasta la creación de la base de datos de consumo, así como la estructura interna de la misma.

Respecto a la caracterización de las pautas de consumo de usuarios domésticos, ésta trata de identificar el modo con el que los abonados demandan agua en sus instalaciones particulares. Concretamente, interesa conocer cuál es la demanda media que puede darse en una vivienda en una determinada hora de consumo, así como la distribución temporal del consumo durante los intervalos que forman dicha hora.

El primero de los conceptos (demanda media en una hora) identifica cuántos litros suelen ser demandados en una hora por una vivienda. Para su determinación, se acude a la base de datos de consumos reales de viviendas comentada anteriormente, realizando una consulta entre las viviendas con mismas características, y se obtiene el valor promedio de la demanda horaria en las viviendas. Posteriormente, se seleccionará el valor del consumo medio más indicado para representar la demanda de agua horaria en una vivienda.

Por otro lado, la caracterización de la demanda trata de identificar la distribución de los consumos en la hora de suministro. En el caso de analizar una determinada hora de suministro, esta evolución temporal, convenientemente discretizada, podría mostrar los instantes concretos en los que se realiza el consumo por parte del abonado, e incluso identificar los aparatos concretos que se están alimentando (identificación de los pulsos de consumo doméstico).

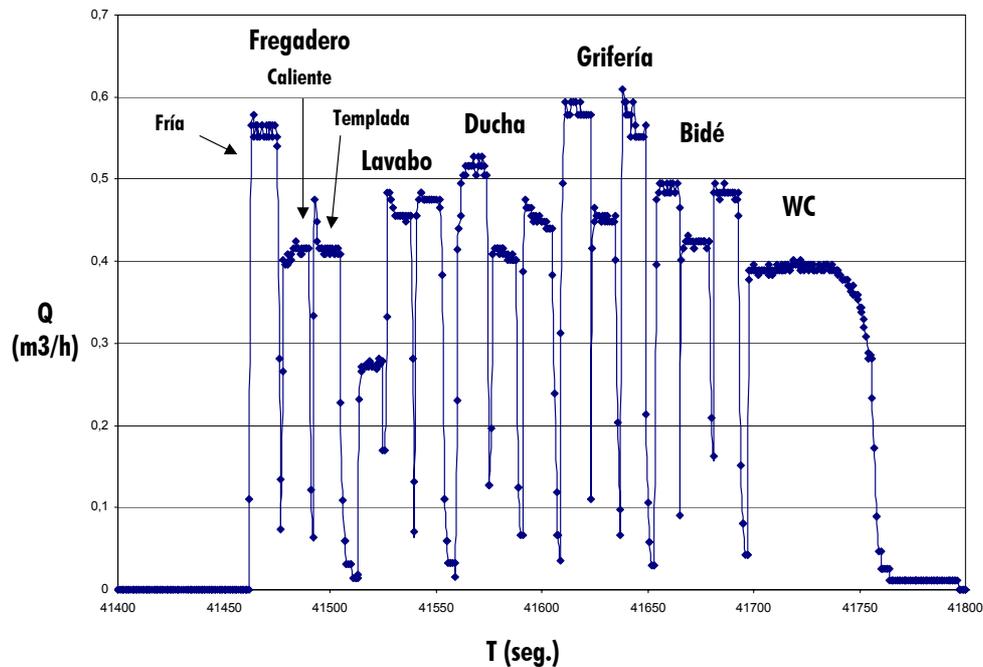


FIGURA 5. INSTANTES DE CONSUMO EN UNA DETERMINADA VIVIENDA PARA UNA HORA DE SUMINISTRO.

A continuación se muestra las consideraciones tomadas para la obtención de la demanda media horaria, junto con la distribución de los consumos en el mismo periodo. Dichos datos serán utilizados posteriormente para la carga de los modelos hidráulicos que representen el comportamiento real de un tramo y, cuya simulación aportará información acerca de las exigencias previsibles de un tramo de red de similares características.

#### 4.4.2 Obtención de la demanda media por hora

Una de las variables que representa el consumo en una vivienda se corresponde con el volumen medio consumido por hora. Este valor será el valor de referencia que se cargará a cada una de las viviendas de la red, de forma que el consumo total en una simulación será el sumatorio del número de viviendas de la red multiplicado por el consumo medio de una vivienda por hora.

De esta forma, si para una vivienda se superpone una curva de modulación real, obtenida a partir de las mediciones realizadas mediante equipos de adquisición de datos, y el consumo medio real en una hora de una vivienda, se obtendrá un comportamiento muy parecido al real, de forma que, mediante la simulación del mismo, se conseguirán valores de presiones similares a las originadas en la red.

Una vez procesados los datos y, teniendo en cuenta que mediante el presente trabajo se intenta simular el comportamiento real de una red de agua bajo condiciones de funcionamiento exigentes, se determina en qué intervalo de tiempo se origina una mayor demanda por parte de los usuarios, junto con el valor del consumo promedio correspondiente a ese intervalo.

Para la obtención de la demanda media horaria se debe obtener la curva de modulación promedio que represente a la mayoría de las viviendas de que integran la base datos, e identificar aquel o aquellos periodos en los que la curva toma valores más elevados. Se trata del patrón de consumo de las viviendas que forman la tabla de la base de datos de consumos generada. Este patrón representará el comportamiento medio de todas las viviendas de propiedades similares (mismo tipo de instalación interior, mismo tipología de vivienda, etcétera) a lo largo del día.

El resultado de la consulta de la base de datos es una tabla en la que aparecen para cada una de las horas, el consumo medio de las viviendas consideradas. La siguiente gráfica muestra la representación de la curva de modulación de las viviendas de la base de datos:

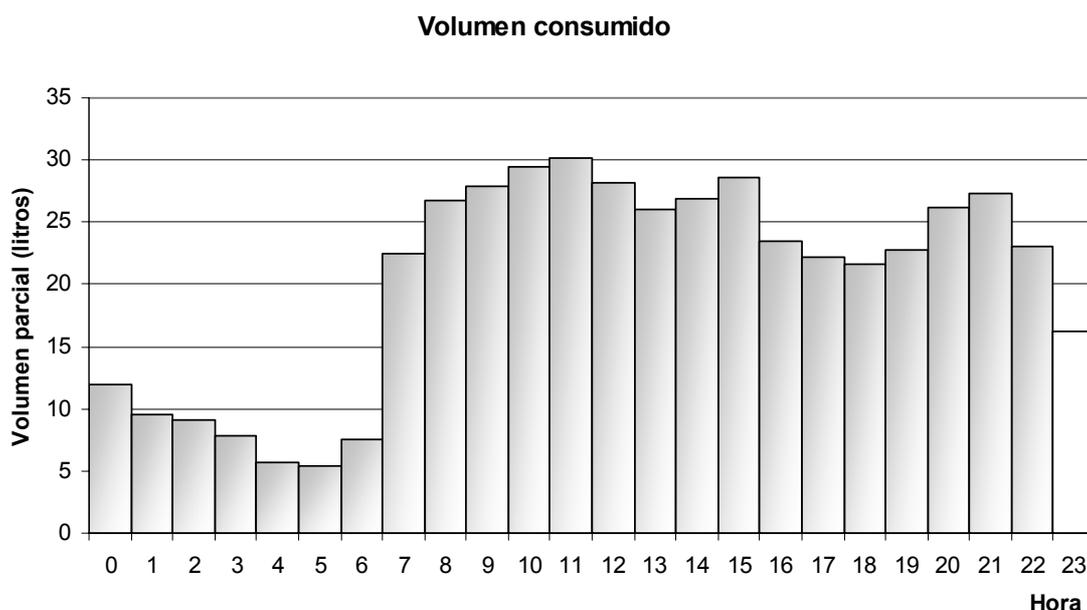


FIGURA 6. CURVA DE MODULACIÓN DE LA DEMANDA DE LAS VIVIENDAS DE LA BASE DE DATOS.

Como se observa en la gráfica anterior, el mayor consumo se da a las 11 de la mañana, siendo el consumo medio por vivienda para esta hora de aproximadamente 30 litros. Por otro lado, se observa que el consumo para el resto de horas está muy laminado, de forma que la tendencia de consumo se mantiene durante un periodo de tiempo considerable (a partir de las 7 de la mañana, los volúmenes consumidos están comprendidos entre 20 y 30 litros por hora).

Para la carga del modelo hidráulico construido se tomará una demanda en torno a 30 litros por hora para cada una de las viviendas que formarán parte de los edificios del tramo. Recuérdese que se trata de simular el comportamiento de un

tramo de red formado por viviendas durante la hora más exigente de funcionamiento.

#### 4.4.3 Discretización de la demanda horaria

Como se ha comentado, para representar el comportamiento de las viviendas de un tramo, además de utilizar los datos de consumo promedio en una hora de funcionamiento, es necesario considerar la distribución de la demanda durante la hora de consumo. Por ejemplo, el ritmo con el que los abonados consumen agua marcará el instante de arranque de un grupo de bombeo, considerándose por tanto, la posible simultaneidad en los usos.

Derivado de la Figura 5, en la que se mostraba la ocurrencia de usos en una determinada vivienda para una hora de suministro, la siguiente figura muestra la posible simultaneidad en la demanda de agua de un conjunto de viviendas de un edificio.

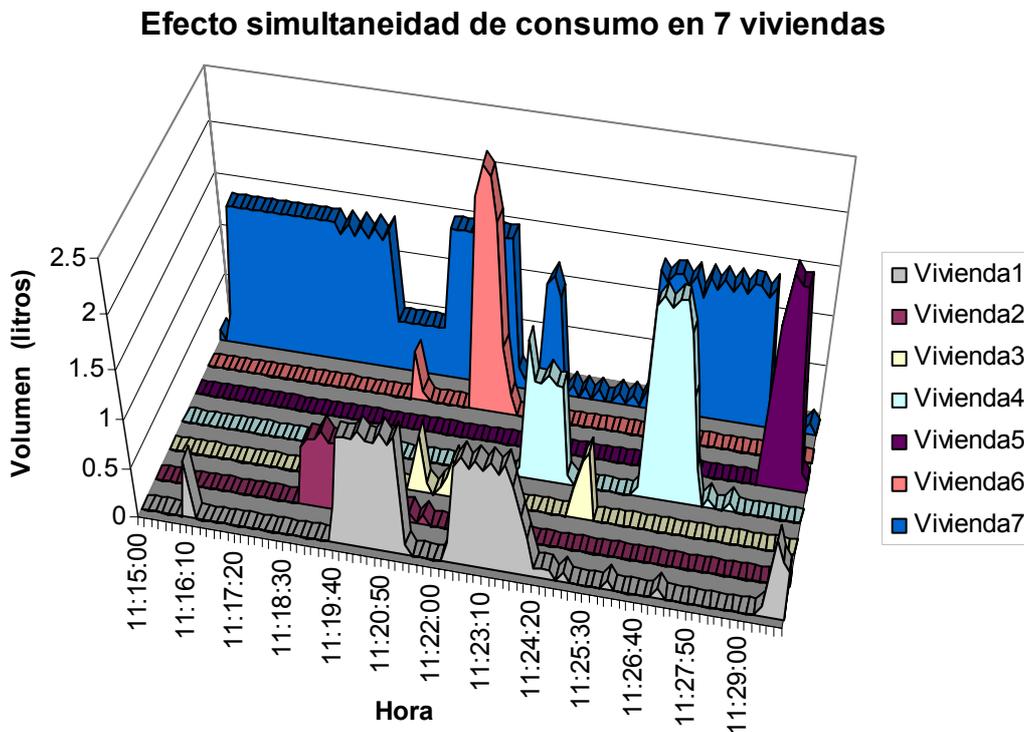


FIGURA 7. INSTANTES DE CONSUMO EN UN CONJUNTO DE VIVIENDAS PARA UN INSTANTE DE SUMINISTRO.

Como se muestra en la figura anterior, la ocurrencia de consumos en cada una de las viviendas sigue un comportamiento estocástico, sin que se pueda construir una distribución tipo que pueda representar al conjunto de viviendas. Por este motivo, la forma de mantener el comportamiento real del consumo de viviendas, parte de la utilización directa de las distribuciones de consumo de cada una de las viviendas, de forma que, para un edificio del tramo conectado en una determinada acometida y formado por un conjunto de viviendas, la distribución que se le asignará a cada vivienda, se obtendrá a partir de los datos particulares de una de las viviendas integrantes de la base de datos.

Puesto que la demanda promedio en una hora, se ha obtenido a partir de los valores más exigentes de la Figura 6, concretamente se consideró que el valor de la demanda está en torno a los 30 litros por hora, es necesario limitar las horas que pueden ser asignadas a una vivienda para la utilización de dichos datos. Nótese, que en horas nocturnas la demanda de agua es muy baja, y los instantes de uso son muy limitados. Por ello, los registros que se carguen en el modelo, deben corresponder a horas con mayor demanda, de forma que el comportamiento del tramo se ajuste en mayor medida a la respuesta real.

Como se observó en la Figura 6, hay un periodo del día en el que los valores promedios de consumo no son muy dispares, concretamente el comprendido entre las 7 de la mañana y las 12 de la noche, periodo durante el cual el consumo medio se mantiene en valores similares, y además, las condiciones son las más exigentes del día. De esta forma se consigue además mantener más datos en la tabla de consumos, ya que las horas eliminadas (periodo entre las 12 de la noche y las 7 de la mañana) representan una pequeña proporción del día.

La siguiente gráfica muestra los consumos en cada una de las horas comprendidas dentro del periodo de trabajo:

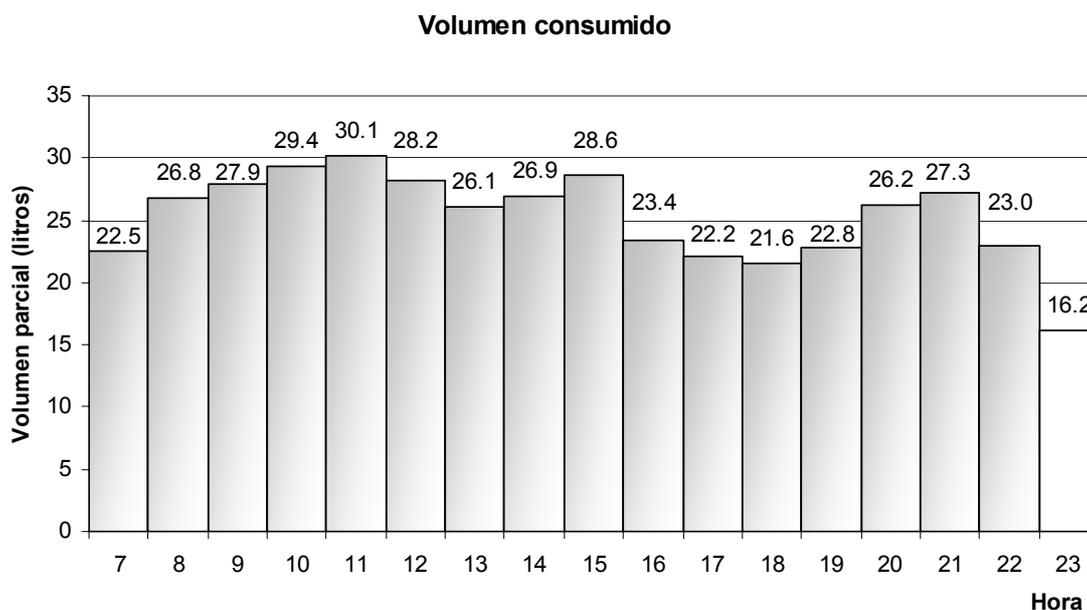


FIGURA 8. VOLUMEN CONSUMIDO EN EL PERIODO SELECCIONADO.

Por tanto, cuando se carguen los modelos hidráulicos del tramo, se utilizarán los siguientes datos:

- Consumo medio en una hora en torno a los 30 litros
- Distribución de consumos en una hora a partir de los registros cada 10 segundos de las viviendas de la base de datos, para el intervalo horario comprendido entre las 7 de la mañana y las 12 de la noche.

## **4.5 Desarrollo de las simulaciones**

### **4.5.1 Introducción**

Una vez construidos los modelos hidráulicos, tanto el correspondiente al tramo de red, como los modelos para las diferentes tipologías de instalaciones interiores, así como las consideraciones relativas a la demanda de agua en dichas instalaciones, es posible integrar toda la información, a partir de diferentes modelos de simulación.

Para ello, se utilizan módulos de programación que contienen el modelo matemático de cada uno de los elementos que componen el tramo de red. Al tratarse de módulos de programación, las principales características de cada uno de ellos pueden ser fácilmente modificadas, pudiendo modelar un mismo tramo de red bajo diferentes características constructivas. Esta propiedad presenta gran utilidad cuando se pretende analizar la respuesta de un tramo de red, ya que es posible comprobar dicha respuesta cuando se modifican algunas de sus propiedades básicas, y analizar la influencia de cada una de ellas en el comportamiento global del sistema.

Por otro lado, se dispone de la base de datos de consumos. En ella se almacenan datos de consumo de viviendas con elevada resolución (el intervalo entre registros es de 10 segundos). Para las simulaciones se accede a la base de datos, y se asigna, para cada una de las viviendas que forman el tramo de red, los datos de consumo de una de las pólizas de la base de datos. Una vez cargados los consumos de cada una de las viviendas que forman parte del tramo, es posible simular el comportamiento del mismo. Para ello se utiliza el programa Epanet, aportando una aproximación a la respuesta hidráulica real esperado en el tramo de red.

La posterior manipulación de los resultados de las simulaciones permitirá analizar las variables que mayor influencia presentan en la respuesta hidráulica del tramo, y la determinación de las posibles actuaciones para evitar una reducción significativa de los valores de presión disponible en los puntos de consumo.

A continuación se detalla el procedimiento seguido hasta la obtención de los resultados de simulación junto con las principales características básicas de los bloques de simulación.

### **4.5.2 Descripción del procedimiento de análisis**

Para el estudio se ha utilizado la plataforma *Toolkit* de Epanet. Esta plataforma permite simular la respuesta hidráulica de un esquema de red convenientemente programado, así como modificar las principales variables que definen éste, tal como el diámetro de las conducciones, las longitudes, los consumos, etcétera.

El primer paso ha sido construir el modelo hidráulico que representa el comportamiento del tramo. Éste se ha implementado en un fichero de texto propio de Epanet (*fichero INP*). En él se define de forma precisa cada uno de los elementos que integran el sistema junto con las características geométricas e hidráulicas de éstos. Como se mostró en capítulos anteriores, los puntos de suministro se representan como nudos de la red y se corresponden con puntos de consumo o acometidas de las instalaciones de los usuarios. El nudo de entrada de alimentación se ha programado como un embalse a nivel constante, de forma que garantiza un nivel de presión fijo a la entrada del tramo. El nudo final se corresponde con el nudo de control, y será el punto donde se controle la presión que aproximadamente se da en la acometida más desfavorable del tramo.

Una vez creado el fichero, se debe programar el comportamiento de cada acometida, y asociarlo al nudo correspondiente del modelo. Nótese, que en el modelo descrito anteriormente sólo se implementan los nudos que representan las acometidas, pero debe considerarse además el comportamiento aguas abajo de ésta, desde la instalación general del edificio, hasta los puntos de consumo del abonado. Para ello se programan una serie de módulos en Visual Basic encargados cada uno de ellos de realizar una tarea. Por un lado se trata de obtener la información de los consumos, accediendo a la base de datos que ha sido previamente creada. Dicha información es posteriormente incorporada en el modelo hidráulico de tramo (que agrupa el modelo de la instalación junto con el modelo del tramo) y, una vez cargado dicho modelo, se simula a partir de la plataforma de cálculo Epanet, y se obtiene la respuesta hidráulica del tramo. Dicha respuesta, materializada en las pérdidas de presión que se originan en el tramo, es posteriormente almacenada en otra tabla de la base de datos, para finalmente analizar la respuesta bajo cada escenario de simulación.

#### **4.5.3 Bloques del módulo de simulación**

El módulo del simulador está formado por 5 bloques bien diferenciados; el primero de ellos se encarga de acceder a la base de datos de consumo y seleccionar datos de viviendas, los tres siguientes se encargan de programar cada una de las instalaciones tipo que se van a simular, y el último de ellos se encarga de almacenar convenientemente los resultados de las simulaciones.

A continuación se comentará la estructura de cada uno de ellos:

- Bloque de obtención de medidas de consumo
- Bloque para la implementación de la tipología I
- Bloque para la implementación de la tipología II
- Bloque para la implementación de la tipología mixta
- Bloque para la presentación de los resultados

#### *4.5.3.1 Bloque de obtención de medidas de consumo*

Este bloque trata de adquirir los datos reales de consumo a partir de los registros almacenados en la base de datos del sistema.

Para ello, accede aleatoriamente a un registro, identificado por un número de póliza, una fecha y un instante del día determinado (en periodos de 10 segundos), posteriormente recoge todos los datos correspondientes a una hora de consumo, en total 360 registros y los almacena en una matriz para una determinada vivienda y para un determinado nudo de la red. Como se ha comentado anteriormente, la hora seleccionada está comprendida entre las 7 de la mañana y las 12 de la noche, ya que se trata del periodo con mayor demanda.

Procediendo de forma análoga, es posible generar una matriz que contiene todos los datos de consumo en intervalos de 10 segundos de varias viviendas elegidas aleatoriamente de la base de datos y para diferentes horas del día (dentro periodo indicado anteriormente). De forma que finalmente se dispone de datos reales de viviendas almacenadas en la base de datos, de diferentes horas y días.

Estos datos de las viviendas reales, obtenidos de la base de datos de consumo, son los que se asignarán a cada una de las viviendas en los modelos de simulación. Recuérdese, que dichas viviendas pertenecerían a hipotéticos edificios conectados a los nudos del tramo de red. Por tanto, con este módulo se obtiene datos de consumo para cargar posteriormente los módulos que representan el comportamiento hidráulico del tramo.

Del mismo modo también se almacena el volumen total consumido en cada uno de los nudos, a partir del sumario de consumos totales de las viviendas correspondientes, volumen que servirá para calcular los correspondientes factores de las curvas de modulación en cada uno de los nudos.

#### *4.5.3.2 Bloque para la implementación de la tipología I*

Este bloque trata de asignar los datos reales de consumo almacenados en la matriz identificada anteriormente, siguiendo la respuesta analizada para la instalación Tipo I. Según esta variante, todo el caudal suministrado a las viviendas conectadas al nudo de la red se realiza en directo, es decir, sin la interposición de ningún elemento de almacenamiento ni bombeo.

Para ello, el módulo calcula cada uno de los factores tal como se estableció en el apartado de descripción de la Tipología I (Descripción de las instalaciones generales de los abonados), y posteriormente, asigna los datos de consumo a cada uno de los nudos del tramo de red.

Para este propósito, el módulo de Access utiliza la plataforma de Toolkit (módulo de programación de Epanet), de forma que, a partir de un fichero auxiliar INP (fichero de datos característico de Epanet) generado previamente, es capaz de modificar todos los parámetros hidráulicos de la red sin necesidad de ejecutar el programa. En este sentido, se utiliza una de las herramientas para la modificación de los parámetros característicos del nudo, tal como la demanda base y la curva de modulación. De tal forma que es posible modificar la demanda media por nudo y establecer un valor que se ajuste a las condiciones de funcionamiento buscadas.

Por ello, se asigna a cada nudo una demanda media ( $dm$ ) equivalente al consumo de  $n$  viviendas ( $N_{viv}$ ) en una hora de suministro. Ésta se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$dm_j = \frac{K_c \cdot N_{viv} \cdot q_m}{3600} \quad \forall j = 1 \dots N - 2 \quad \text{Ec. 10}$$

Siendo:

- $q_m$  el consumo medio por vivienda determinado en el apartado *Obtención de la demanda media por hora*, en el que se fijaba un valor medio para una hora de consumo en torno a los 30 litros.
- $K_c$  es un factor para el ajuste de la demanda, por si se quiere establecer un margen de seguridad para mayorar las exigencias del tramo.
- $N$  es el número de nudos del tramo de red (tal como se comentó en el apartado dedicado a la construcción del modelo del tramo, se asigna consumo a todos los nudos menos a dos; el nudo de entrada y el nudo de salida de la red; el primero de ellos se trata del punto de alimentación y el segundo el nudo de control de la presión).

La instrucción utilizada en Toolkit para la actualización de la demanda de cada uno de los nudos de la red es *ENsetnodevalue*, y el código tiene la siguiente estructura:

*ENsetnodevalue nudo, EN\_BASEDEMAND, dm*

Para el último nudo de la red se procede de forma similar, pero en este caso al valor de la demanda se le asigna un valor constante que tenga en cuenta las pérdidas debidas a fugas o a otros caudales circulantes tal como se comentó.

Por otro lado, se debe asignar los factores de modulación que tengan en cuenta cómo se distribuye la demanda en el nudo en cada uno de los intervalos de simulación. Para ello, se modifica directamente los valores de la curva de modulación del fichero auxiliar, utilizando la instrucción *ENsetpatternvalue*, siendo la identificación de la curva la misma que la del nudo asociado.

El formato de la instrucción utilizada para la actualización de los factores de la curva de modulación (correspondientes a cada intervalo de 10 segundos) para cada uno de los periodos de análisis  $k$  es:

ENsetpatternvalue curva,  $k$ , Factor

Como se especificó en la descripción de la instalación Tipo I, cada uno de los factores de la curva de modulación correspondientes a cada uno de los  $k$  periodos incluidos en la hora de simulación, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$f_{cm\_I}(t) = \frac{\sum_{i \in N_{viv}} q_i(t)}{Q_T} \quad \forall t = 1 \dots N_{fact} \quad \text{EC. 11}$$

Siendo  $Q_t$  el caudal total consumido en el nudo durante todo el periodo,  $q_i$  el valor del caudal consumido por cada una de las viviendas ( $N_{viv}$ ) en el periodo  $t$  y  $N_{fact}$  el número de intervalos del análisis (360 para simulaciones de una hora de duración con datos en intervalos de 10 segundos).

Nótese que no ha sido necesaria la modificación del resto de parámetros de la red, tal como el número de nudos, longitud y diámetro de las conducciones, entre otros. Esto es debido a que previamente ha sido creado un fichero INP (fichero auxiliar) con la estructura propia del tramo de red a modelar. Este tramo se simulará bajo diferentes situaciones de demanda y bajo diferentes tipologías de instalación y, una vez realizado el ciclo de simulaciones se irá modificando cada uno de los parámetros de la red con la finalidad de estudiar también cómo afectan en la evolución de la presión, otros parámetros propios de la instalación, como pueda ser, la longitud o diámetro de las conducciones.

#### 4.5.3.3 Bloque para la implementación de la tipología II

De la misma forma que el caso anterior, se parte de una matriz con los datos de consumo de cada una de las viviendas para cada uno de los periodos y para cada uno de los nudos de consumo del tramo de red.

A diferencia de la tipología anterior, en esta variante existe un elemento que altera la demanda de agua en cada uno de los nudos, ya que existe un grupo de bombeo y un calderín que almacena el agua a presión, anulando en algunos instantes la demanda de agua a la red aunque los usuarios estén consumiendo.

Por tanto, en todo momento la demanda de agua a la red será función del volumen acumulado en el calderín y el ciclo de operación del grupo de bombeo, tal como se presentó en la descripción de la tipología. Para simular tal comportamiento se ha partido del cálculo del volumen de regulación del calderín según establece la NIA, siendo éste función del caudal de bombeo necesario para la alimentar a la instalación general y de la presión de parada de la bomba.

Por otro lado, el valor del volumen inicial en el interior del calderín para el instante de arranque de la simulación, se determina de forma aleatoria, ya que se estima que es la forma que más se ajusta al comportamiento real de dicho elemento.

Para cargar el modelo matemático con las demandas generadas se procede de manera similar al apartado anterior, con la única salvedad de que será necesario contabilizar el volumen de agua en el interior del calderín en cada instante para determinar si es necesario arrancar el grupo de bombeo para rellenar el acumulador, o mantener la bomba parada.

#### *4.5.3.4 Bloque para la implementación de la tipología mixta*

Como se ha comentado anteriormente, esta tipología es una combinación de las dos tipologías anteriores. De forma que, para cada uno de los periodos de análisis habrá viviendas que se suministren de forma directa de la red, mientras que otras seguirán el comportamiento característico de la tipología II, interponiendo entre el nudo principal de consumo y las viviendas un grupo de bombeo con acumulador.

Para determinar el número de viviendas suministradas en directo y con bombeo, se estima una proporción entre ambas variables inicialmente. Esta proporción podrá modificarse para adaptarse a cualquier instalación sin más que variar en el módulo la relación establecida entre las dos variables.

#### *4.5.3.5 Bloque para la presentación de los resultados*

Este módulo de simulación trata de gestionar los resultados de las simulaciones anteriores, almacenando en una tabla los valores de presión alcanzada en cada simulación junto con las características hidráulicas que definen la estructura del tramo de red.

El almacenamiento de todos los resultados y resto de información de las simulaciones, posibilitará posteriormente realizar consultas sobre dichas tablas, y tener accesible dicha información, ya que se considera que puede ser útil para completar futuras simulaciones con los módulos.

#### 4.5.4 Escenarios simulados

La carga de consumo de cada uno de los nudos se realiza a partir de la interconexión de Epanet con la base de datos en la que se almacenan los consumos reales de viviendas en intervalos de 10 segundos (utilizando para ello uno de los módulos comentados anteriormente). La carga del modelo consiste en la asignación a cada uno de los nudos de consumo de un volumen total correspondiente al volumen de agua consumido por un número de viviendas impuesto en una hora (demanda próxima a 30 litros), y por una modulación temporal de la demanda resultado de la composición de las evoluciones temporales reales de las viviendas que integran la base de datos, siendo éstas aleatoriamente seleccionadas por la aplicación tal como se ha expuesto anteriormente.

Además de incorporar datos de consumo a cada una de las viviendas ficticias conectadas a los edificios del tramo, es posible modificar las características constructivas de los elementos de la red, y lanzar simulaciones para diferentes combinaciones de parámetros, cada combinación representa un escenario de simulación diferente y, por tanto, se dispondrá de información sobre la respuesta en cada uno de ellos. La modificación de los parámetros del tramo se realiza a partir de la variación del fichero de texto característico de Epanet (fichero auxiliar INP), también utilizando un módulo propio de programación.

La siguiente tabla resume los valores utilizados de cada parámetro para elaborar los escenarios sobre los que se han realizado simulaciones en el estudio (un total de 200 simulaciones por escenario). Cada escenario está constituido como una combinación de los valores definidos en esta tabla:

TABLA 1.COMBINACIONES DE PARÁMETROS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS.

Nudos totales del tramo	Distancia nudos (m)	Viviendas por nudo	Demanda (l/h)	Diámetro (mm)
10	20-40	5-15-25-35	25-35	79-96-110-123-141-158
15	20-40	5-15-25-35	25-35	79-96-110-123-141-158
20	20-40	5-15-25-35	25-35	79-96-110-123-141-158

El campo *nudos* representa el número de nudos del tramo de red. Recuérdese que del total de nudos hay dos que no son de consumo (el nudo de entrada y el nudo de control), es decir, se corresponde con el número de acometidas o edificios del sistema más dos.

Para la *distancia entre nudos* se han tomado dos valores; edificios separados 20 metros y edificios separados 40 metros. Este valor está directamente relacionado con la longitud de la conducción total del tramo.

El número de *viviendas de cada nudo* indica el tamaño del edificio, para ello se han construido edificios de sólo 5, 15, 25 y 35 viviendas, rango de valores usuales en edificios reales de viviendas tipo piso.

La demanda media de cada una de las viviendas de los edificios varía entre 25 y 35 litros por hora, valor que deriva de las conclusiones obtenidas de la gráfica de la Figura 8, de la que se obtenía un consumo promedio máximo por viviendas y hora de aproximadamente 30 litros.

Respecto al campo *diámetro*, se ha tomado una gama comercial de conducciones de polietileno, con valores de diámetros interiores comprendidos entre 79 y 158 mm. De esta forma, se obtendrá la respuesta de un mismo tramo de red en el que únicamente se varía el diámetro de la conducción principal que lo forma.

#### 4.5.5 Simulación de los modelos

Una vez cargados los nudos de consumo del modelo y junto con las características constructivas de la red, se procede a la simulación del tramo en intervalos de 10 segundos, obteniendo para cada uno de los periodos y, hasta completar una hora de simulación, la presión que se origina en el nudo más desfavorable del tramo (nudo más alejado del nudo de alimentación), de forma que, para cada simulación se obtienen 360 valores de presión correspondientes a una determinada hora de suministro, almacenándose el valor máximo, mínimo y medio alcanzado durante dicha hora.

Repitiendo este procedimiento de forma independiente, se realizan total de 200 simulaciones para una misma carga, diámetro de conducción y esquema de tramo de red. El resultado final de la simulación estará caracterizado por el diámetro del tramo y el resto de parámetros hidráulicos de éste, y los valores de presión máxima, media y mínima alcanzados en la simulación.

Extendiendo el procedimiento anterior es posible obtener resultados para otros modelos de tramo de red y diferentes cargas (valores incluidos en la tabla anterior), de forma que se consiga una relación entre la carga del tramo, parámetros constructivos del modelo, y las pérdidas de presión derivadas del suministro.

Para la obtención de las presiones en el nudo final de la red se ejecuta el modelo de cálculo hidráulico de Epanet para cada uno de los periodos de análisis, utilizando para ello la siguiente instrucción de Toolkit:

*ENgetnodevalue nudo, EN\_PRESSURE, presion*

Esta instrucción devuelve el valor de la presión en el nudo de control para cada uno de los 360 periodos que integran la hora de simulación, y aproxima el valor de presión real que se daría en la acometida más desfavorable del tramo.

Una de las consideraciones más importantes realizadas en el módulo general del simulador de presiones, es analizar el valor de dicha variable para una misma situación de consumos, es decir, una vez que se determinan los volúmenes consumidos por cada una de las viviendas asociadas a cada nudo de consumo, se procede a simular la respuesta de la red bajo cada una de las tipologías consideradas: suministro en directo o a partir de grupo de velocidad variable (Tipología I), suministro a partir de grupo de velocidad fija (Tipología II) y una combinación de suministro a partir de grupo de velocidad fija y suministro en directo (Tipología mixta), de forma que se analizará cada una de las variantes para una misma composición y estructura de consumos.

#### 4.6 Presentación de resultados

Las variables que se almacenan para cada una de las simulaciones son la presión máxima, mínima y media de cada una de las tipologías de instalaciones, junto con las características constructivas que identifican cada escenario de tramo de red. En las instalaciones que cuentan con grupo de bombeo, además se almacena una variable que hace referencia a la simultaneidad en el arranque de las bombas asociadas a cada nudo, este parámetro aportará información acerca de la posibilidad real de arranque de un determinado número de bombas de un tramo, y la influencia sobre la presión mínima alcanzada, y se podrá comprobar que, para instantes de elevada simultaneidad en el arranque de equipos, las presiones en el nudo final toma valores próximos al rango de presiones más bajas de la simulación.

Todos los datos de cada escenario son almacenados en una tabla de la base de datos, de forma que se podrán realizar fácilmente consultas para el análisis del escenario. El nombre de la tabla es el identificativo del escenario, y los campos hacen referencia a la presión máxima, media y mínima para cada una de las tipologías de suministro comentadas anteriormente (Tipo I es E1, Tipo II es E2 y Tipo mixto es E3).

La siguiente tabla muestra un extracto de una de las tablas de resultados:

simulacion 10 20 25 60 25 5 20/09/2006 1:29:36 : Tabla											
simulacion	p max E1	p med E1	p min E1	p max E2	p med E2	p min E2	p max E3	p med E3	p min E3	simultaneidad	simultaneidad
1	29.53847	29.12204	28.27929	29.84016	28.43753	18.80671	29.5961	28.3517	16.10254	2	4
2	29.52118	29.12474	28.52058	29.84016	28.54421	18.80671	29.64249	28.29932	21.53965	2	3
3	29.51933	29.11411	28.03911	29.84016	28.4738	17.63676	29.70929	28.2646	21.09122	3	3
4	29.44059	29.12386	28.54178	29.84016	28.50623	15.53585	29.67267	28.32062	20.59715	3	3
5	29.49859	29.12499	28.38594	29.84016	28.4299	19.85717	29.67369	28.11127	19.90712	2	3
6	29.46062	29.1235	28.37526	29.84016	27.90087	3.972571	29.63774	28.31316	20.24478	4	3
7	29.47986	29.12503	28.65734	29.84016	28.27431	14.82593	29.62395	28.27475	17.40616	3	3
8	29.43951	29.12238	28.49693	29.84016	28.44537	13.31545	29.65055	28.45703	20.77886	3	3
9	29.41269	29.12599	28.62246	29.84016	28.41782	14.3669	29.62355	28.18485	22.00457	3	3
10	29.56106	29.11946	28.45792	29.84016	28.45864	15.53585	29.70152	28.63811	23.52047	3	2
11	29.5507	29.12541	28.46242	29.84016	28.462	19.27219	29.62734	28.2942	22.87126	3	3
12	29.40368	29.1258	28.63339	29.84016	28.46418	16.9214	29.67989	28.24521	22.43659	3	3
13	29.45774	29.12269	28.39536	29.84016	28.35832	12.14005	29.66194	28.3549	19.81188	3	3
14	29.44173	29.12435	28.63322	29.84016	28.40939	19.85717	29.65078	28.47395	23.82218	2	2
15	29.4503	29.12639	28.61267	29.84016	28.31825	14.82593	29.62404	28.01244	16.0013	3	5
16	29.45723	29.125	28.63892	29.84016	28.52949	19.85717	29.62665	28.23958	19.12492	2	3
17	29.44636	29.1272	28.70926	29.84016	28.49347	10.51288	29.69993	28.32991	20.02065	4	3

FIGURA 9. EXTRACTO DE LA TABLA DE RESULTADOS DE UN DETERMINADO ESCENARIO DE TRAMO DE RED.

Como se observa en el título de la tabla, ésta corresponde con una instalación de 10 nudos, 8 de ellos de consumo, con tramos de tubería entre nudos de 20 metros de longitud, 25 viviendas conectadas a cada nudo de la red, la conducción es de 60 mm en todos sus tramos, el caudal de salida del último nudo es el correspondiente para establecer una velocidad del agua de 0.5 litros por segundo (independientemente del caudal demandado por los nudos). Los últimos campos se corresponden con la fecha y la hora de simulación, y sólo tiene utilidad para la gestión de las tablas de resultados.

Realizando todas las combinaciones de parámetros especificadas en la Tabla 1, se obtienen tablas como la mostrada anteriormente, el análisis de los resultados obtenidos bajo cada escenario aportará información acerca de la respuesta de cada tramo en función del diámetro o resto de variables.

## **5 RESPUESTA EN RÉGIMEN PERMANENTE**

### **5.1 Introducción**

El objetivo del trabajo de investigación es analizar, en régimen permanente, el efecto introducido en la red por el funcionamiento de los principales tipos de suministro que existen en las instalaciones generales de los abonados, simulando la respuesta real que podría darse en un determinado tramo de red de un abastecimiento.

El régimen permanente está caracterizado por la ausencia de los términos inerciales y elásticos en las ecuaciones fundamentales, de forma que únicamente se obtiene información acerca de la respuesta de la red cuando el flujo está completamente establecido. Para un intervalo de cálculo pequeño, como el empleado en el estudio ( $\Delta t = 10$  segundos), el modelo de simulación muestra la respuesta instantánea para cada periodo, como si se tratase de una superposición de diferentes fotografías estáticas del modelo.

Tradicionalmente, las tuberías se dimensionan, en lo que a diámetro o capacidad de transporte se refiere, considerando el estado estacionario del sistema más desfavorable, y, por ello, los modelos estáticos constituyen una herramienta útil en los procesos de dimensionado.

Por tanto, el estudio en régimen permanente realizado, es un paso anterior al estudio en régimen transitorio de la red, y muestra las exigencias mínimas de funcionamiento bajo cada una de las tipologías de suministro. En estudios posteriores, será necesario evaluar bajo qué condiciones de funcionamiento la respuesta en régimen permanente queda limitada, como el efecto introducido por el arranque brusco de grupo de bombeo de velocidad fija, y las consideraciones que se deberán tomar en tal caso.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio en régimen permanente, recuérdese que se trata de evaluar la respuesta de un tramo de red expuesto a demandas domésticas, aproximando el comportamiento real en el tramo a partir de la simulación de un modelo matemático que representa el tramo, vinculado dicho modelo a un conjunto de consumos de viviendas reales en intervalos de 10 segundos, que introducirían la información relativa a las pautas de consumo propias en este tipo de instalaciones.

Realizadas las correspondientes simulaciones (según la combinación de parámetros expuesta en la Tabla 1), se muestran los resultados obtenidos, junto con el análisis estadístico de los mismos, para finalmente establecer las principales conclusiones del estudio en régimen permanente.

## 5.2 Resultados de las simulaciones en régimen permanente

La variable representada para caracterizar la respuesta en cada simulación es la pendiente hidráulica en el tramo. Ésta ha sido evaluada para cada uno de los escenarios de simulación, establecidos éstos para cada una de las combinaciones de variables programadas (número de nudos del tramo, distancia entre nudos, número de viviendas por nudo...). La finalidad es caracterizar estadísticamente cada simulación mediante los parámetros que representen el valor medio junto con la dispersión correspondiente.

Como se ha comentado, cada simulación representa una hora de la simulación del comportamiento real en un tramo, establecido a partir de datos de consumo reales de viviendas. De los 360 periodos de una simulación, sólo se almacenan los valores de presión máxima, media y mínima alcanzados en el nudo más desfavorable, y posteriormente es obtenida la pendiente hidráulica correspondiente.

La siguiente figura muestra un extracto de los resultados obtenidos con los módulos de simulación:

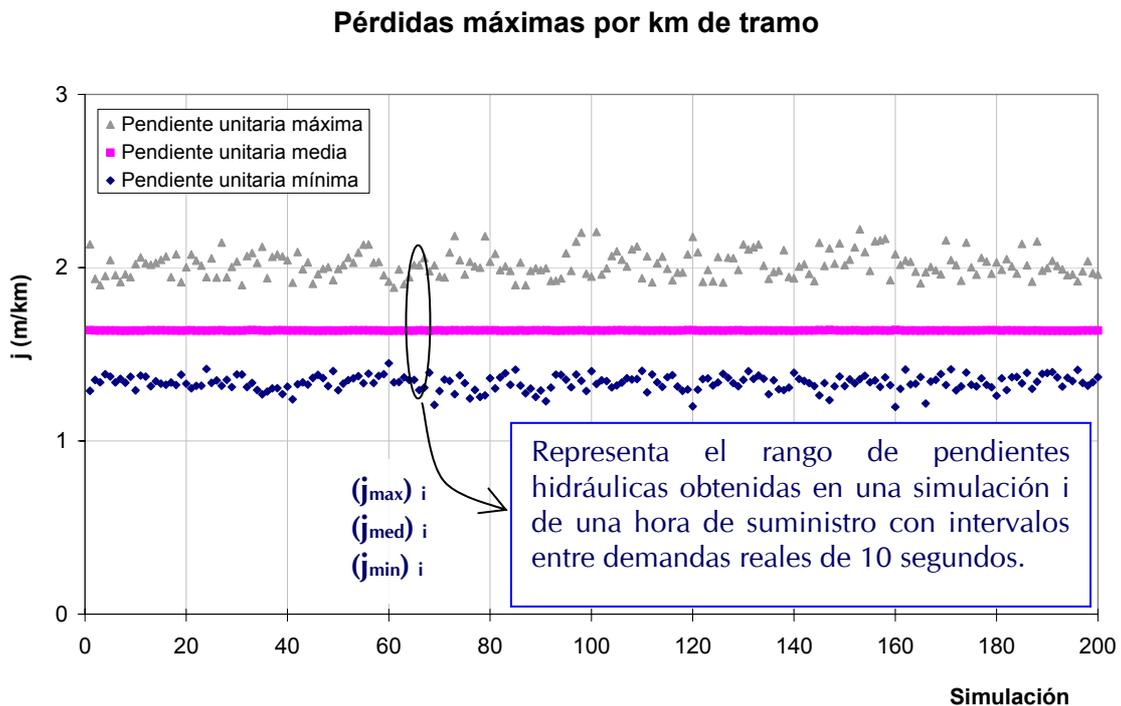


FIGURA 10. PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE LAS SIMULACIONES ( $P_{MAX}$ ,  $P_{MED}$ ,  $P_{MIN}$ ).

Los datos graficados se corresponden con la pendiente hidráulica máxima, mínima y media obtenida en cada una de las 200 simulaciones para una determinada carga y modelo de tramo.

Para una simulación concreta, con estos tres parámetros es posible incluir todos los resultados que se alcanzarían durante la hora de simulación correspondiente (recuérdese que la simulación parte de datos reales de consumos a intervalos de 10 segundos y, por tanto, para cada intervalo, se obtiene un valor de presión mínima que se alcanza en el punto más alejado del punto de entrada del fluido).

De las tres series graficadas (pendiente hidráulica máxima, media y mínima), la que interesa para determinar la capacidad de la red es aquella en la que la pendiente hidráulica toma valores más altos, y por tanto, es ésta la que presenta el resultado más significativo de cada simulación, de forma que, a la hora de trazar los rangos de variación, sólo intervendrá estos valores de  $j$ .

La siguiente gráfica deriva de la anterior, y sólo representa los valores de pérdida de carga unitaria máxima alcanzados en cada una de las simulaciones para una determinada carga y modelo de tramo.

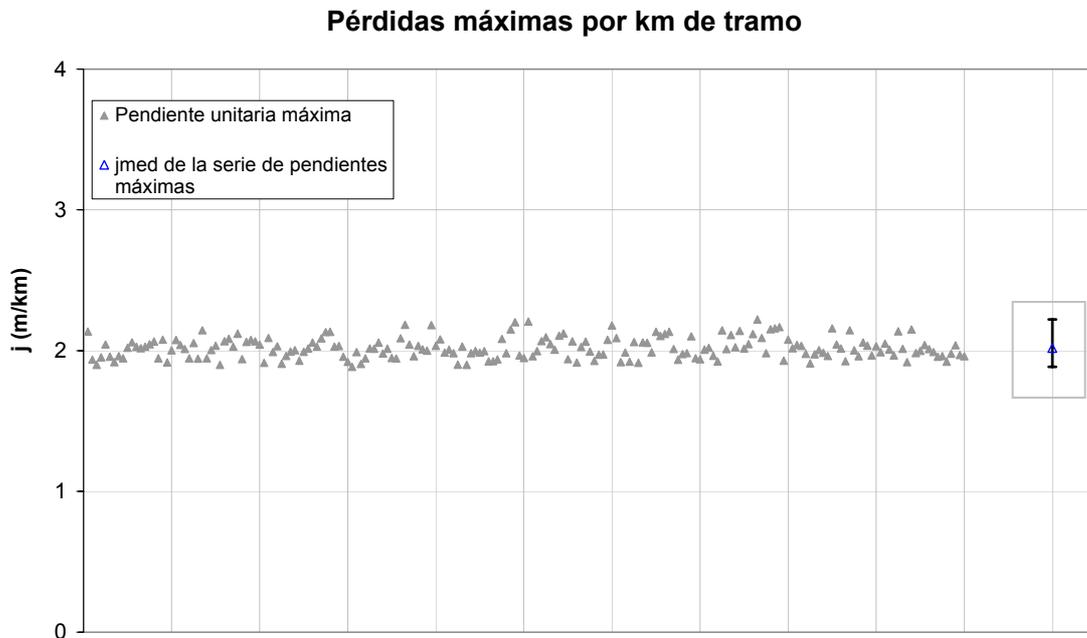


FIGURA 11. SERIE DE PÉRDIDAS UNITARIAS MÁXIMAS E INTERVALO DE VARIACIÓN DE LAS MISMAS.

Es posible caracterizar la serie anterior a partir de unos parámetros que tengan en cuenta el valor medio (valor promedio de las pendientes hidráulicas máximas que se originan para un escenario determinado) y la dispersión en los datos mediante funciones de probabilidad. La simplificación permitirá trabajar con menor volumen de datos sin que los resultados se vean alterados, ya que la consideración de la dispersión da una idea del rango de variación que alcanzan las presiones en cada uno de los conjuntos de simulaciones, y el valor medio de la pérdida unitaria máxima establece el valor con mayor frecuencia de aparición de la serie.

Si se representa, para el conjunto de simulaciones correspondientes a cada escenario de tramo, el promedio de las pendientes hidráulicas máximas, en función de la carga de consumo total en el tramo, se obtiene la siguiente gráfica:

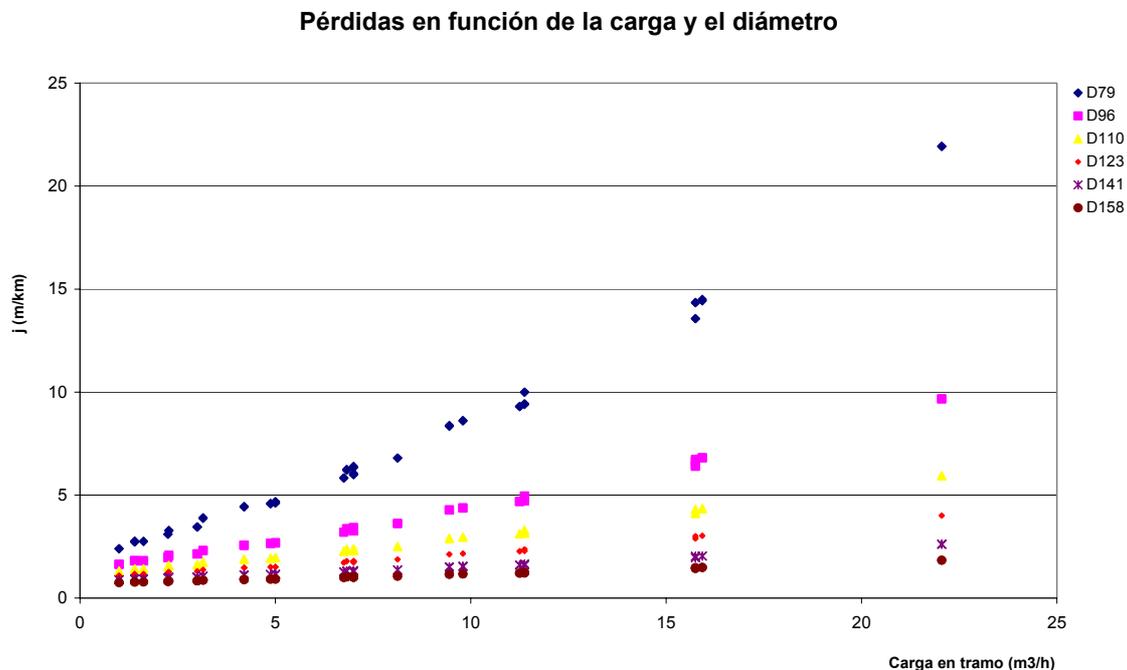


FIGURA 12. REPRESENTACIÓN DE LAS PÉRDIDAS UNITARIAS MEDIAS EN EL TRAMO EN FUNCIÓN DE LA CARGA TOTAL EN EL MISMO Y DEL DIÁMETRO DE LA CONDUCCIÓN CUANDO EL SUMINISTRO SE HACE EN DIRECTO O CON BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE.

En la gráfica anterior se ha relacionado un parámetro característico de la red (diámetro de tramo), frente a la carga total en el mismo y la pendiente hidráulica derivada del tramo suministrado. Cada uno de estos parámetros se ha obtenido tal como se describe a continuación:

- *Carga de consumo en tramo (m<sup>3</sup>/h)*: obtenida en función de la demanda media por vivienda, el número de viviendas por acometida, el número de nudos de consumo del modelo y el caudal saliente por el tramo. Todos estos parámetros adoptan los valores especificados en la Tabla 1. Tal como se comprobará posteriormente, la representación de la carga total por tramo independiza el resto de parámetros de los que depende, especialmente en el caso en que la demanda de agua se produzca a través de conexiones directas.
- *Pendiente hidráulica máxima  $j$  (m/km)*: obtenida a partir del valor medio de la pérdida de carga de cada serie de simulaciones y la longitud total del tramo (función del número de nudos o acometidas y distancia entre éstas).

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, existe una relación directa entre la caída de presión máxima esperada en el tramo y el diámetro de la conducción instalada en el mismo, de forma que para un mismo diámetro, todos los valores obtenidos para la pérdida de carga unitaria máxima siguen una función polinómica con elevada fidelidad, tal como se muestra en la siguiente figura:

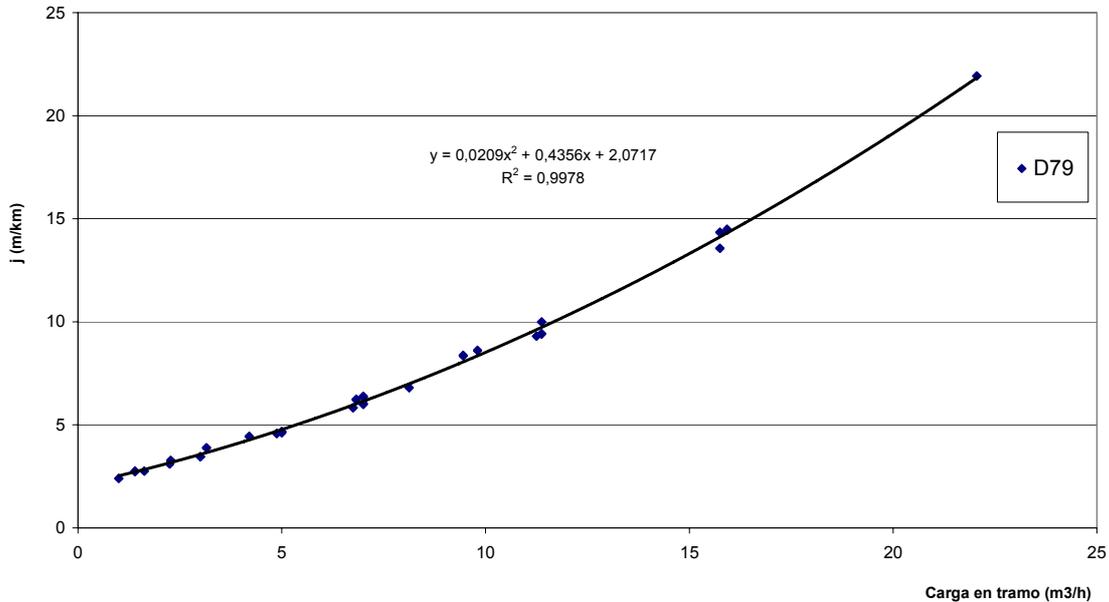


FIGURA 13. AJUSTE DE LA SERIE DE PENDIENTES HIDRÁULICAS MÁXIMAS PARA UNA TUBERÍA DE 79 MM.

Cada punto de la gráfica anterior representan los valores máximos de la pérdida de carga unitaria para el conjunto de 200 simulaciones de un diámetro de conducción de 79 mm. Es equivalente a decir que la probabilidad de ocurrencia de dicha pérdida de carga es de 10 segundos cada 200 horas con dicho nivel de carga. Por ello, en la práctica, la probabilidad de ocurrencia de dicha pérdida de carga es significativamente menor puesto que los niveles de carga de consumo utilizados en las simulaciones solamente aparecen puntualmente y a lo sumo una vez cada 24 horas.

En el Anejo IV. Pendientes máximas en régimen permanente (Tipo I y Tipo III), se muestran los ajustes gráficos de las pendientes máximas para cada uno de los diámetros analizados, bajo esquema de red Tipo I (suministro en directo) y Tipo III (suministro a partir de grupo de velocidad variable).

Llegado a este punto, resulta interesante obtener rangos de pérdidas de carga que pueden aparecer con una cierta probabilidad para un tramo concreto y una determinada carga de consumo. Dichas pérdidas de carga estarán incluidas dentro de un intervalo de confianza, interesando de dicho intervalo el extremo superior. Para calcular estos intervalos de confianza se debe proceder al análisis estadístico de cada serie de simulaciones, ajustándose cada una a una distribución de probabilidad, de forma que sea posible calcular los valores límite del mismo.

### 5.3 Análisis estadístico de los resultados en régimen permanente

Como se ha comentado, es preciso construir un intervalo en el que oscilará la pérdida de carga unitaria máxima correspondiente a un estado de carga para cada uno de los diámetros, de forma que se pueda asegurar que para dicha combinación de factores de tramo y un funcionamiento normal, no se alcanzarán caídas de presión superiores a las fijadas. Por tanto, es preciso caracterizar estadísticamente la serie de pérdidas de carga unitarias máximas y a tal efecto, interesa conocer a qué tipo de distribución se ajusta la serie de datos. Una vez ajustada a dicha distribución y, a partir de los estadísticos propios de la misma, será posible reducir la serie de datos a un valor medio y unos valores extremos, de forma que la pérdida de carga unitaria máxima esperada de una simulación para un estado de carga y unos parámetros de tramo, esté comprendida dentro del rango de valores con una probabilidad mayor a un determinado valor.

Tratando cada simulación como un proceso estocástico independiente e idénticamente distribuido, es posible describirla como una función de distribución de probabilidades *pdf* (probability distribution function). Para tal propósito se acude al histograma de frecuencias para una primera exploración de los datos, siendo éste una representación gráfica de la función de densidad de los resultados de pérdida de carga máxima provocada en cada simulación.

La siguiente gráfica muestra el histograma de presiones mínimas (calculadas a partir de la pérdida de carga unitaria máxima, la longitud del tramo y la presión de cabecera supuesta en el tramo, 30 mca) para una serie de 200 simulaciones (correspondiente a un diámetro de red, carga total de consumo en el tramo y configuración de viviendas: número de acometidas, viviendas por acometida y consumo unitario por vivienda).

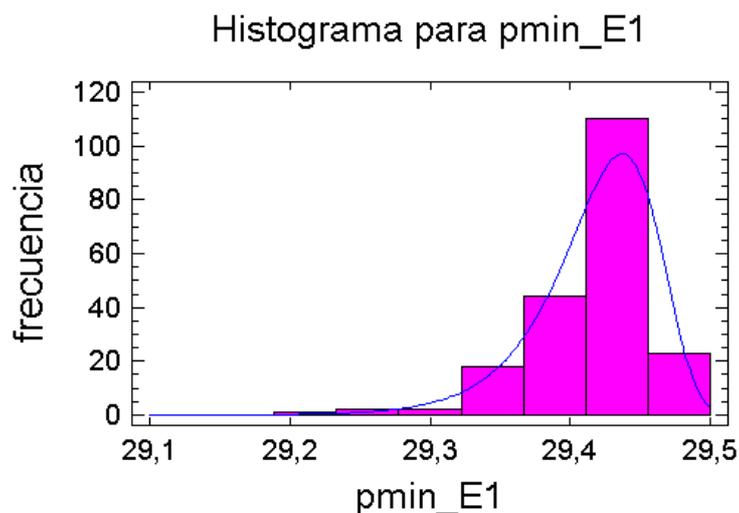


FIGURA 14. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LA VARIABLE PRESIÓN MÍNIMA.

Como se observa en la figura anterior, el histograma no sugiere un ajuste a una distribución normal, dada principalmente la asimetría, siendo más próximo su comportamiento al seguido por una distribución tipo Weibull.

Dado que, ante la variación del número de intervalos de representación la distribución altera su histograma sensiblemente, se procede al análisis cuantil-cuantil de los datos, ya que se trata de un método más contundente para constatar si la serie de presiones se ajusta a una determinada distribución. La técnica consiste en comparar los cuantiles teóricos que seguiría la distribución versus los cuantiles registrados, de tal forma que, si es posible caracterizar linealmente ambas series bajo una determinada distribución tipo, es aceptable representar la serie real con la correspondiente distribución.

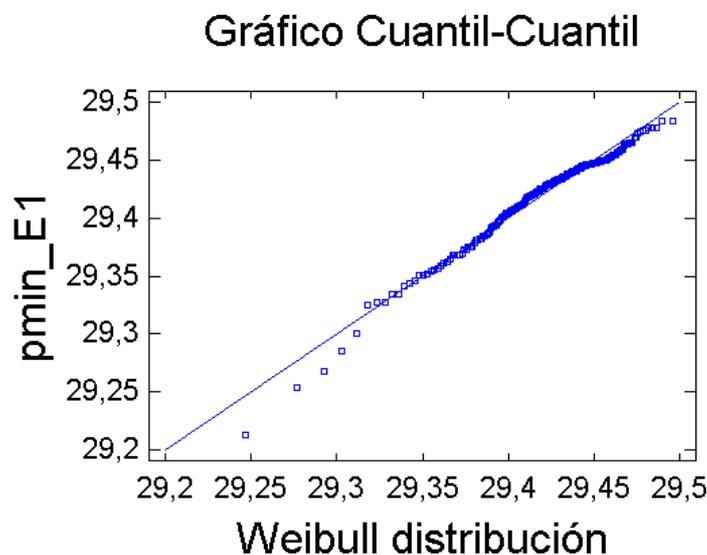


FIGURA 15. AJUSTE DE LOS DATOS A UNA DISTRIBUCIÓN WEIBULL.

Como se muestra en la gráfica anterior, la distribución tipo Weibull muestra un grado de ajuste elevado para la mayoría de datos de la serie, existiendo únicamente una pequeña proporción de puntos situados en la cola inferior cuyo ajuste no es exacto, pero en todo caso, se considera que la discrepancia es aceptable.

Por tanto, se concluye que el ajuste de la serie de presiones mínimas (se ha preferido trabajar con esta variable para el ajuste a una función de probabilidad que con la variable pendiente hidráulica) a una distribución Weibull es válido.

### 5.3.1 Estimación de los parámetros de la distribución Weibull

La función de distribución acumulativa Weibull se define de la siguiente forma:

$$F(x, \alpha, \beta) = \left( \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]}{1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]} \right) \quad x \geq 0 \quad \text{Ec. 12}$$

La función está caracterizada por los parámetros alfa y beta, el primero de ellos es el parámetro de escala, mientras que el segundo es el de forma. El conocimiento de estos parámetros para cada conjunto de 200 simulaciones permitirá construir la correspondiente función de probabilidad de la serie, de forma que será posible establecer los valores extremos de la misma con la confiabilidad deseada. Estos parámetros se han obtenido por medio de una regresión entre los valores de la variable y su probabilidad acumulativa, utilizando la transformación logarítmica y el método de mínimos cuadrados.

#### 5.3.1.1 Valores extremos de las series

La finalidad perseguida es establecer el rango de valores de presiones mínimas que caracterizaran una serie de 200 simulaciones. Una vez conocidos los parámetros de la función es posible establecer los valores extremos de la serie con una probabilidad determinada. En concreto se impone una confiabilidad del 99,5%.

Para la serie de trabajo se ha calculado el rango teórico y el que realmente aporta los resultados de las simulaciones.

TABLA 2. EJEMPLO DE LOS VALORES EXTREMO PARA UNA DE LAS SERIES.

Presiones	Valores reales	Valores teóricos
<b>PmM</b>	29,483	29,494
<b>Promedio</b>	29,417	29,417
<b>Pmm</b>	29,212	29,257

La tabla anterior muestra los valores máximos mínimos y promedios de la serie de presiones mínimas (que corresponden a la serie de pendientes hidráulicas máximas), tanto los valores reales obtenidos de las simulaciones, como los que se calculan a partir de la función de probabilidad cuando se trabaja con una confiabilidad del 99,5% tal como se ha expuesto anteriormente.

La representación gráfica de dichos rangos se puede observar en la siguiente gráfica:

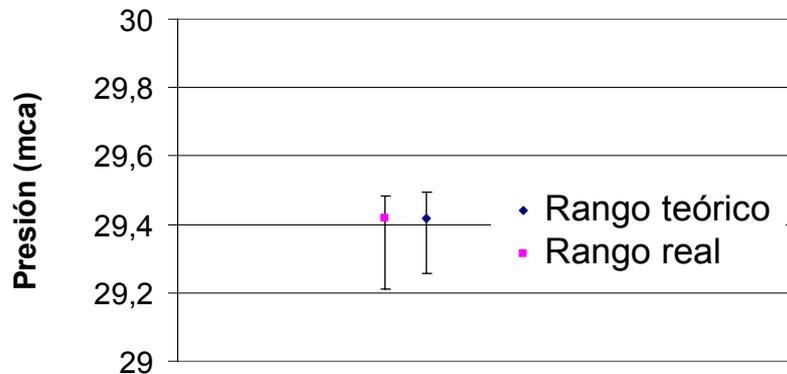


FIGURA 16. RANGO DE PRESIONES PARA UNA DE LAS SERIES.

Como se puede apreciar, el valor máximo del rango obtenido a partir del ajuste a la distribución Weibull es prácticamente idéntico al valor real, mientras que el valor mínimo es ligeramente superior. Tal como se ha comentado anteriormente, esto es debido a que el ajuste con la distribución Weibull para la cola inferior de la serie de resultados, mayor el valor de la presión, reduciendo el valor de la pendiente hidráulica en esos puntos (ver Figura 15). Se concluye que el procedimiento para esta serie es correcto, ya que mantiene con una elevada probabilidad el conjunto de valores esperados para la carga simulada. Nótese que se está trabajando con la serie de valores mínimos de presiones que se alcanzan en 200 simulaciones de 360 intervalos-resultados por simulación y únicamente se queda fuera para este caso concreto un único valor (el siguiente valor de la serie está incluido en el rango de datos teórico que aporta la función de probabilidad).

De este modo es posible caracterizar estadísticamente la distribución de los resultados de las simulaciones a partir de los parámetros propios de la función de distribución Weibull.

La presión resultado de cada simulación está representada por la presión media mínima de las 200 simulaciones correspondientes, y la dispersión respecto al valor medio se caracterizará por los valores extremos de presión alcanzada en la simulación con una probabilidad del 0.5%.

## 5.4 Representación de los resultados de las simulaciones

La representación de los valores máximos de la serie de pendientes hidráulicas para cada una de las cargas y diámetros junto con los intervalos (obtenidos a partir de la función de probabilidad comentada en el apartado anterior) que tienen en cuenta la dispersión de resultados es la siguiente:

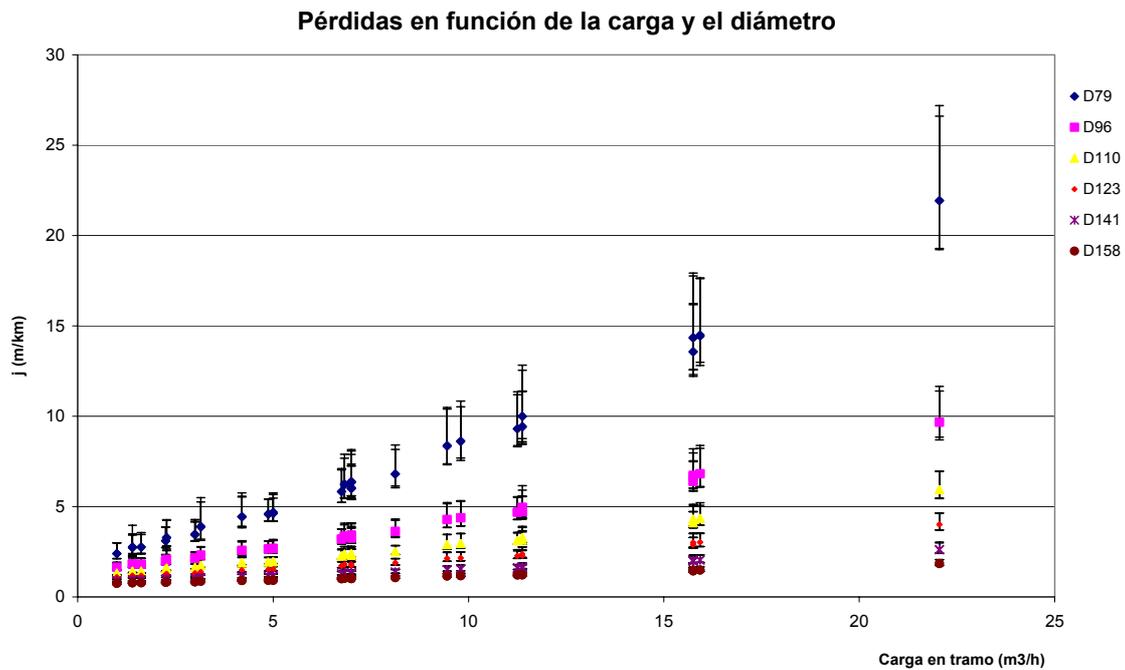


FIGURA 17. RANGO DE PRESIONES PARA CADA UNA DE LAS SERIES.

Tal como se comentó anteriormente, los principales parámetros de la tabla se han obtenido según se describe a continuación:

- La serie de datos representados es, para cada estado de carga, la media de la pérdida de presión unitaria máxima de 200 simulaciones de una hora correspondiente a viviendas con alimentación en directo. Además, sobre cada punto (correspondiente a la media) se construye un intervalo donde se espera que oscile dicha pérdida de presión máxima con una determinada probabilidad (99.95%).
- La carga en el tramo es el producto de la demanda media horaria por vivienda, por el número de viviendas por nudo y por el número de nudos de consumo.
- La pendiente hidráulica es la diferencia entre la presión de referencia (30 mca) y la presión obtenida, dividido por la longitud total del tramo.

Y algunos de las conclusiones a las que se ha llegado son:

- Como se había comprobado anteriormente, para un mismo diámetro existe una relación directa entre la pendiente hidráulica y la carga de consumo total en el tramo.
- La dispersión alrededor del punto medio de la serie es asimétrica.
- La dispersión aumenta con la carga y disminuye con el aumento de diámetro.
- El aumento de la pendiente hidráulica frente a la carga de consumo es aproximadamente cuadrático, de forma que, para un mismo diámetro, un aumento en la carga del tramo origina un incremento mayor al proporcional en la pendiente hidráulica.
- Es posible construir una franja de pérdidas de carga unitaria para cada uno de los diámetros, que contenga todos los resultados de presión mínima con una probabilidad del 99,95% (Figura 17).
- Como se aprecia en la Figura 17, para algunos diámetros y cargas, existe varios puntos superpuestos. La explicación deriva de la existencia de combinaciones de parámetros que se corresponden con una misma carga, y la conclusión que se puede sacar es, que el parámetro *carga en tramo* independiza los otros parámetros de los que depende para los valores considerados para las simulaciones representadas y cuando el suministro se realiza en directo o con bombas de velocidad variable.

La siguiente gráfica muestra la franja de pérdidas unitarias máxima para cada uno de los diámetros construida a partir de los rangos de presiones establecidos anteriormente.

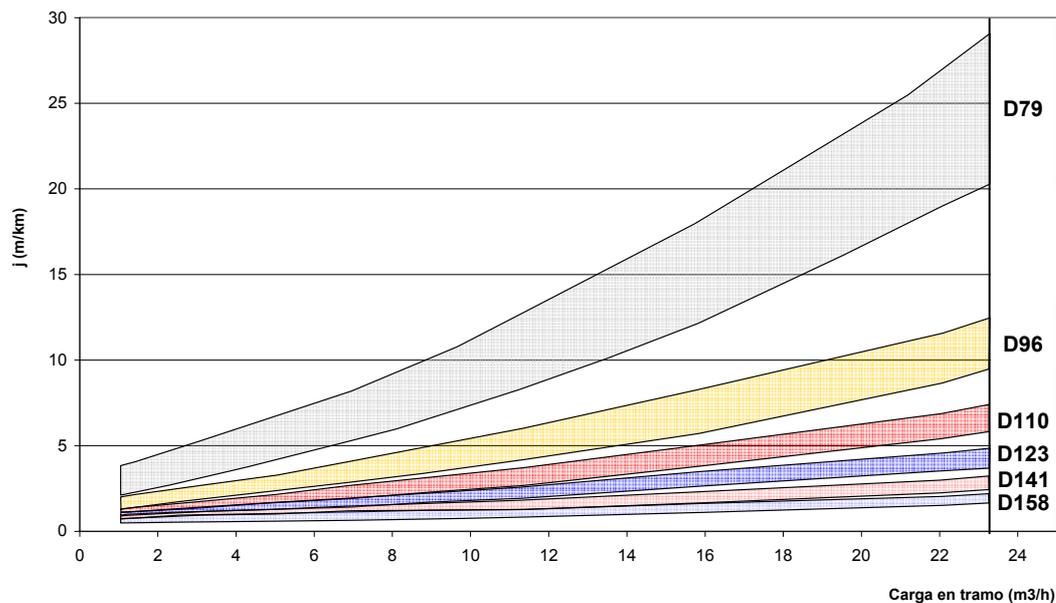


FIGURA 18. RANGOS DE PÉRDIDAS UNITARIAS EN TRAMO PARA CADA UNO DE LOS DIÁMETROS.

Por tanto, para una determinada carga de tramo  $e$ , impuesta una determinada pendiente máxima aceptable en el tramo, de forma que la presión mínima en el punto más desfavorable no baje de un determinado valor, el diámetro mínimo que asegura el comportamiento correcto deberá ser seleccionado de forma que esté situado por debajo de la intersección de los dos parámetros impuestos.

Acudiendo de nuevo a la Figura 17, se puede observar que, si se quiere ser conservador, es posible establecer una curva, correspondiente con el límite superior de los rangos anteriores, de forma que la pérdida unitaria máxima para una carga dada se encuentra fielmente definida por un punto ubicado sobre una curva bien definida.

La siguiente figura muestra la curva límite de la pendiente hidráulica máxima para cada uno de los diámetros en función de la carga de consumo del tramo, cuando el suministro se realiza en directo (Tipo I) o a través de grupos de velocidad variable (Tipo III).

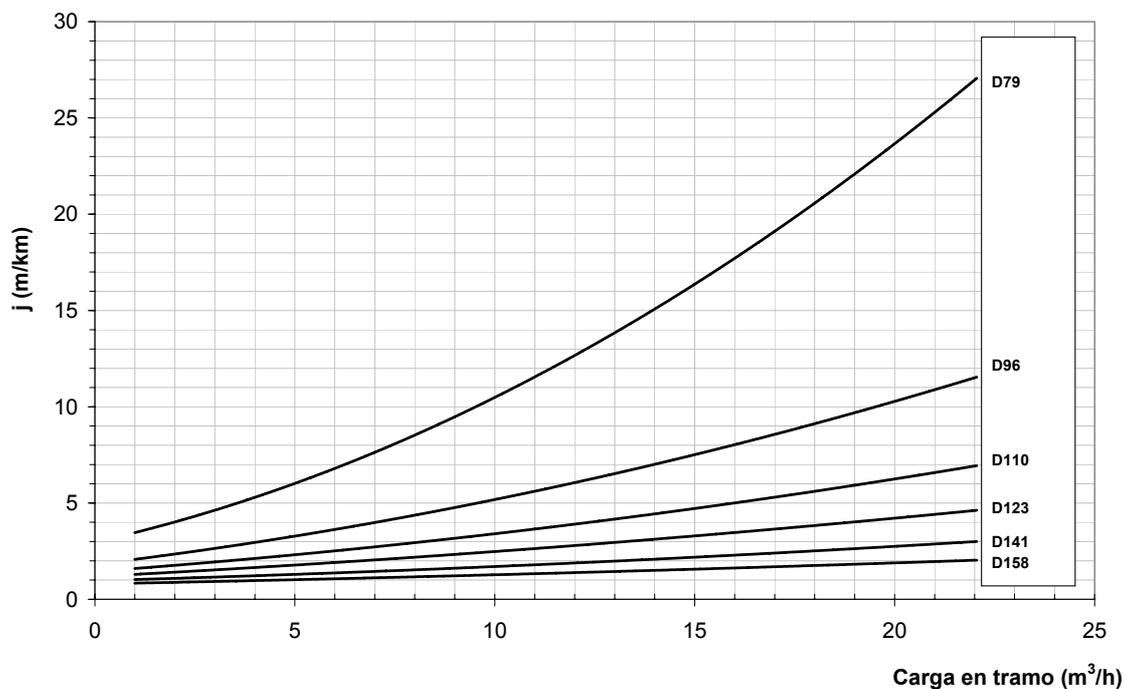


FIGURA 19. CURVAS DE PENDIENTES UNITARIAS MÁXIMAS PARA CADA UNO DE LOS DIÁMETROS ESTUDIADOS.

En el Anejo VI. Ejemplos de aplicación, se adjuntan ejemplos prácticos para la utilización e interpretación de los resultados obtenidos con el gráfico anterior (pendientes máximas admisibles en función de la carga).

## 5.5 Comparación de las respuestas de otro tipo de instalaciones

Si se procede de forma similar a la mostrada anteriormente, pero en este caso se modela la instalación general de los abonados bajo otro esquema (suministro con grupo de velocidad fija, Tipo II, o bien un suministro mixto), es posible obtener unas gráficas similares a las obtenidas anteriormente para suministros en directo, y comparar las exigencias de cada una de las instalaciones.

A continuación se muestra el resultado de las simulaciones para los 3 escenarios presentados anteriormente para uno de los diámetros analizados (en el Anejo V. Comparación respuestas según esquema de suministro, se pueden observar las comparaciones gráficas para la totalidad de diámetros analizados).

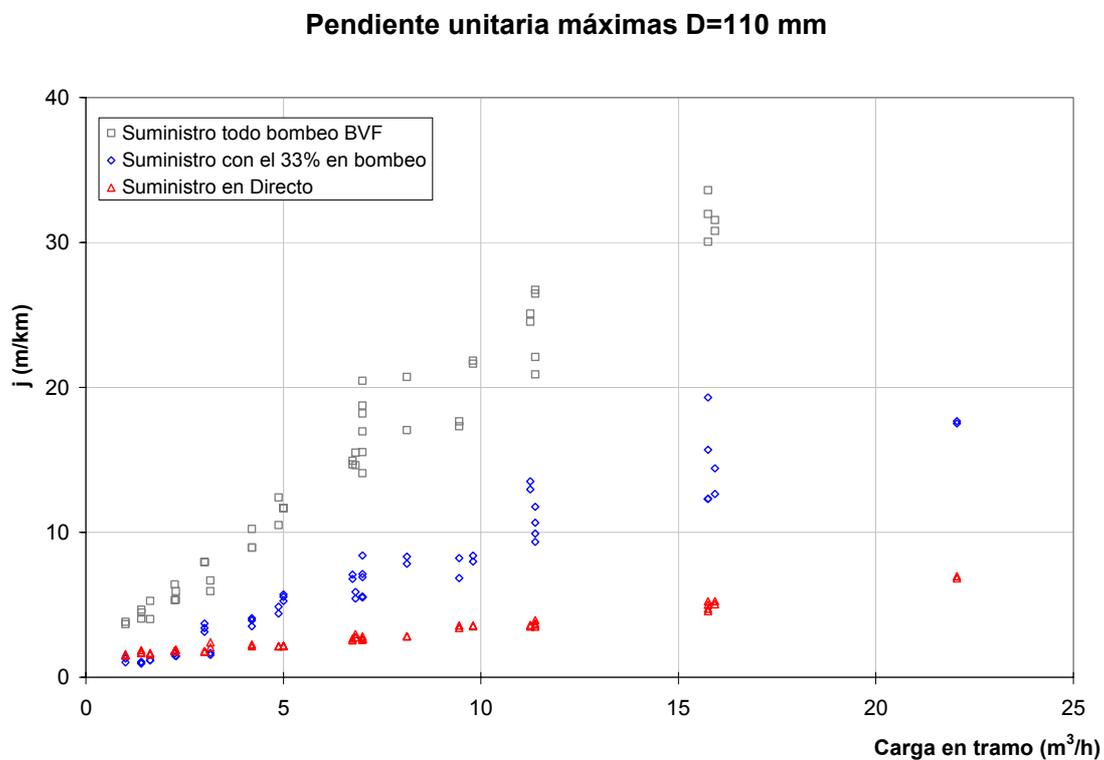


FIGURA 20. PÉRDIDAS UNITARIAS MÁXIMAS PARA CADA UNA DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS.

De la gráfica anterior se puede sacar las siguientes conclusiones:

- La dispersión de los datos para una misma carga es mayor si se instalan grupos de velocidad fija, mientras que en la situación de suministro en directo o con bombas de velocidad variable, para una carga dada, la pendiente hidráulica máxima está localizada sobre una curva bien definida. Derivado de lo anterior, se concluye que la influencia del valor de los parámetros del tramo (“número de nudos”, “demanda media”, “número de viviendas por nudo”...) genera, en el suministro con grupos de bombeo, rangos de pendientes máximas para una misma carga y no un valor único como en el caso de suministro con bombas de velocidad variable o directo.

- El suministro con bombas de velocidad fija origina pérdidas de carga muy superiores a las ocasionadas con grupos de velocidad variable. Por ello, para una carga dada, es necesario acudir para el primero de los casos, a diámetros de conducción superiores.
- Las pendientes máximas originadas con el aumento de porcentaje de grupos de velocidad fija en el tramo no sigue una tendencia lineal, de forma que un aumento de este porcentaje no supone un aumento proporcional en las pérdidas del tramo.

La siguiente gráfica muestra las zonas o rangos de pérdidas unitarias originadas con la instalación de grupos de velocidad fija para diferentes diámetros de tramo y diferentes cargas.

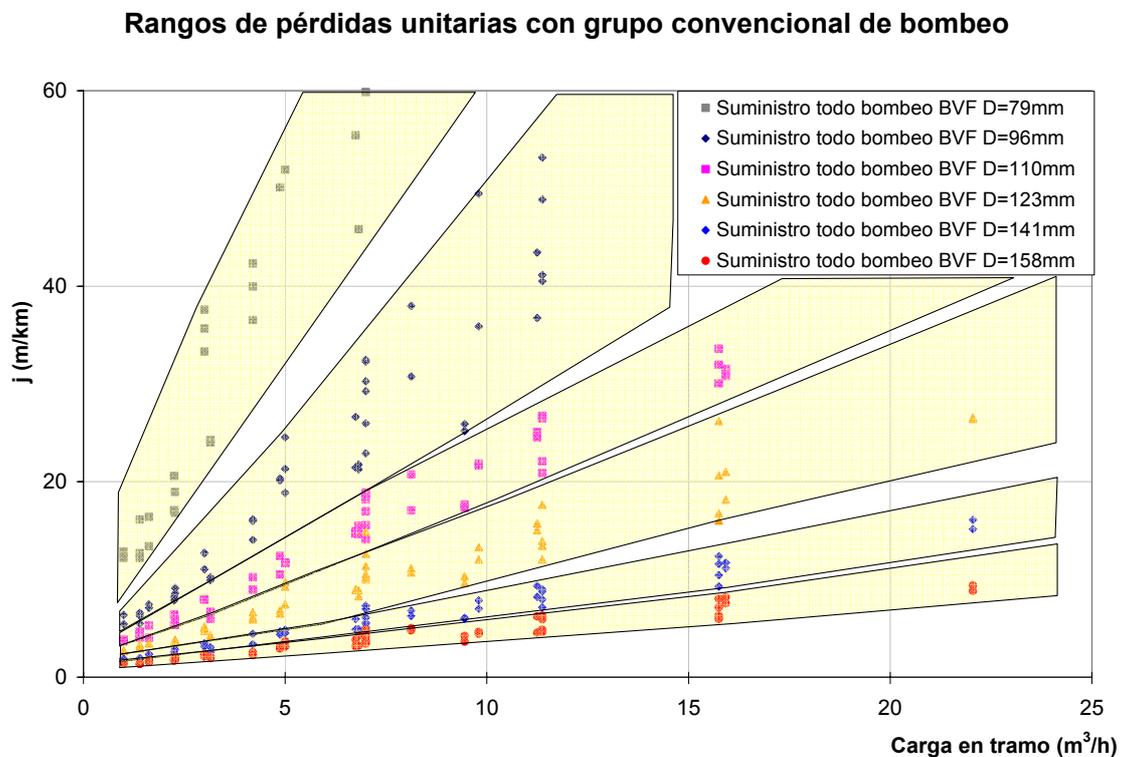


FIGURA 21. RANGOS DE PÉRDIDAS UNITARIAS CON SUMINISTRO CON BOMBAS DE VELOCIDAD FIJA.

Se puede observar cómo, a diferencia del suministro con bombas de velocidad variable o en directo, no aparece una curva que ajuste todos los puntos de las series de carga. En este caso, para cada uno de los diámetros y una misma carga, aparece un rango de valores de pendientes hidráulicas. Esto se debe, tal como se ha comentado anteriormente, a que para el grupo de bombeo de velocidad fija, la influencia de los parámetros del tramo es destacable. Nótese por ejemplo, que para una carga dada, las pérdidas si se suministra con grupo de velocidad fija, no será la misma en el caso en el que el número de nudos sea bajo y por el contrario, el número de viviendas conectadas a éste sea alto. En esta situación, el grupo de bombeo necesariamente debe ser de mayor tamaño y, por tanto, las pérdidas

producidas durante la aspiración serán notables. Si al hecho anterior se le añade la posibilidad que arranque simultáneamente otros equipos del tramo, ocasiona una dispersión en las pérdidas considerables tal como se observa en la gráfica.

## 6 ANÁLISIS DE LA DEMANDA MEDIA EN VIVIENDAS

### 6.1 Introducción

En el dimensionado de las instalaciones interiores de los edificios, tanto la instalación general del mismo, como los tramos de instalación particular de cada uno de los abonados, el procedimiento para el cálculo de las características dimensionales de las conducciones parte de la obtención del caudal que puede circular de forma normal por el mismo. Este caudal es conocido como caudal de simultaneidad o caudal de cálculo, y aproxima el valor real del caudal que de forma simultánea puede circular por un tramo de la instalación.

El ajuste de este caudal de simultaneidad a las condiciones reales de funcionamiento, permite optimizar el diámetro de conducción a instalar en cada tramo, evitando por un lado, el posible infradimensionado de la conducción, con los correspondientes problemas derivados de velocidades excesivas en las tuberías (favoreciendo la posibilidad de generación de ruidos molestos y vibraciones), y por otro lado, el sobredimensionado de la conducción, afectando al coste final de la instalación, y pudiendo favorecer el aumento de deposiciones calcáreas derivado de una velocidad reducida de circulación.

En el siguiente apartado se analiza el principal procedimiento seguido para la determinación del caudal simultáneo por un tramo, y posteriormente se propone una expresión materializada en una gráfica de cálculo, obtenida a partir de las consultas realizadas sobre los datos de consumo de las viviendas almacenadas en la base de datos.

### 6.2 Procedimientos para el cálculo del caudal simultáneo en un tramo

#### 6.2.1 Procedimiento establecido en la NIA

La derogada NIA (Normas básicas para las instalaciones interiores de suministro de agua), no calculaba directamente el caudal que circula por una conducción. El procedimiento seguido partía de la definición del caudal instalado en cada aparato (mínimo caudal que debería salir por el mismo), a partir del cual se podía obtener el caudal total instalado en la vivienda y clasificarla según los tipos propuestos:

TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LAS VIVIENDAS TIPO DEFINIDAS SEGÚN LA NIA.

Vivienda	Caudal Instalado (l/s)	Descripción
Tipo A	$0 < Q_{inst} < 0.6$	Locales dotados de cocina, lavadero y sanitario
Tipo B	$0.6 < Q_{inst} < 1.0$	Locales dotados de cocina, lavadero y cuarto de baño completo
Tipo C	$1.0 < Q_{inst} < 1.5$	Locales dotados de cocina, lavadero y cuarto de baño completo
Tipo D	$1.5 < Q_{inst} < 2.0$	Locales dotados de cocina, office, lavadero y cuarto de baño y aseo
Tipo E	$2.0 < Q_{inst} < 3.0$	Locales dotados de cocina, office, lavadero y dos baños y aseo

Una vez obtenido el Tipo de vivienda se dimensiona el tramo según las tablas de cálculo propuestas por los autores. La siguiente figura muestra la tabla del NIA para el dimensionado del tubo de alimentación de un edificio.

Tubería de paredes rugosas mm.	Tubería de paredes lisas mm.	Numero máximo de suministros				
		Tipo a	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
31.75	30	2	1	1	-	-
38.1	40	5	3	2	2	1
50.5	50	25	16	14	10	6
63.5	60	75	50	45	40	30
76.2	80	120	90	80	70	60
88.9	100	200	150	130	110	90

FIGURA 22. TABLA PARA EL DIMENSIONADO DEL TUBO DE ALIMENTACIÓN DE UN EFICIO SEGÚN LA NIA.

En este caso, el técnico que realiza el cálculo no dispone de información a cerca del ajuste de la conducción seleccionada al caudal real que circulará por el tramo dimensionado, ni las consecuencias de seleccionar uno u otro diámetro comercial de un fabricante.

## 6.2.2 Procedimiento establecido en el CTE

En el caso del Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE), se propone un dimensionado estimando los caudales que circulan por cada uno de los tramos de la instalación, según el siguiente esquema:

1. Cálculo del caudal máximo del tramo
2. Cálculo de los coeficientes de simultaneidad
3. Cálculo del caudal simultáneo

### 6.2.2.1 Cálculo del caudal máximo o caudal instalado

Se trata del caudal mínimo que se debe garantizar a la salida de cada uno de los aparatos de la instalación.

En el caso de un tramo, el caudal máximo que circula por el mismo vendrá dado por la suma de los caudales instalados en los aparatos conectados aguas abajo del mismo:

$$Q_{max} = \sum_{i=1}^n Q_{inst}$$

Siendo:

$Q_{max}$  el caudal máximo o caudal instalado en el tramo

$Q_{inst}$  el caudal mínimo de cada aparato de la instalación

$n$  el número de aparatos conectados aguas abajo del tramo

Los valores de los caudales instalados en cada aparato son los que se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de aparato	Caudal instantáneo mínimo de agua fría [dm <sup>3</sup> /s]
Lavamanos	0,05
Lavabo	0,10
Ducha	0,20
Bañera de 1,40 m o más	0,30
Bañera de menos de 1,40 m	0,20
Bidé	0,10
Inodoro con cisterna	0,10
Inodoro con fluxor	1,25
Urinarios con grifo temporizado	0,15
Urinarios con cisterna (c/u)	0,04
Fregadero doméstico	0,20
Fregadero no doméstico	0,30
Lavajillas doméstico	0,15
Lavajillas industrial (20 servicios)	0,25
Lavadero	0,20
Lavadora doméstica	0,20
Lavadora industrial (8 kg)	0,60
Grifo aislado	0,15
Grifo garaje	0,20
Vertedero	0,20

FIGURA 23. CAUDALES MÍNIMOS INSTALADOS EN CADA UN O DE LOS APARATOS E UNA VIVIENADA

### 6.2.2.2 Cálculo de los coeficientes de simultaneidad

Los coeficientes de simultaneidad tienen en cuenta que la demanda de agua por parte de los usuarios no se hace de forma simultánea ni en la totalidad de aparatos de una vivienda ni en la totalidad de viviendas conectadas a un tramo.

Se distinguen por tanto dos coeficientes de simultaneidad:

- El coeficiente  $k_{sa}$ , coeficiente de simultaneidad de aparatos de una instalación, se obtiene a partir de la expresión:

$$k_{sa} = \frac{1}{\sqrt{n-1}}$$

Siendo  $n$  el número de aparatos de la instalación.

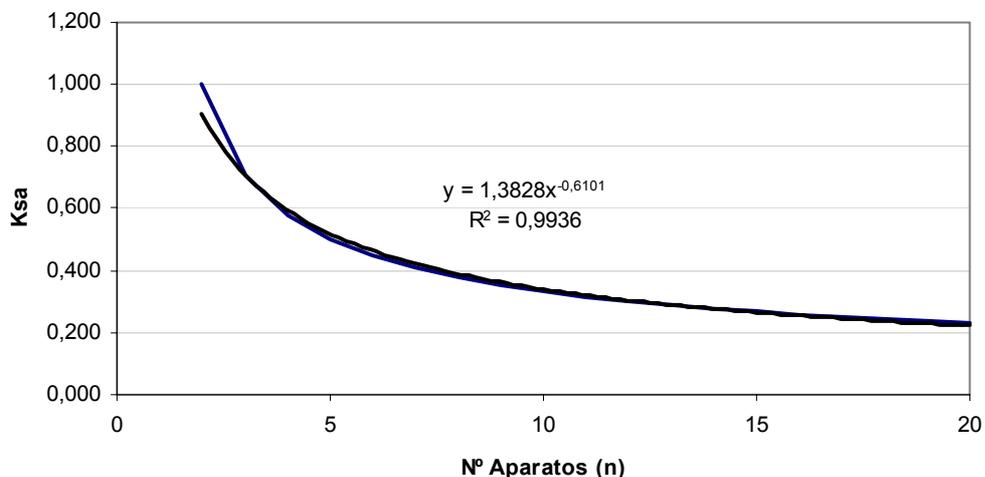


FIGURA 24. COEFICIENTE DE SIMULTANEIDAD DEL USO DE APARATOS.

La expresión anterior ha sido extraída de las normas francesas (AFNOR). En esta expresión no se tienen en cuenta los diferentes tipos de grifos, cada uno de ellos con un caudal diferente, ni se atiende al tipo de instalación que se está dimensionando.

En esta línea, la siguiente figura (obtenida de Arizmendi, 1985) muestra la variación del coeficiente en función del tipo de suministro (la fórmula anterior del coeficiente desimultaneidad corresponde a la curva rotulada como NP41204):

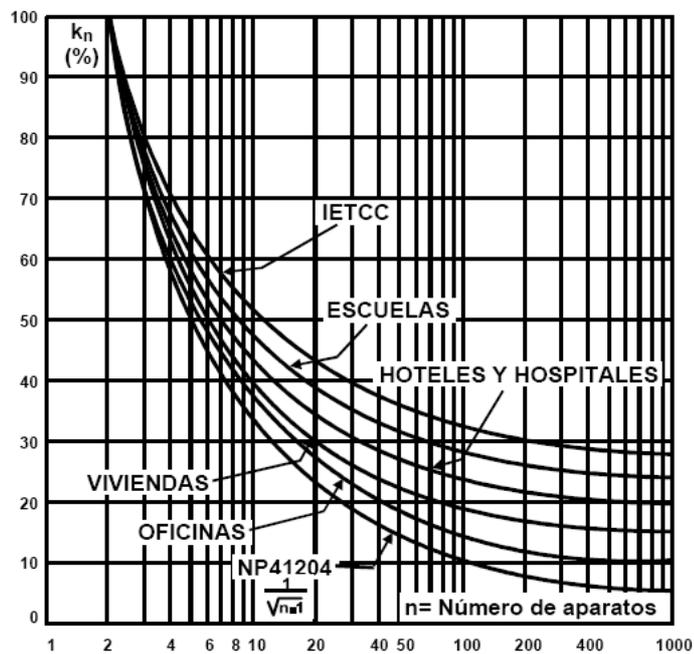


FIGURA 25. CURVAS PARA EL COEFICIENTE DE SIMULTANEIDAD DEL USO DE APARATOS.

Además de las curvas anteriores, es posible emplear una expresión derivada de la anterior en la que se utilice un coeficiente que mayor los valores del coeficiente de simultaneidad.

En el cálculo realizado, se ha utilizado la expresión inicial, sustituyendo el valor de  $n$  por el número de aparatos del tramo y, en el caso particular de dimensionar una conducción que alimente a varias viviendas,  $n$  será el número de aparatos característicos de la vivienda, y no el número total de aparatos conectados al tramo.

- El coeficiente  $k_{sv}$ , coeficiente de simultaneidad de consumo en la totalidad de viviendas, se obtiene a partir de la expresión:

$$k_{sv} = \frac{19 + N_{viv}}{10(N_{viv} + 1)}$$

Siendo  $N_{viv}$  el número de viviendas suministradas por el tramo.

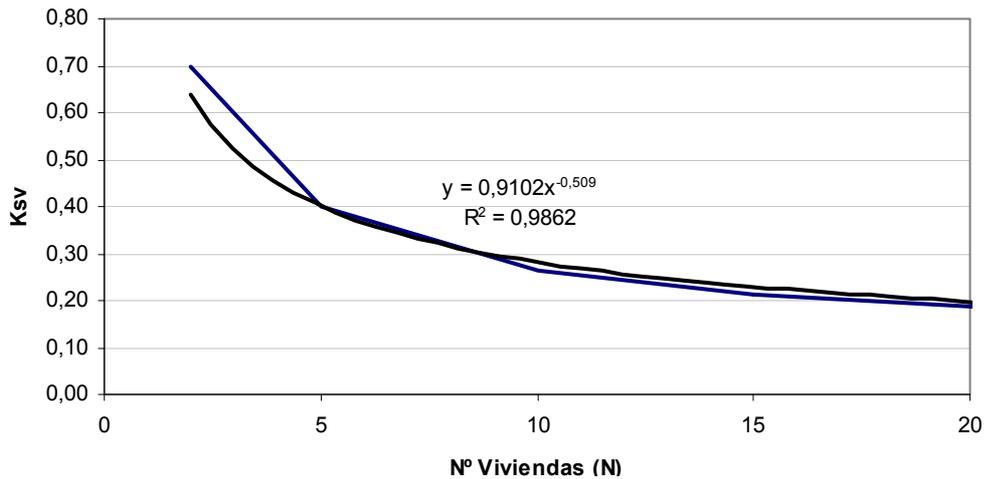


FIGURA 26. COEFICIENTE DE SIMULTANEIDAD DEL CONSUMO EN VIVIENDAS.

Como se ha comentado, el coeficiente tiene en cuenta que no todas las viviendas conectadas al tramo demandan agua de forma simultánea.

### 6.2.2.3 Cálculo del caudal de simultaneidad

El caudal de simultaneidad o caudal de cálculo que circula por un tramo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{sim} = N_{viv} k_{sa} k_{sv} Q_{inst}$$

Donde  $N_{viv}$  representa el número de viviendas suministradas por el tramo.

En este caso, si se utiliza este caudal para el dimensionado de un tramo, se tendrá en cuenta que, de todos los aparatos conectados al tramo, sólo una proporción de ellos estarán demandando agua, establecida ésta a partir de los correspondientes coeficientes de simultaneidad de consumo.

Como se ha comentado anteriormente, para un tramo que alimenta a varias viviendas,  $k_{sa}$  y  $Q_{inst}$  se calcula a partir de los datos característicos de una vivienda y no de la totalidad de aparatos conectados al tramo.

La representación de la expresión anterior para diferente número de viviendas y para un número diferente de aparatos instalados por vivienda (3, 5, 10 y 14 aparatos) se puede observar en la siguiente figura:

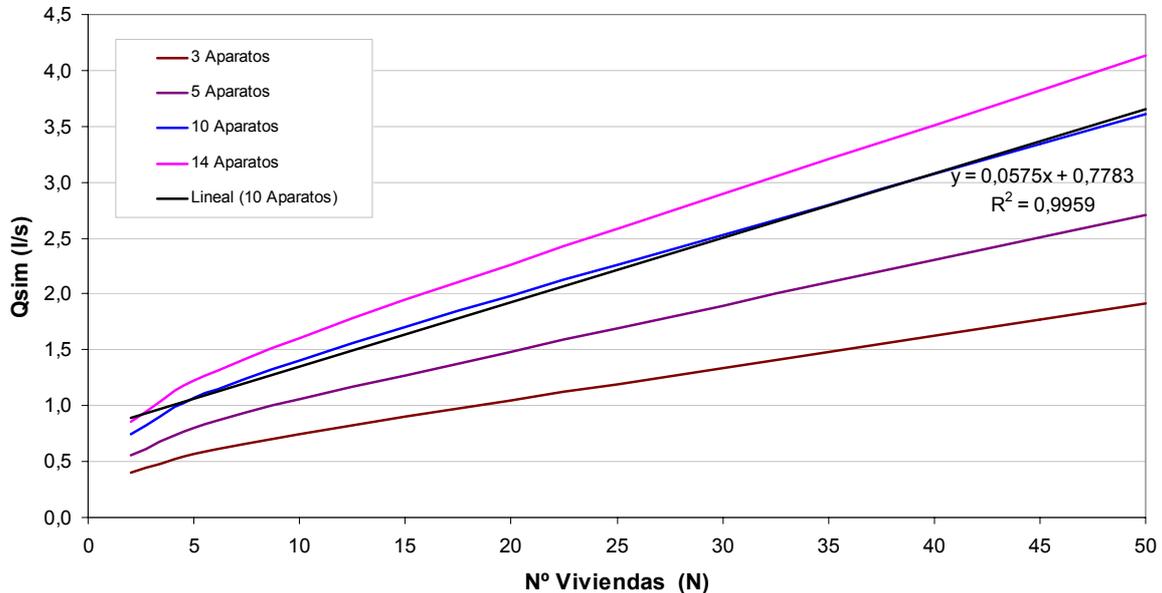


FIGURA 27. COEFICIENTE DE SIMULTANEIDAD DEL CONSUMO EN VIVIENDAS.

El ajuste de la expresión para el cálculo del caudal simultáneo es lineal, tal como se representa para viviendas con 10 aparatos.

Del mismo modo que sucede con el dimensionado a partir de la propuesta de la NIA, con el procedimiento seguido con en el CTE tampoco se conoce el ajuste sobre el caudal real demandado en el tramo (caudales que en su momento se debieron utilizar para el ajuste de la expresión de cálculo del caudal simultáneo, así como los diferentes coeficientes de simultaneidad).

### 6.3 Comparación con las simulaciones de los consumos de la base de datos

La base de datos de consumos cuenta con registros de consumos reales en instalaciones domésticas. A partir de los módulos de simulación programados en el trabajo de investigación, es posible simular el comportamiento de diferentes edificios formados por las viviendas de la base de datos, y cómo se combina su demanda para analizar la simultaneidad en su consumo.

Para ello, se han realizado diferentes simulaciones en las que se ha variado el número de viviendas que forman parte del edificio, y se ha registrado el volumen demandado durante una misma hora con la resolución característica de los datos de partida, procediendo de forma análoga a la realizada para la obtención de las gráficas de solicitudes en régimen permanente.

Respecto al número de aparatos de las viviendas, no se dispone de esta información en la base de datos, pero en todo caso las viviendas se aproximan a la vivienda Tipo D definida por la NIA, siendo el número medio de aparatos considerado de 10, tal como se especifica a continuación:

Vivienda considerada con los siguientes cuartos húmedos y aparatos:

TABLA 4. APARATOS CARACTERÍSTICOS DE UNA INSTALACIÓN.

<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Cuarto de baño con:<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Inodoro con cisterna</li><li>▪ Lavabo</li><li>▪ Bidé</li><li>▪ Bañera</li></ul></li><li>▪ Aseo con:<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Inodoro con cisterna</li><li>▪ Lavabo</li><li>▪ Ducha</li></ul></li><li>▪ Cocina con:<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Fregadero doméstico</li><li>▪ Lavadora</li></ul></li></ul>
---

### 6.3.1 Comparación con los resultados del CTE

Según la expresión de cálculo sugerida por el CTE, el caudal simultáneo para diferentes tamaños de edificios formados por viviendas idénticas, con instalaciones similares a las consideradas anteriormente (número total de aparatos igual a 10 y caudal instalado de 1.55 l/s), es el mostrado en la siguiente gráfica:

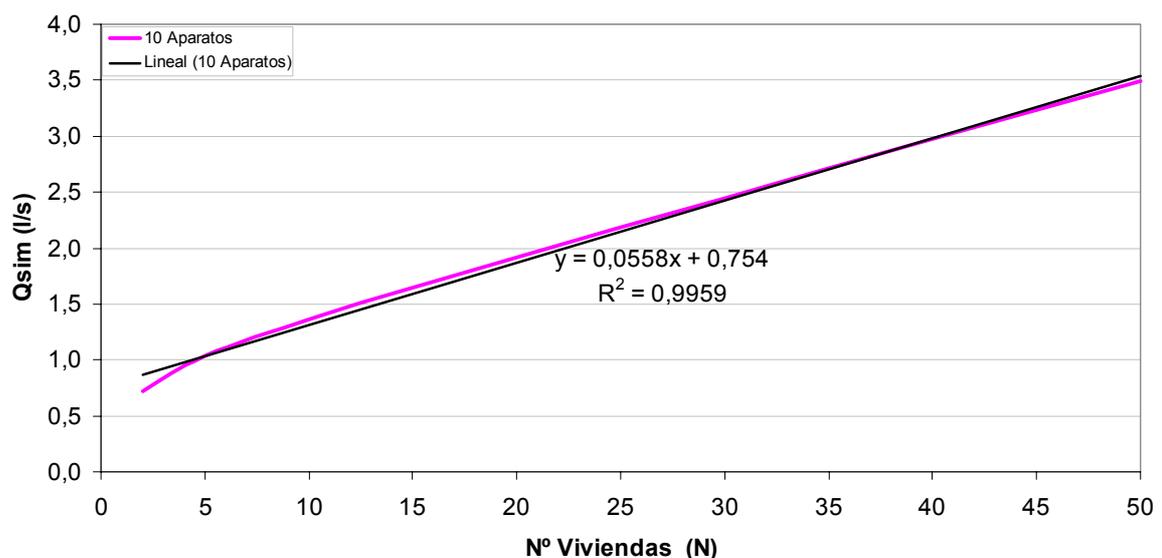


FIGURA 28. CAUDAL SIMULTÁNEO (SEGÚN CTE) PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE EDIFICIO Y 10 APARATOS POR VIVIENDA.

Si se persigue obtener una representación como la anterior mediante las simulaciones de las viviendas de la base de datos de consumo, es necesario construir edificios con diferente número de viviendas y asignarle a cada uno de ellos los caudales demandados en periodos de 10 segundos de forma simultánea. Para ello, se accede a la base de datos para una de las viviendas integrantes y se recogen todos los datos de consumo para una hora concreta de suministro, de esta forma se dispondrá de la demanda real de una vivienda. Si se procede de forma similar para un conjunto de viviendas, es posible recoger los consumos correspondientes a varias viviendas y superponer las demandas instantáneas de todas ellas.

Cada simulación de un periodo aportará la demanda puntual del total de viviendas del edificio para dicho instante. Téngase en cuenta, que al simular durante una hora a intervalos de 10 segundos, se dispondrá de un total de 360 instantes de demandas por hora de simulación. En el presente trabajo se han simulado 200 horas de simulación para cada uno de los tamaños de edificios considerados (edificios de 2 viviendas hasta edificios compuestos por 50 viviendas).

La siguiente gráfica muestra los resultados de las simulaciones realizadas:

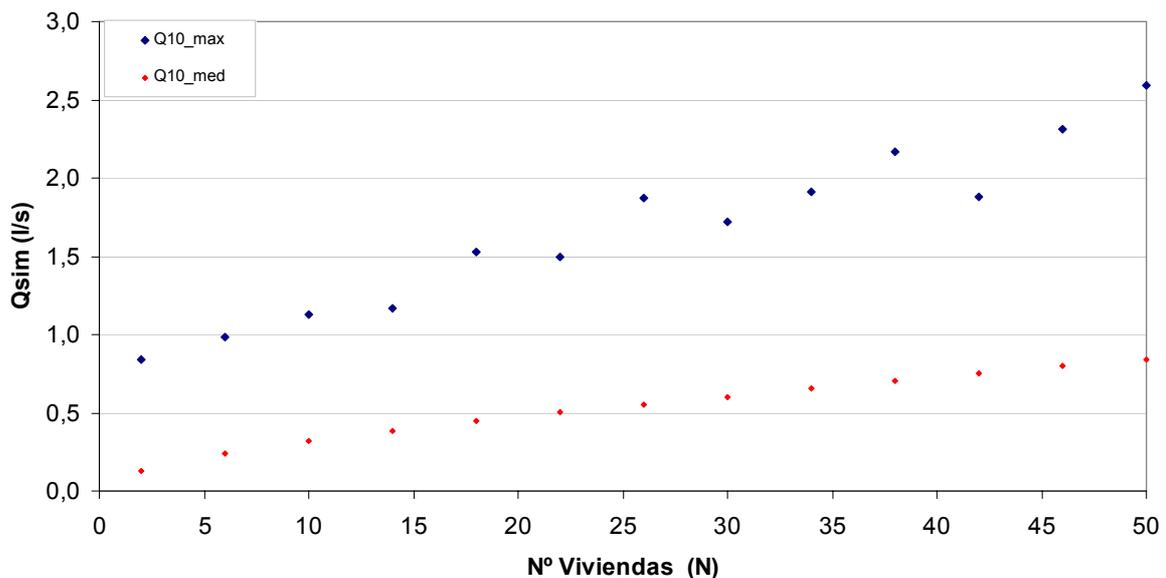


FIGURA 29. CAUDAL SIMULTÁNEO MEDIO Y MÁXIMO DEMANDADO POR LOS EDIFICIOS GENERADOS EN LAS SIMULACIONES.

La serie superior representa los caudales máximos demandados para un conjunto de simulaciones (para cada tamaño de edificio evaluado). Cada valor se corresponde con la demanda máxima que se ha dado en cada edificio para el conjunto de simulaciones realizadas, y por tanto, aportaría información relativa a las solicitudes máximas que se pueden dar en cada para cada tamaño de edificio.

Por otro lado, la serie inferior graficada, representa el valor medio del caudal simultáneo demandado para cada tamaño de edificio, obtenido con las mismas simulaciones que en el caso anterior. Este valor representa el valor medio del caudal que demanda el conjunto de viviendas de un edificio durante una hora de demanda exigente. Recuérdese, que de la misma forma que ocurría en el análisis en régimen permanente, del conjunto de horas del día, sólo se trabaja con aquéllas diurnas que presentan una demanda más exigente (periodo comprendido entre las 7 y las 23h), dejando al margen todas aquéllas dentro del periodo nocturno en las que la demanda de las viviendas toma valores reducidos.

En la siguiente gráfica se puede observar la comparación entre las series de caudales simultáneos según la expresión de cálculo que se utilizaría en el dimensionado según el CTE (para 10 aparatos) y el valor de los caudales simultáneos obtenidos con las simulaciones con viviendas de la base de datos (series Q\_10max, Q\_10med y ajustes lineales correspondientes), junto con las líneas de tendencia que aproximan las series:

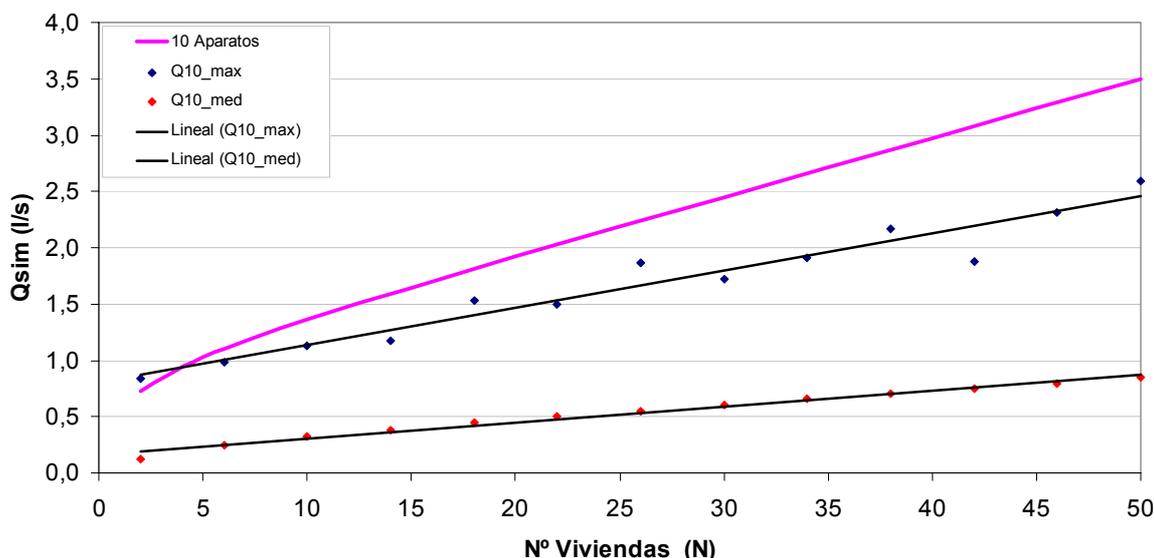


FIGURA 30. CAUDAL SIMULTÁNEO MEDIO Y MÁXIMO DEMANDADO POR LOS EDIFICIOS GENERADOS EN LAS SIMULACIONES.

De la gráfica se puede concluir que, el caudal simultáneo obtenido a partir de la expresión sugerida por el CTE para 10 aparatos, presenta valores superiores a los que se pueden alcanzar en edificios suministrados en directo, en el caso de que éstos estén formados a partir de los datos de consumo de las viviendas almacenadas. En el caso de los edificios simulados, esta mayoración se traduce en un sobredimensionado de la conducción general de alimentación, tal como se mostrará más adelante.

La confirmación de esta primera conclusión valida en una primera instancia el procedimiento propuesto por el CTE, ya que los caudales que se utilizan para el cálculo son ligeramente superiores a los que se pueden dar en un edificio.

Otra de las conclusiones que se puede establecer de la figura anterior es que la expresión del CTE presenta una mejor respuesta para edificios de menor tamaño. La diferencia entre ambos valores aumenta a medida que crece el tamaño del edificio tal como se muestra en la siguiente gráfica.

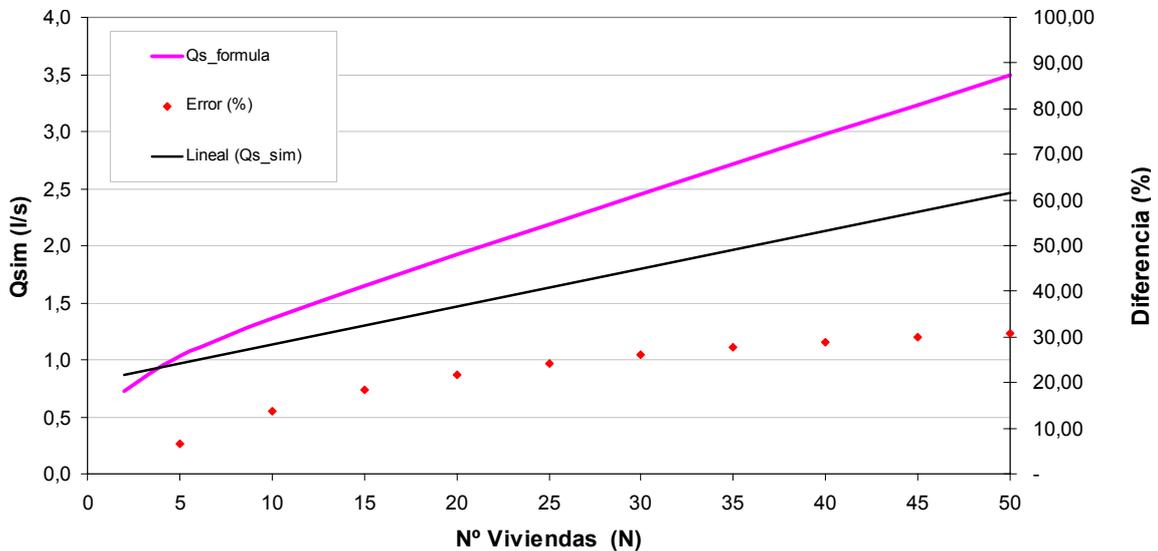


FIGURA 31. DIFERENCIA ENTRE LOS CAUDALES SIMULTÁNEOS.

La diferencia se ha representado según la siguiente expresión:

$$D(\%) = \frac{Q_{s\_formula} - Q_{s\_sim}}{Q_{s\_formula}} \cdot 100$$

Siendo ambos caudales simultáneos los obtenidos bien a partir de la expresión sugerida por el CTE ( $Q_{s\_formula}$ ) o mediante las simulaciones con los consumos de la base de datos ( $Q_{s\_sim}$ ).

La diferencia en algunos casos toma valores superiores al 30%, lo que significa que el caudal real que circula por el tramo es un 30% menor que el supuesto. Esto se traduciría en la selección de un diámetro para la conducción superior al necesario, con el correspondiente coste económico que supone.

A continuación se realiza el dimensionado del tubo de alimentación de los edificios considerados (tubería general instalada en el interior del edificio y que transporta el total del caudal consumido por las viviendas).

Se trabaja con tuberías de polietileno (material mayoritariamente instalado en dicho tramo), y se fija una velocidad máxima de cálculo por las mismas de 2 m/s, valor comprendido dentro de los límites impuestos por el CTE.

Los cálculos realizados se resumen en la siguiente tabla:

TABLA 5. DIÁMETROS COMERCIALES SELECCIONADOS SEGÚN LOS CRITERIOS CONSIDERADOS.

Nviv	Q <sub>s_f</sub> (l/s)	Q <sub>s_s</sub> (l/s)	Dif (l/s)	D <sub>min_f</sub> (mm)	D <sub>min_s</sub> (mm)	D <sub>PE_f</sub> (mm)	D <sub>PE_s</sub> (mm)
			(Q <sub>s_f</sub> - Q <sub>s_s</sub> )	Cálculo		Comercial PE	
5	1,033	0,965	6,55	25,64	24,79	28,8	28,8
10	1,312	1,130	13,81	28,90	26,83	28,8	28,8
15	1,591	1,296	18,52	31,83	28,73	36,2	28,8
20	1,87	1,461	21,83	34,50	30,51	36,2	36,2
25	2,149	1,627	24,28	36,99	32,19	45,6	36,2
30	2,428	1,792	26,16	39,32	33,78	45,6	36,2
35	2,707	1,958	27,66	41,51	35,31	45,6	36,2
40	2,986	2,123	28,87	43,60	36,77	45,6	45,6
45	3,271	2,289	30,01	45,63	38,18	54,2	45,6
50	3,544	2,454	30,73	47,50	39,53	54,2	45,6

Siendo:

N<sub>viv</sub>: el número de viviendas del edificio.

Q<sub>s\_f</sub>: el caudal simultáneo obtenido según la sugerencia del CTE.

Q<sub>s\_s</sub>: el caudal simultáneo obtenido a partir de las simulaciones con las viviendas de la base de datos de consumos.

Dif: la diferencia entre los caudales simultáneos.

D<sub>min\_f</sub>: el diámetro mínimo de cálculo para el criterio del CTE.

D<sub>min\_s</sub>: el diámetro mínimo de cálculo para Q<sub>s\_s</sub>.

D<sub>PE\_f</sub>: el diámetro interior comercial seleccionado según CTE.

D<sub>PE\_s</sub>: el diámetro interior comercial seleccionado para Q<sub>s\_s</sub>.

Como se puede observar en la tabla, para el caso concreto analizado, de los 10 tamaños de edificio considerados, 4 de ellos mantendrían el mismo diámetro de conducción, y 6 deberían seleccionar un diámetro superior, con el coste económico que ello supone.

### 6.3.2 Comparación con los resultados de la NIA

El mismo análisis se puede realizar para el dimensionado propuesto por la NIA, en este caso, sería necesario definir el tipo de vivienda que formaría parte del edificio, pudiendo seleccionarse una Tipo C o Tipo D según la descripción complementaria (ver Tabla 3).

Las siguientes tablas muestran la comparación entre los diámetros seleccionados para los edificios de 5 a 50 viviendas, siguiendo el procedimiento propuesto por la NIA y los seleccionados a partir de las simulaciones realizadas.

TABLA 6. DIÁMETROS COMERCIALES SELECCIONADOS SEGÚN LOS CRITERIOS CONSIDERADOS.

Nviv	D <sub>min_NIA</sub> (mm)	D <sub>PE_NIA</sub> (mm)	D <sub>PE_s</sub> (mm)
	<b>Tipo C</b>	<b>Tipo C</b>	
5	50.5	54.2	28,8
10	50.5	54.2	28,8
15	63.5	65	28,8
20	63.5	65	36,2
25	63.5	65	36,2
30	63.5	65	36,2
35	63.5	65	36,2
40	63.5	65	45,6
45	63.5	65	45,6
50	76.2	79.6	45,6

Nviv	D <sub>min_NIA</sub> (mm)	D <sub>PE_NIA</sub> (mm)	D <sub>PE_s</sub> (mm)
	<b>Tipo D</b>	<b>Tipo D</b>	
5	50.5	54.2	28,8
10	50.5	54.2	28,8
15	63.5	65	28,8
20	63.5	65	36,2
25	63.5	65	36,2
30	63.5	65	36,2
35	63.5	65	36,2
40	63.5	65	45,6
45	63.5	79.6	45,6
50	76.2	79.6	45,6

Siendo:

D<sub>min\_NIA</sub>: el diámetro mínimo para el tamaño de edificio siguiendo la Figura 22 de la NIA.

D<sub>PE\_NIA</sub>: el diámetro interior comercial seleccionado según la NIA.

D<sub>PE\_s</sub>: el diámetro interior comercial seleccionado para Q<sub>s\_s</sub>.

Como se puede observar en las tablas anteriores, según el dimensionado de la NIA e, independientemente de la clasificación de la vivienda según tipo C o D, en ambos casos, los diámetros seleccionados para la instalación general del edificio presentarían valores muy superiores a los obtenidos a partir de las simulaciones con las viviendas de la base de datos de consumo.

### 6.3.3 Expresión propuesta para la obtención del caudal simultáneo

A partir de la representación de la serie de caudales máximos obtenidos de las simulaciones con la información de los consumos de la base de datos, se ajusta la serie obtenida para la obtención de una nueva expresión que permita el cálculo del caudal simultáneo demandado por un conjunto de viviendas conectadas a un edificio.

La expresión propuesta es la siguiente:

$$Q_{sim} = 0.8 + \frac{N_{viv}}{25}$$

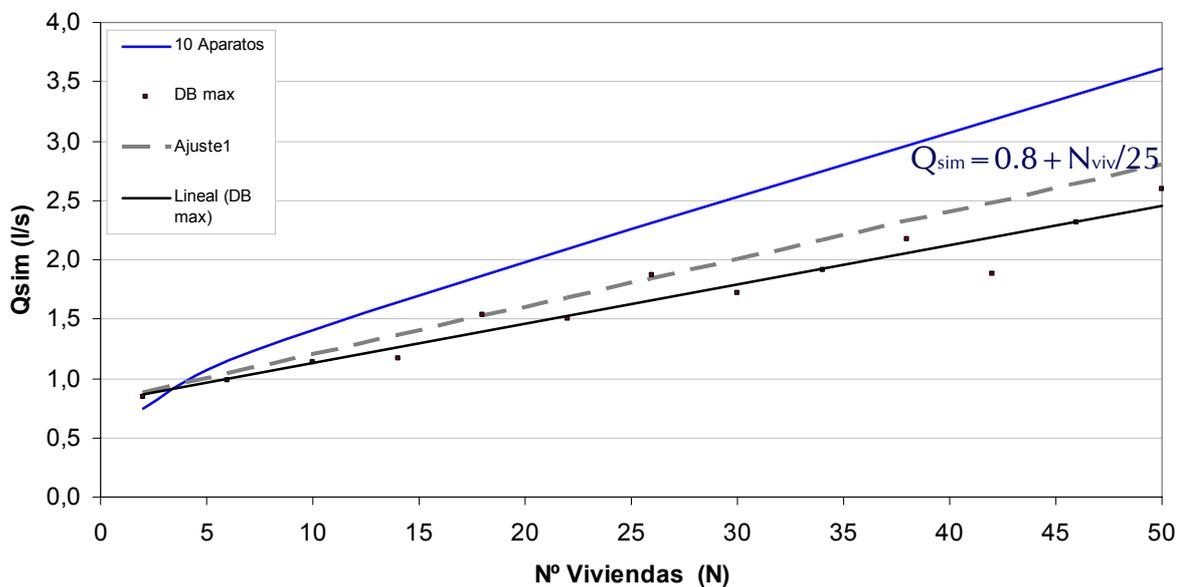


FIGURA 32. EXPRESIÓN PARA EL AJUSTE DEL CADUAL SIMULTÁNEO DEMANDADO POR UN EDIFICIO.

Nótese que la expresión propuesta es función únicamente del número de viviendas alimentadas por el tramo, independientemente del número de aparatos que las integran. Si se tiene en cuenta las instalaciones actuales, el número medio de aparatos con conexión a la red de agua está en torno a los 10, distribuidos de forma similar a la especificada en la Tabla 4. Por tanto, la expresión propuesta serviría para este tipo de instalación, sirviendo únicamente como referencia para aquellas instalaciones particulares cuyo número de aparatos es muy dispar al valor anterior.

Por otro lado, si se quiere mayorar la expresión anterior de cara a la seguridad en el suministro, es posible desplazar la curva anterior por encima de todos los puntos de máxima demanda a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{sim} = 1 + \frac{N_{viv}}{25}$$

## 6.4 Conclusiones obtenidas

Se ha realizado el dimensionado (entendido éste como la selección de las conducciones a instalar en la conducción de alimentación de un edificio) siguiendo los procedimientos más usuales; utilizando las tablas de predimensionado de la NIA y utilizando la expresión de cálculo sugerida por el CTE. Posteriormente se han comparado ambos dimensionados con las conducciones que se seleccionarían si se utiliza para ello los datos de consumo de viviendas almacenados en la base de datos mediante la simulación de diferentes tamaños de edificios.

La tabla siguiente muestra en cada caso el valor del diámetro que se seleccionaría para cada uno de los criterios analizados:

TABLA 7. DIÁMETROS COMERCIALES SELECCIONADOS SEGÚN LOS CRITERIOS CONSIDERADOS.

Nviv	DPE_NIA Tipo C	DPE_NIA Tipo D	DPE_CTE	DPE_simulaciones
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5	54.2	54.2	28,8	28,8
10	54.2	54.2	28,8	28,8
15	65	65	36,2	28,8
20	65	65	36,2	36,2
25	65	65	45,6	36,2
30	65	65	45,6	36,2
35	65	65	45,6	36,2
40	65	65	45,6	45,6
45	65	79.6	54,2	45,6
50	79.6	79.6	54,2	45,6

Las principales conclusiones que se pueden obtener son las siguientes:

- El dimensionado según la NIA (tanto para la designación de las viviendas del edificio como Tipo C o Tipo D) mayorará notablemente la conducción necesaria en el tubo de alimentación del edificio, comparado con los otros criterios seguidos.
- El dimensionado a partir del caudal máximo instalado en la vivienda y los correspondientes coeficientes de simultaneidad (criterio sugerido por el CTE) aproxima valores más semejantes a los obtenidos con las simulaciones con datos reales de viviendas, pero en todo caso mantiene una mayoración que hace necesario acudir para la mayoría de los casos a la serie siguiente de diámetros comerciales del fabricante.
- Si se tiene en cuenta que para el dimensionado se ha mantenido una velocidad máxima en las conducciones de 2 m/s, y el CTE fija para las conducciones plásticas un límite superior de 3 m/s, se concluye que el dimensionado que mejor respuesta presenta sería el seguido a partir de las simulaciones, ya que se dispone de un margen de seguridad que aleja de las condiciones límite de funcionamiento.

## **7 RESPUESTA EN RÉGIMEN TRANSITORIO**

### **7.1 Introducción**

En apartados anteriores se analizó la respuesta de un tramo de red en régimen permanente, caracterizado por las principales propiedades hidráulicas (diámetro de la conducción general y caudal demandado por el conjunto de nudos conectados), obteniendo una gráfica que permite un predimensionado de un tramo a partir una pendiente hidráulica máxima fijada.

En el presente apartado se pretende obtener una correlación similar en régimen transitorio. El efecto transitorio se consigue al alterar las condiciones instantáneas de suministro en el mismo, mediante la modificación de la demanda de agua, debida bien por el aumento del consumo de los abonados conectados en una acometida de la red general, o bien por el arranque de un grupo de bombeo instalado en uno de los edificios conectados.

El conocimiento de la respuesta transitoria completará en gran medida las necesidades y exigencias de la red general en un tramo concreto de la instalación, ya que será posible conocer los descensos de presión que se alcanzan no sólo por el suministro normal de los abonados conectados al mismo, sino que además se dispondrá de información a cerca de las posibles variaciones transitorias que completan la respuesta real en el tramo.

Para las simulaciones en régimen transitorio se utiliza el programa de simulación Allievi, programa que actualmente se está desarrollando en el grupo de investigación.

Respecto al procedimiento seguido, se ha intentado analizar los efectos instantáneos de consumo introducidos en la red, en una primera instancia por la modificación de la demanda en diferentes acometidas de un tramo en dos instantes sucesivos (utilizando datos de consumo de vivienda de la misma forma que en análisis en régimen permanente), y posteriormente se ha analizado el efecto introducido en la red por el arranque de un grupo de bombeo de un edificio, modelándose su efecto para unas condiciones determinadas de funcionamiento.

Es necesario destacar inicialmente, que el estudio realizado en transitorio está lejos de aportar conclusiones evidentes al lector, ya que se ha comprobado durante el análisis de las simulaciones la complejidad que presenta el estudio debido a la casuística que presenta el fenómeno de la propagación de las ondas de presión y, por tanto, tan sólo se muestra algunos de los efectos obtenidos con las simulaciones, y se propone una posible línea de investigación que complete los posibles efectos del fenómeno.

## 7.2 Respuesta del tramo de red tras por la modificación de la demanda

Con el programa de simulación se ha analizado el efecto introducido por la variación de la demanda en las acometidas de un tramo de red, en el caso de que la totalidad de viviendas se suministren en directo, es decir, sin la interposición de ningún grupo de bombeo ni de almacenamiento. Para ello, se ha implementado un esquema similar al mostrado en la siguiente figura:

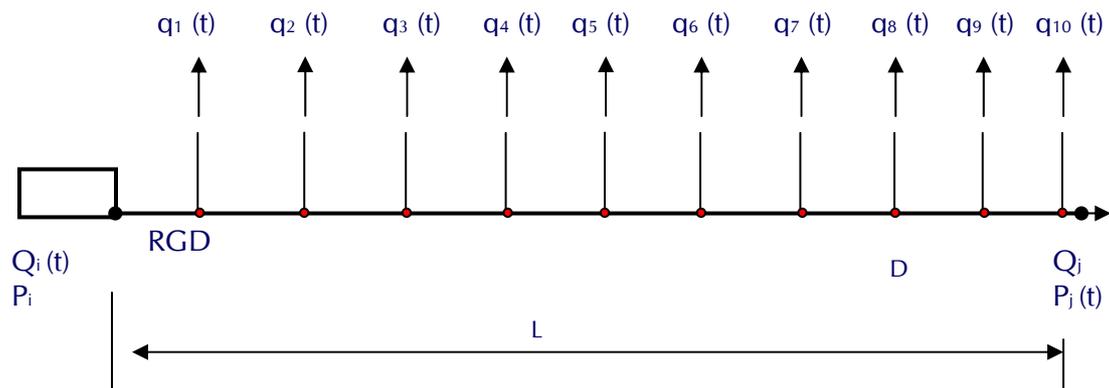


FIGURA 33. TRAMO DE RED SIMULADO EN RÉGIMEN TRANSITORIO.

En él se representa la conexión de diferentes acometidas de edificios a la tubería general de abastecimiento de una calle (de 79 mm de diámetro, espaciadas 20 metros), de la misma forma que en el caso de los análisis en régimen permanente. La presión a la entrada de la red se representa a partir de un depósito de grandes dimensiones con la cota de solera igual a la presión de entrada en el tramo.

Respecto a las demandas de cada uno de los edificios, se han seleccionado dos instantes de consumo aleatorios utilizando de nuevo consumos reales de la base de datos (se ha construido edificios de 10 viviendas conectados a cada uno de los nudos de consumo de la calle, alimentados en directo, obteniendo las correspondientes demandas en las acometidas).

El efecto transitorio se producirá al modificarse la demanda en los respectivos nudos de consumo, téngase en cuenta que el intervalo de variación de la demanda a partir de los datos de consumo es de 10 segundos. Respecto a cómo se produce la variación en la demanda, se ha seleccionado una variación lineal originada durante los 10 segundos desde la demanda inicial hasta la final.

La siguiente gráfica muestra la variación de presión que se origina en el nudo final del tramo ( $P_f(t)$ ), al modificarse la demanda en las acometidas de la instalación. En este caso, la presión en el nudo final desciende por el aumento de la demanda global en los nudos de consumo tal como se puede observar en la Figura 35Figura 23.



FIGURA 34. EVOLUCIÓN DE LA PRESIÓN EN EL NUDO FINAL DE TRAMO.

Tal como se observa, la presión inicial en el nudo final del tramo es aproximadamente 17 mca y, en el instante  $t=0$  s comienza la variación de la demanda en las viviendas, hasta finalizar ésta en el instante  $t=10$  s. Posteriormente se observa una pequeña fluctuación de la presión hasta que se estabiliza en un valor próximo a 16.65 mca. Durante la duración del transitorio, se observa una serie de fluctuaciones que, como se verá en la gráfica de caudal, están debidas a la variación del caudal en cada instante, ya que durante dicho intervalo, se están modificando linealmente las demandas de todos los nudos que representan las acometidas de la instalación, en algunos casos se aumentará el consumo del nudo, y en otros habrá una reducción del consumo inicial.

Las fluctuaciones de presión originadas en el transitorio no son elevadas, ya que la variación de la demanda es suave a partir de una variación lineal. Como se comprobará más adelante, si las variaciones se hubieran originado por el arranque de grupos de bombeo de velocidad fija conectados en directo a la acometida del edificio, la depresión originada hubiera sido mucho más significativa, ya que el caudal detraído sería el correspondiente al caudal punta del edificio, y la variación de las condiciones de funcionamiento son mucho más significativas.

La siguiente gráfica muestra el aumento lineal de la demanda global en la red (téngase en cuenta que la variación de la demanda en algunos nudos aumenta, mientras que otros se reduce, siendo en todo caso la variación global un aumento)



FIGURA 35. EVOLUCIÓN DEL CAUDAL EXTRAIDO DEL DEPÓSITO.

El programa utilizado para la simulación en régimen transitorio aproxima además una respuesta del funcionamiento de la red en régimen permanente. Es posible comparar dicha respuesta con la que se obtuvo con las simulaciones en régimen permanente para validar, en una primera instancia, la bondad de los resultados obtenidos en la primera fase del trabajo.

A efectos de comprobación del permanente, la variación lineal introduce menores perturbaciones durante el transitorio, pero en todo caso estabiliza el valor de la presión en los mismos valores que si la variación se produce a partir de un escalón u otro tipo de variación.

Por otro lado y, como era de esperar, se ha comprobado que los valores de presiones en régimen permanente para los dos escenarios de caudales originan valores que coinciden con las presiones obtenidas con el programa hidráulico EPANET.

Para ello se acude a la Figura 18, con los datos propios de la simulación anterior:

Datos:

- Diámetro instalación general = 79 mm
- Carga en tramo = 3.68 l/s = 12.14 m<sup>3</sup>/h
- Longitud de tramo = 10·20 m = 200 m

- Presión entrada (depósito) = 18 mca
- Presión permanente = 16.65 mca
  - $j = (18 \text{ mca} - 16.65 \text{ mca}) / 0.2 \text{ km} = 6.75 \text{ mca}$

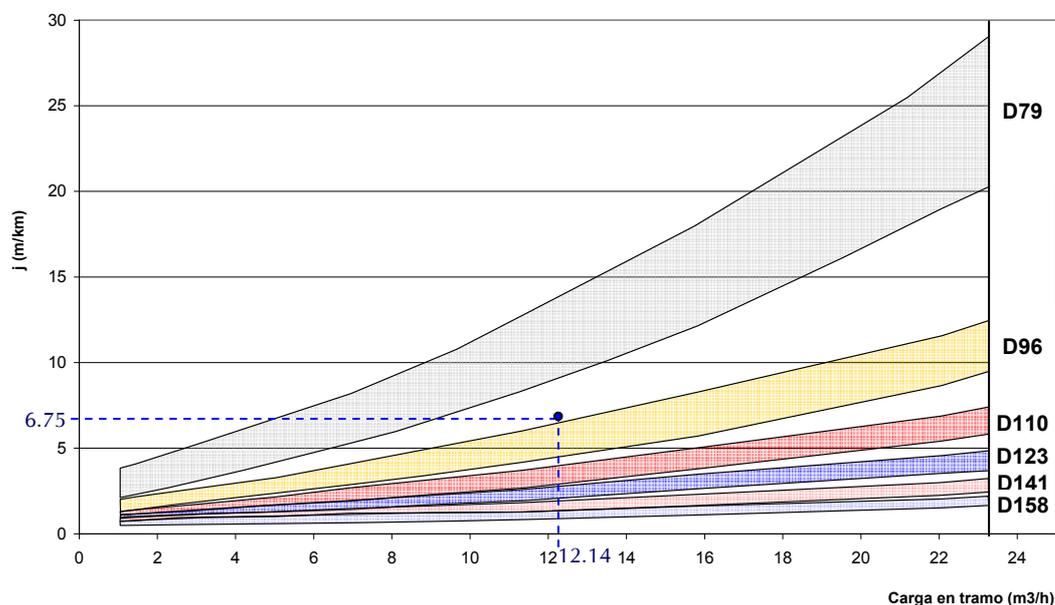


FIGURA 36. COMPROBACIÓN DE LA RESPUESTA PERMANENTE.

Como se puede comprobar, el punto de funcionamiento está por debajo de la franja de pendientes máximas para el diámetro 79 mm, (dicha franja era el resultado de unir los extremos de las series de presiones mínimas alcanzadas en las simulaciones en régimen permanente).

Por tanto, se concluye que los resultados obtenidos en el análisis en régimen permanente, aproxima valores similares a los obtenidos con el programa de transitorios después de la estabilización de la serie.

### 7.3 Respuesta del tramo de red tras el arranque de un grupo de bombeo

A continuación se analiza el efecto transitorio originado en la red por el funcionamiento de un grupo de bombeo conectado a la conducción general del tramo.

Concretamente se ha analizado el efecto introducido al variar el diámetro de la conducción general al que estaría conectada la acometida del edificio correspondiente. Para ello se ha utilizado el programa de simulación de transitorios, para unas mismas condiciones de funcionamiento del tramo, variando únicamente el diámetro de la conducción general de la red pública.

Los efectos que se han simulado son los originados por la parada y el arranque del grupo, que son los que constituirían las maniobras transitorias normales del grupo de bombeo instalado en un edificio.

El punto de seguimiento es justo la unión entre la acometida del edificio y la tubería general de la instalación, comprobando que la transmisión de los efectos por cambio de sección a la tubería general, no varía sensiblemente los resultados en las proximidades de la conducción.

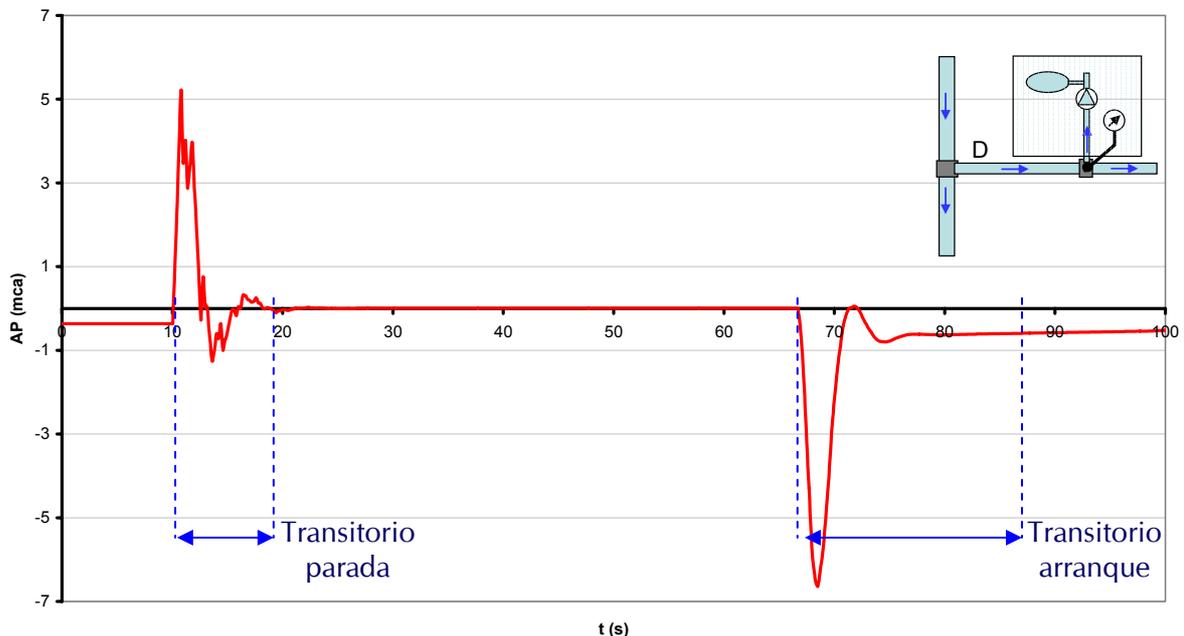


FIGURA 37. EFECTOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GRUPO DE BOMBEO.

La figura anterior muestra los efectos del transitorio en la parada y el arranque de un grupo de bombeo conéctalo en un tramo de la instalación, tal como se muestra en el esquema adjunto a la gráfica. El tiempo intermedio entre ambos estadios se corresponde con el periodo en el que la bomba permanece parada y el suministro se realiza a partir del depósito de membrana, hasta que la presión en su interior es insuficiente y se produce el arranque del grupo.

### 7.3.1 Parada del grupo de bombeo

La siguiente figura muestra la simulación del efecto originado por la parada de un grupo de bombeo conectado a la red general en función del diámetro instalado en la conducción principal:

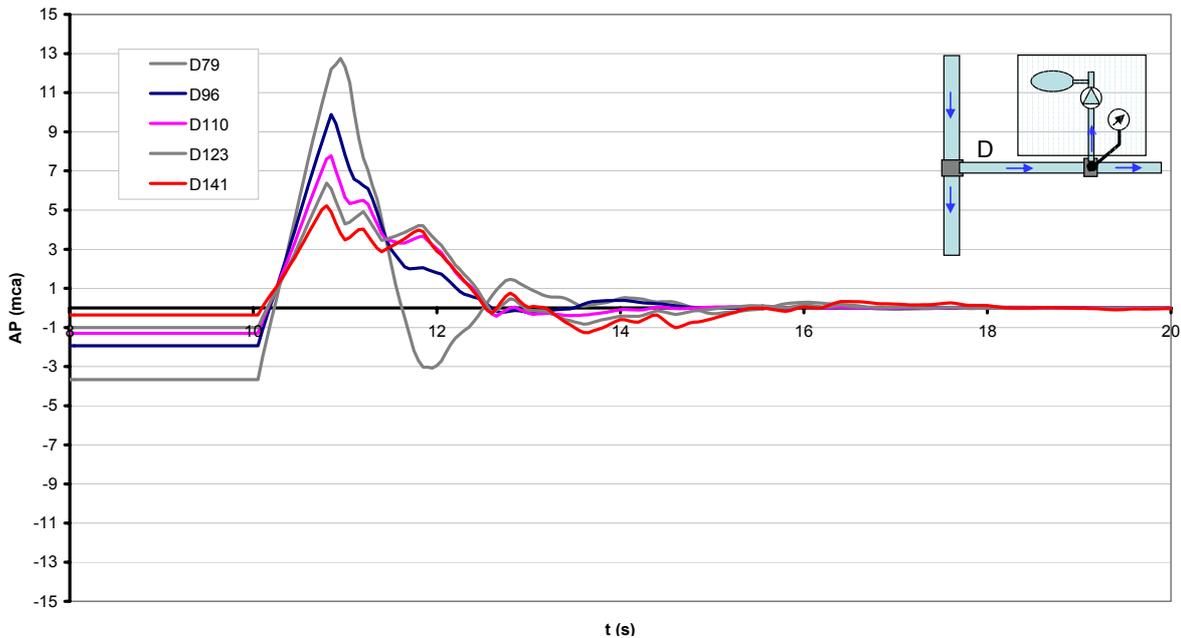


FIGURA 38. PARADA DEL GRUPO DE BOMBEO.

En la gráfica anterior se distinguen dos estados:

- Estado 1: Suministro con el grupo de bombeo en marcha.
- Estado 2: Parada del grupo de bombeo.

#### 7.3.1.1 Descripción de la respuesta en el estado 1

En el primer estado (comprendido desde  $t=0$  hasta  $t=10$  s de la gráfica anterior), la bomba permanece en marcha aportando un caudal próximo al punta para rellenar el calderín y suministrar a posibles abonados. Durante este estado la depresión generada en la conexión de la acometida es prácticamente constante (en realidad sería ligeramente decreciente debida a la ligera reducción del caudal de bombeo al aumentar la presión en el calderín), y es debida sólo a las pérdidas de fricción en la conducción general y a las originadas en los elementos.

La gráfica también muestra cómo la depresión es mayor para la conducción de menor diámetro, ya que en este caso las pérdidas son sensiblemente mayores que para el resto de conducciones. También es posible apreciar cómo las pérdidas por rozamiento no siguen un comportamiento lineal, siendo mucho más sensibles a diámetros menores.

### 7.3.1.2 Descripción de la respuesta en el estado 2

En el instante  $t=10$  s, se origina la parada del grupo de bombeo, comandado por el presostato que controla la presión en el calderín, y tiene origen el transitorio que eleva los valores de presión en la entrada del grupo.

El tiempo de parada del grupo se ha programado de una duración entre 2 y 3 segundos, que suelen ser los valores usuales para dicha maniobra. El transitorio se estabiliza en aproximadamente 8 segundos para el conjunto de conducciones.

Las sobrepresiones originadas alcanzan los 13 mca para la conducción de 79 mm, en las que la velocidad de circulación del fluido es más elevada. Y mantiene valores próximos a los 5 mca para la conducción de mayor diámetro (tubería de 141 mm).

El efecto de la sobrepresión por la parada es menos problemático que el caso del arranque, ya que los usuarios conectados en el mismo tramo no experimentan un descenso de las condiciones de suministro, aunque sí podrían experimentar variaciones sensibles de la presión en el punto de entrega (en el caso de tratarse de abonados conectados en directo a la red de distribución sin la interposición de ningún equipo de sobrepresión ni almacenamiento).

### 7.3.2 Arranque del grupo de bombeo

La siguiente figura muestra el efecto originado por el arranque del grupo:

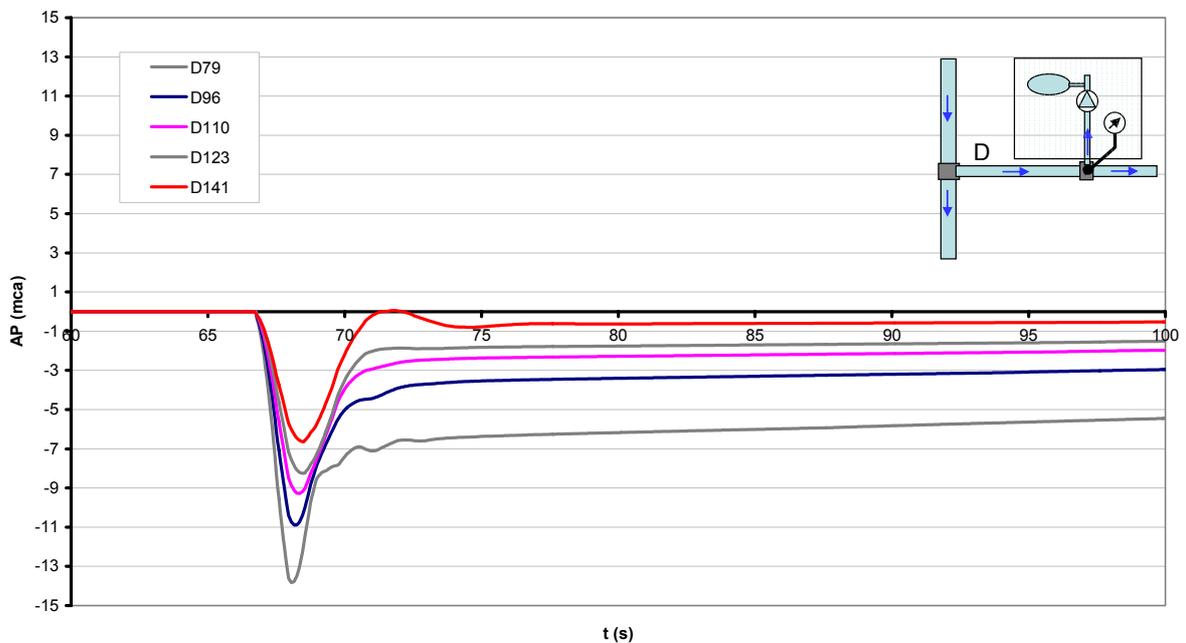


FIGURA 39. ARRANQUE DEL GRUPO DE BOMBEO.

El arranque se origina cuando la presión en el calderín desciende por debajo de la presión mínima de funcionamiento (aquella que asegura la presión mínima exigida en los puntos de consumo).

En el momento del arranque se produce una depresión originada por la succión de la bomba. Los valores de la depresión originada son próximos a 14 mca para la conducción de 79 mm, mientras que para la tubería de 141 mm, el descenso está en torno a los 7 mca.

La presión después del transitorio del arranque se estabiliza en los valores propios del régimen permanente hasta que de nuevo se alcanza la presión máxima en el calderín y se comienza un nuevo ciclo de funcionamiento de la bomba. Durante estos instantes se aprecia el ligero aumento de la presión en la acometida, debido a la reducción del caudal bombeado por el grupo por el aumento de la presión en el calderín.

A diferencia de lo que ocurría con la sobrepresión originada durante la parada del grupo de bombeo, el efecto de la depresión puede perjudicar notablemente el suministro en el tramo, ya que puede originar valores de presión en algunas acometidas excesivamente bajos, efecto que se agravaría si se producen varios arranques de grupos de bombeo de forma simultánea.

Para el ejemplo simulado, se observa que la mayor depresión por arranque del grupo de bombeo (originada sobre la conducción de 79 mm) es de aproximadamente de 10 mca sobre la depresión de régimen permanente, reduciéndose aproximadamente 1 mca para cada una de las conducciones de mayor diámetro respectivamente. Esto significa que, para una red como la de Valencia, en la que la presión en las acometidas en régimen permanente es de aproximadamente de 30 mca, el arranque de un grupo de bombeo conectado a dicha acometida originaría una depresión cuyo transitorio alcanzaría una presión de 20 mca aproximadamente (para una conducción de 79 mm), con una duración aproximada de 2 segundos, este efecto se transmitiría a las acometidas contiguas, reduciendo de forma instantánea mientras dura el transitorio. La transmisión de dicho efecto, tal como se verá más adelante, es más sensible en la acometida conectada al grupo de bombeo, pero en todo caso, nudos agua abajo de éste experimentarían unas ligeras fluctuaciones, mucho más severas si al arranque anterior se une el funcionamiento de otros grupos de bombeo conectados a acometidas próximas.

El efecto conjunto del funcionamiento de un grupo de bombeo para diferentes diámetros de conducción general se puede observar en la siguiente figura:

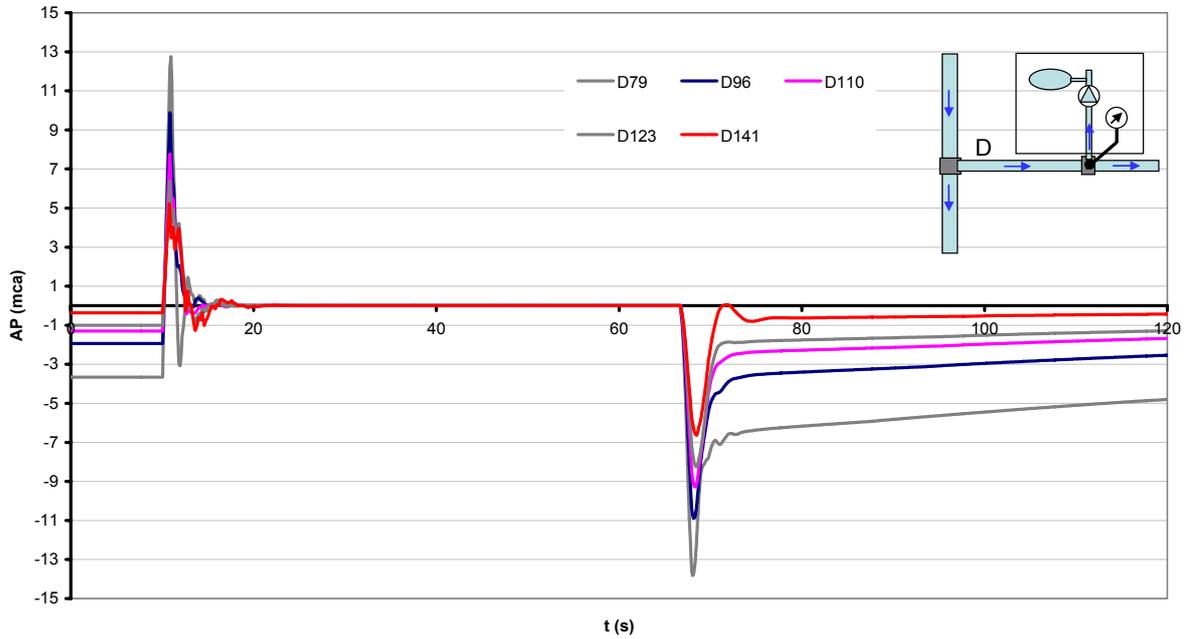


FIGURA 40. RESPUESTA DE DIFERENTES DIÁMETROS AL FUNCIONAMIENTO DEL GRUPO.

La representación de los efectos en los nudos principales de la instalación se puede seguir en la siguiente gráfica:

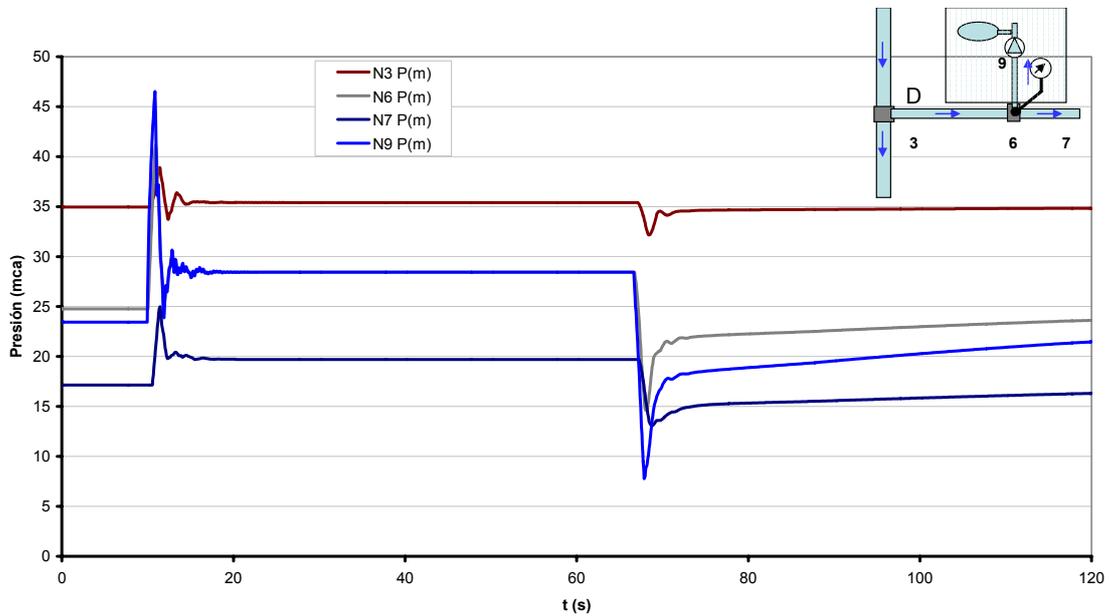


FIGURA 41. EVOLUCIÓN DE LAS PRESIONES EN EL TRAMO.

#### 7.4 Influencia del tamaño del edificio en la depresión generada

De forma similar a la desarrollada en régimen permanente, en la que se analizó la relación entre el diámetro instalado en la conducción pública (tubería a la que se conectan las acometidas de los edificios), y la demanda de agua en el tramo, en el presente apartado se persigue obtener una relación similar considerando el tamaño del edificio.

Para ello, se ha realizado un conjunto de simulaciones de tramos con diferentes configuraciones y, la principal conclusión a la que se ha llegado es la gran influencia que presentan las condiciones de contorno que describen el tramo, a diferencia de lo que ocurre en régimen permanente.

En esta línea, además de la influencia que presenta el diámetro de la conducción general o el caudal que circula por la misma, otras variables como la proximidad entre acometidas, la distancia entre el nudo de entrada (depósito de grandes dimensiones) o el nudo de salida de red y el punto de análisis, el tamaño y características del grupo de bombeo (tamaño del calderín, potencia y número de bombas...), el desfase entre arranques de grupos de bombeo del tramo, el cambio de sección en las conexiones entre conducciones, la configuración de la instalación general del edificio, presentan una notable influencia entre los efectos generados durante el transitorio. Esto es debido en gran medida a la transmisión de los pulsos del transitorio y el rebote de los mismos al modificarse las condiciones de contorno durante la propagación.

Dada la dificultad de encontrar una correlación entre la causa-efecto del transitorio, el análisis realizado en el presente apartado se ha simplificado buscando, para una configuración determinada, el efecto causado para diferentes tamaños de edificios. Concretamente en el ciclo de arranque de la bomba, ya que, como se ha visto anteriormente, es el transitorio que mayores problemas puede presentar al suministro correcto de los abonados de la red.

Las simulaciones se han desarrollado sobre el esquema que se muestra a continuación:

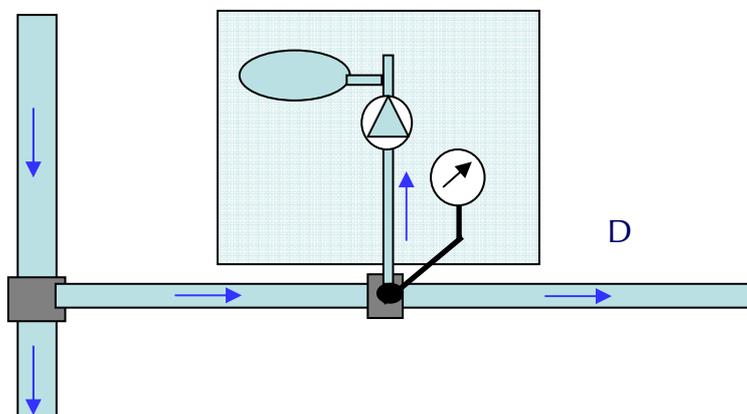


FIGURA 42. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN SIMULADA.

La conducción general analizada es la conectada directamente a la acometida del edificio. De esta conducción se ha variado el valor del diámetro interior para analizar su influencia en el transitorio (se han tomado los mismos diámetros que en el análisis en régimen permanente). Además, los elementos instalados en la conducción general y que forman parte de las condiciones de contorno del transitorio, se han alejado lo suficiente, con la finalidad de que los efectos de los rebotes influyan lo menos posible.

A la acometida se ha conectado en directo el grupo de bombeo del edificio, en la correspondiente instalación general del mismo. Este grupo está formado por el equipo moto-bomba de velocidad fija y el correspondiente depósito a presión de membrana, seleccionados ambos a partir del dimensionado del edificio al que suministra, tal como se viene haciendo en instalaciones reales.

La otra variable analizada es el tamaño del edificio, caracterizado éste por el número de viviendas que lo integran (materializadas por el caudal punta que debe demandar la bomba correspondiente). El tipo de vivienda considerado es similar al contemplado anteriormente (vivienda de 10 aparatos con un caudal instalado de aproximadamente 1.5 l/s).

Realizadas las simulaciones con el programa de transitorios se ha obtenido la siguiente gráfica, en la que se muestra una correlación entre la depresión originada por el arranque de un grupo de bombeo conectado a una conducción pública y el caudal que trasiega la bomba (función del tamaño del edificio). Las gráficas resultados de las simulaciones se adjuntan en el anejo correspondiente.

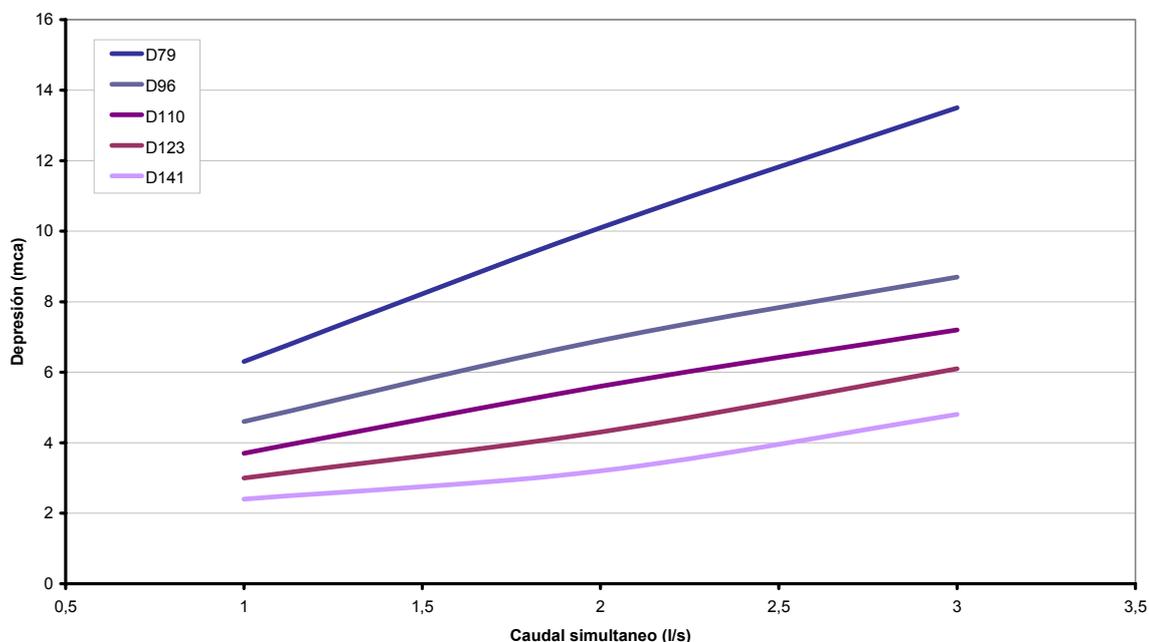


FIGURA 43. DEPRESIÓN GENERADA EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA CONDUCCIÓN GENERAL.

A partir de la gráfica anterior y, fijada una depresión máxima admisible en la acometida (para una instalación similar a la simulada), es posible seleccionar la conducción que origine una depresión inferior a la máxima para diferentes caudales punta del grupo. Por ejemplo, si se fija una depresión máxima de 6 mca, y el caudal punta del edificio es de aproximadamente de 2.5 l/s (edificio de 25 viviendas según la expresión del CTE), se deberá seleccionar en este caso una conducción general de diámetro interior superior a la serie de 110 mm, por ejemplo, la conducción de PE de 123 mm de diámetro interior.

Esta gráfica completaría la información aportada por el análisis en régimen permanente, en la que se determinó la influencia de la conducción general del tramo en la caída de presión bajo un funcionamiento estabilizado y un caudal circulante determinado y, por tanto, puede ser de utilidad para el diseñador para la estimación de la respuesta esperada de un tramo de características hidráulicas y operacionales conocidas.

## **7.5 Conclusiones del análisis en régimen transitorio**

Una de las principales conclusiones obtenidas con el estudio muestra, la dificultad que presenta la contemplación de toda una casuística de condiciones de contorno que influyen en la respuesta en régimen transitorio del tramo. Condiciones que deben analizarse en detalle y que precisa de una gran dedicación, que puede ser adoptada para desarrollar una línea de investigación que marque el desarrollo de una futura tesis doctoral, pero que en todo caso, queda lejos de las pretensiones perseguidas con el presente trabajo de investigación.

Por otro lado, del análisis realizado se ha obtenido una posible relación entre los principales parámetros del tramo (diámetro de la conducción general y demanda de una de las acometidas de la instalación), con la posible depresión generada en el instante en el que entra en funcionamiento el grupo de bombeo. Tal depresión puede ser un parámetro limitado en una red con la finalidad de no alterar el suministro a otras instalaciones conectadas al tramo, o no producir el colapso del mismo, y por tanto, puede orientar al instalador durante el proceso de selección de la conducción a instalar o de los mecanismos de protección necesarios para reducir los efectos del transitorio.

## **8 CONCLUSIONES**

Respecto al análisis permanente, el método propuesto ha permitido aproximar el valor de la presión mínima que se originaría en un tramo de red con acometidas de usuarios residenciales. El método se basa en la construcción de modelos de simulación, éstos integra por un lado, la información relativa a la estructura del tramo, junto con la información propia de la instalación general de los edificios conectados, y por otro lado, las pautas de consumo características en viviendas residenciales.

La flexibilidad que aporta un modelo de simulación permite construir modelos hidráulicos de tramo y analizar la respuesta de una misma red bajo diferentes combinaciones de parámetros. Esto posibilita analizar de forma sencilla su respuesta bajo diferentes configuraciones, proporcionando una herramienta de decisión útil en procesos de dimensionado o renovación de tramos.

En cuanto a las instalaciones generales de los edificios, se han modelado las tipologías más comunes, con la finalidad de obtener, para cada una de ellas, el grado de afección en el valor de las presiones alcanzadas en el tramo de red. Se ha conseguido además, obtener la respuesta de cada una de ellas para un mismo escenario hidráulico, y una misma asignación de datos de consumo. Esta consideración puede orientar sobre la necesidad de modificar algunos esquemas de instalaciones generales, en el caso de que no sea posible garantizar condiciones mínimas de servicio debido a las perturbaciones introducidas por algún diseño, o bien validar la posibilidad de introducir nuevos esquemas, como el derivado de la eliminación de depósitos atmosféricos de aspiración. En esta línea, la comprobación de la capacidad de transporte de un tramo a partir de los resultados de las simulaciones, puede advertir al gestor del servicio, de la posibilidad de instalar grupos de bombeo conectados directamente en aspiración, evitando los problemas derivados de los depósitos auxiliares de alimentación.

Como era de esperar, se ha comprobado que las exigencias introducidas, cuando la instalación general del edificio dispone de grupo de bombeo de velocidad fija sin depósito de aspiración, aumentan sensiblemente, pudiendo derivar en un descenso significativo de la presión en el tramo, siendo más perjudicial si coincide con el arranque de más grupos de presión de otros edificios conectados al tramo. Por el contrario, el suministro en directo o a partir de grupos de bombeo equipados con variador de frecuencia, reduce sensiblemente las exigencias, y además reducen las perturbaciones originadas por los transitorios de arranque y parada del grupo motobomba.

Respecto a la asignación de la demanda propia de cada usuario y, a diferencia de lo que comúnmente se hace, el procedimiento acude a datos reales de consumo en viviendas, y los emplea directamente en el módulo de simulación. Los resultados obtenidos con dichos valores, ajustan en mayor medida a las condiciones de funcionamiento reales en un abastecimiento, ya que la mayoración

de las exigencias conduce a un sobredimensionado injustificado del tramo de red de abastecimiento.

La elevada resolución de los datos de consumos utilizados (volúmenes consumidos por vivienda cada 10 segundos), hace posible la consideración de la simultaneidad en los usos de aparatos, tanto en la instalación particular de cada abonado, como en la superposición de usos dentro de un mismo edificio. Esta peculiaridad del estudio aporta un valor añadido a los resultados obtenidos con el procedimiento de simulación, y justifica la aproximación de los resultados obtenidos al comportamiento real del sistema.

Se destaca además que, los gráficos obtenidos de las simulaciones realizadas, son útiles para validar los procedimientos seguidos en la selección de los diámetros a instalar en los tramos de red, aportando una aproximación rápida de las exigencias probables de éste, traducidas en un caudal detráido de las acometidas de cada uno de los edificios conectados al tramo. Por ejemplo, si en un abastecimiento se fija el valor mínimo de presión en las acometidas de los abonados, es posible obtener la pendiente hidráulica máxima posible y, accediendo a la gráfica, determinar qué diámetro es el más indicado para su carga de consumos, o bien, obtener el margen de presión disponible según el diámetro instalado. Este margen puede orientar al equipo gestor sobre la posibilidad de prescindir de depósitos auxiliares de aspiración, o bien exigir la instalación de los mismos tal como se especifica en el CTE.

Respecto al estudio en régimen transitorio, se ha conseguido modelar el efecto introducido por la variación de la demanda en el tramo de red, tanto para el suministro en directo de las viviendas conectadas, como el suministro mediante la interposición de un grupo de bombeo. En este último caso se han representado los efectos introducidos por el arranque y parada del grupo, destacando la problemática que supone un descenso instantáneo de la presión en las acometidas próximas a la que se produce la perturbación, así como la propagación de la misma en dicha conducción. En esta línea, se ha comprobado la complejidad que envuelve el análisis transitorio, y la variabilidad en la respuesta que introducen las principales variables que definen el tramo. Por este motivo, el análisis mostrado sólo trata de mostrar algunos efectos del fenómeno, sin conseguir obtener una correlación entre las principales variables involucradas al nivel del estudio en régimen permanente.

Finalmente, se destaca la aportación con el presente trabajo de investigación de una expresión que permite aproximar el caudal punta demandado por un conjunto de viviendas. Además se ha comparado el criterio propuesto con los comúnmente utilizados en el dimensionado de conducciones, materializando el mismo en la selección de una conducción para la tubería de alimentación de diferentes tamaños de edificio, obteniendo para la mayoría de casos, un diámetro necesario inferior con el criterio propuesto.

## 9 REFERENCIAS

Arregui, F. (1998). "Propuesta de una metodología para el análisis y gestión del parque de contadores de agua en un abastecimiento." Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Buchberger, S. G. and Lee, Y. (1999) "Evidence Supporting the Poisson Pulse Hypothesis for Residential Water Demands" Proceedings of International Conference on Computing and Control for the Water Industry, Exeter, United Kingdom, pp 89-101.

Buchberger, S. G. y Wells, G. J. (1996). "Intensity, Duration and Frequency of Residential Water Demands". Journal of Water Resources Planning and Management. January-February 1996.

Buchberger, S. G. y Wu, L. (1995). "Model for Instantaneous Residential Water Demands". Journal of Hydraulic Engineering. Vol 121, No 3, March, 1995.

DeOreo, W. B., Heaney, J. P., y Mayer, P. W. (1996). "Flow trace analysis to assess water use". Journal AWWA, 79-90.

García Carrasco, V.J. (2003). "Modelación de la demanda urbana de agua" Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Media Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, España.

García Carrasco, V.J.; García Bartual, R.; Cabrera Marcet, E.; Arregui de la Cruz, F. y García-Serra García, J. (2003). "Stochastic Model to Evaluate Residential Water Demands" Journal of Water Resources Planning and Management. Asce.

Iglesias Rey, P. L., López Patiño, G. y Martínez Solano, J. (1998). "Influencia de la modulación del consumo de agua en la calidad del suministro". I Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Sequías. Zaragoza. España.

Mayer, P. W., DeOreo, W. B., Opitz, E. M., Kiefer, J. C., Davis, W. Y., Dziegielewski, B. y Nelson, J. O. (1999). "Residential End Uses of Water". American Water Works Association Research Foundation, USA.

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. "Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de Suministro de Agua (NIA)". Centro de Publicaciones (1975). Según Orden de 9 de Diciembre de 1975 (B.O.E. del 13-1-76 y corrección de errores en el B.O.E. de 12-2-76).

Ministerio de la Vivienda. "Código Técnico de la Edificación (CTE)". BOE nº 74, por el RD 314/2006, de 17 de marzo de 2006.

Norma UNE –En 806-2. Especificaciones para instalaciones de agua destinadas al consumo humano en el interior de edificios.

R.D. 140:2003 de 7 de febrero de 2003. Criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Rossman, L.A. (1993). EPANET User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio.

Wells, G. J. (1994). "Statistical characteristics of residential water demands." Master's thesis, Univ. of Cincinnati, Cincinnati.

# Anejos



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## ANEJO I. TERMINOLOGÍA

*Acometida*: tramo de red que une la tubería de la red pública con la instalación general de un edificio o vivienda.

*Alimentación directa*: conexión directa entre la red pública de abastecimiento y la instalación particular del abonado (no hay interposición de ningún elemento como: depósito atmosférico, calderín o bomba).

*Aljibe*: los depósitos para recogida y almacenamiento de agua de lluvia. Los aljibes sólo podrán tener ámbito particular, quedando prohibido su uso para colectividades. En algunos casos también hace referencia a los depósitos auxiliares de alimentación a grupos de bombeo.

*Bomba de velocidad fija*: grupo de sobreelevación que permite disponer de una presión mayor que la que proporciona la red de distribución a partir del acople directo de un motor eléctrico y una bomba hidráulica. Definido en el CTE como grupo convencional.

*Bomba de velocidad variable*: grupo motobomba equipado con variador de frecuencia que permite una regulación de la velocidad de giro del motor, reduciendo los efectos transitorios ocasionados en el arranque y parada. Definido en el CTE como grupo de accionamiento regulable o caudal variable.

*Calderín*: depósito a presión hidroneumático, cuya finalidad es evitar el arranque continuado del equipo de bombeo.

*Capacidad de transporte*: caudal que es capaz de transportar una conducción sin que se alcancen valores de pérdidas elevadas que imposibiliten el correcto suministro de las instalaciones de los abonados.

*Curva de modulación de la demanda*: conjunto de factores que tienen en cuenta el carácter variable de la demanda. La demanda resultante para un periodo es el producto de la demanda media por el factor correspondiente de la curva de modulación.

*Demanda base o demanda media*: volumen de agua promedio consumida durante un determinado tiempo.

*Densidad de acometidas*: número de acometidas por longitud de tramo.

*Depósito atmosférico o auxiliar*: depósito instalado en la alimentación de los grupos de bombeo con la finalidad de aislar la instalación general del edificio de la acometida. Dicho aislamiento reduce las perturbaciones derivadas del funcionamiento de las bombas, tanto en régimen permanente como en el transitorio provocado durante el arranque y parada del grupo.

*Fichero INP*: fichero propio de trabajo del programa hidráulico Epanet.

*Grupo convencional*: grupo de bombeo definido en el CTE, equipado con una bomba de velocidad fija, calderín y un depósito en la aspiración de la bomba que evita los descensos de presión y perturbaciones en la red general del tramo que alimenta.

*Instalación general*: instalación interior del edificio. Conecta el tramo de acometida con la instalación particular del abonado. Es el punto de la instalación donde iría conectado el grupo de bombeo si se precisa.

*Instalación particular del abonado*: instalación situada en el interior de la propiedad de cada abonado, empezaría en la llave de corte situada en el interior de la vivienda.

*Mca (metros de columna de agua)*: unidad de presión.  $1\text{bar} = 0.1\text{ kg/cm}^2$ .

*Pendiente hidráulica (pérdidas de carga unitarias)*: la pérdida total que se origina por unidad de longitud. Está relacionada con el caudal circulante por el tramo y el diámetro de conducción en el mismo.

El valor de la pendiente hidráulica se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$j \text{ (mca/km)} = \frac{\Delta p \text{ (mca)}}{L \text{ (Km)}} \quad \text{Ec. 13}$$

Siendo:  $\Delta p$  la caída de presión para una determinada longitud,  $L$ , de tramo de tubería.

*Red pública de abastecimiento*: tramo de la red general de distribución de un municipio al que están conectados los diferentes edificios mediante la correspondiente acometida domiciliaria.

## ANEJO II. TIPOS DE ESQUEMAS INTERIORES DE SUMINISTRO EN EDIFICIOS

A continuación se describen los tipos de instalaciones más comunes que pueden darse en instalaciones generales de los edificios:

### II.1 Suministro en directo (Tipo I)

En instalaciones con suministro en directo el agua entra en la instalación a través de la acometida domiciliaria y recorre las conducciones hasta los puntos de consumo del abonado sin la interposición de elementos de almacenamiento ni grupos de bombeo.

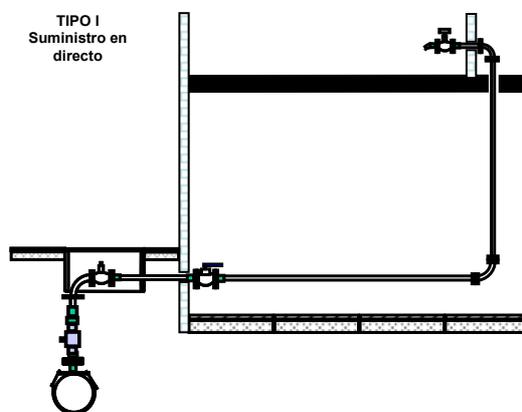


FIGURA 44. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON SUMINISTRO EN DIRECTO.

Desde el punto de vista energético, es la tipología de instalación óptima, ya que aprovecha la presión disponible en la red pública para vencer las pérdidas de carga en la instalación y el desnivel geométrico, manteniendo en los puntos de consumo condiciones de suministro suficientes para la correcta alimentación de los aparatos de la instalación.

Por otro lado, desde el punto de vista de la calidad del agua suministrada, la alteración de las características de salubridad es reducida, ya que el esquema limita la entrada de agentes externos a la conducción, siendo únicamente posible la incidencia si existen problemas de estanqueidad en las conducciones y resto de elementos de la instalación. En cuanto a la conservación de los agentes desinfectantes, la ausencia de contacto atmosférico y de tiempos de permanencia elevados, mantiene la concentración de éstos en niveles similares a los existentes a la entrada del edificio.

Este tipo de esquema está supeditado a la existencia de presión suficiente en la red pública para garantizar la presión mínima exigida en los puntos de consumo por la reglamentación vigente, presentando problemas en redes que experimentan variaciones de presión considerables en las acometidas, ya que, con presión suficiente, el suministro se desarrolla de forma correcta, pero ante descensos de

presión de suministro, el usuario puede notar tales fluctuaciones, pudiendo incluso disponer valores inferiores a los exigidos por la normativa vigente y, por tanto, imposibilitando el suministro correcto de los aparatos.

Esta tipología se puede adoptar en instalaciones en las que la red pública de abastecimiento opera con niveles de presión estabilizados y de valor medio suficiente para garantizar las condiciones mínimas exigidas según la normativa vigente. Y por tanto, será necesario acudir al Reglamento de Servicio del abastecimiento, o directamente a la compañía gestora del servicio, para conocer la presión mínima disponible en las acometidas, y determinar la posibilidad de mantener este tipo de suministro en la instalación.

## II.2 Suministro con grupo de velocidad fija (Tipo II)

La instalación de grupos de bombeo está justificada ante la imposibilidad de garantizar las condiciones mínimas exigidas mediante la presión disponible en la red pública. Por ello, se hace necesaria la instalación de un grupo de bombeo que compense la carencia de presión en la red.

En el esquema que se adjunta, la aspiración del grupo de bombeo se conecta directamente a la conducción de alimentación de la instalación general, sin la interposición de ningún depósito auxiliar, avalado por la imposibilidad de generar depresiones en la red general.

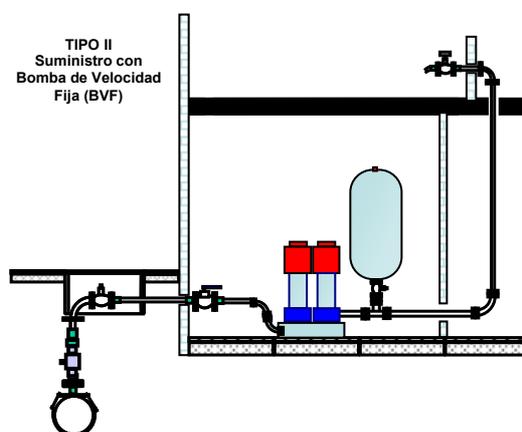


FIGURA 45. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON SUMINISTRO CON BOMBAS DE VELOCIDAD FIJA.

La existencia de un grupo de bombeo, aumenta las exigencias de la red, siendo este efecto más notable cuando se utiliza un grupo de velocidad fija. Por esta razón, el Código Técnico de la Edificación (CTE) insta a la empresa instaladora a disponer de un depósito auxiliar que reduzca el efecto introducido por la aspiración de este tipo de grupos de bombeo. Según la norma UNE 806-2, es preferible una conexión directa frente a una indirecta (con depósito atmosférico), dado que en un sistema cerrado no existe el riesgo de la contaminación del agua potable.

Acudiendo de nuevo al CTE, en su apartado 3 Diseño, se especifica que “las bombas no deben conectarse directamente a las tuberías de llegada del agua de suministro, sino que deben alimentarse desde un depósito, excepto cuando vayan equipadas con los dispositivos de protección y aislamiento que impidan que se produzca depresión en la red”. Por tanto, es posible disponer de este tipo de esquema si se garantiza que no se afecta de forma negativa a la presión en la red general. El propósito del presente documento es establecer bajo qué configuraciones y consideraciones es posible mantener el esquema definido sin perjudicar el funcionamiento de la red ni el suministro a los abonados del servicio.

Esta configuración estaría formada por el grupo de bombeo de velocidad fija y un calderín o acumulador de presión, cuya finalidad es la de reducir el tiempo durante el cual el grupo de bombeo está en marcha.

### II.3 Suministro en directo y con grupo de velocidad fija (Tipo mixto)

Se trata de una combinación de los dos esquemas anteriores. Hay una zona del edificio que con la presión de red garantiza las presiones mínimas en los aparatos, coincidiendo ésta con el suministro a las alturas más bajas del edificio, y la parte superior se abastece a partir de un grupo de bombeo.

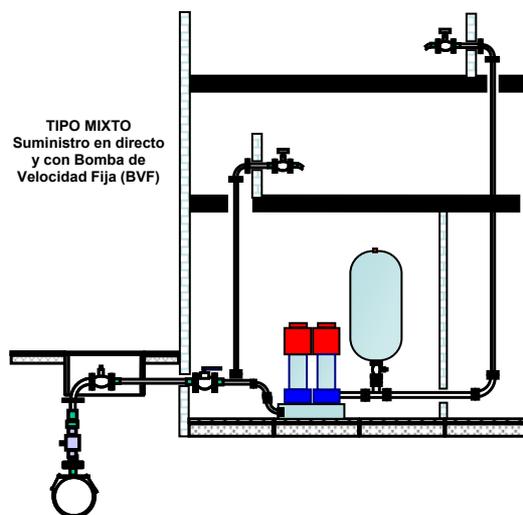


FIGURA 46. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON SUMINISTRO EN DIRECTO Y CON BOMBAS DE VELOCIDAD FIJA.

Es un esquema adoptado en gran número de instalaciones, ya que aprovecha la presión en la red para el abastecimiento, y para las viviendas que esto no es posible, se incorpora el grupo de bombeo.

El tipo de bomba puede ser de velocidad fija o de velocidad variable, pero puesto que la de velocidad fija es más exigente, en este tipo de instalaciones mixtas, se hablará de grupo de velocidad fija.

## II.4 Suministro con grupo de velocidad variable (Tipo III)

Derivado del esquema Tipo II, se dota al equipo de un variador de frecuencia capaz de modificar la velocidad de giro del motor y, en función de las necesidades de la instalación, variar el caudal y la altura aportada por el grupo, manteniendo una presión prácticamente constante en los puntos de consumo de los usuarios.

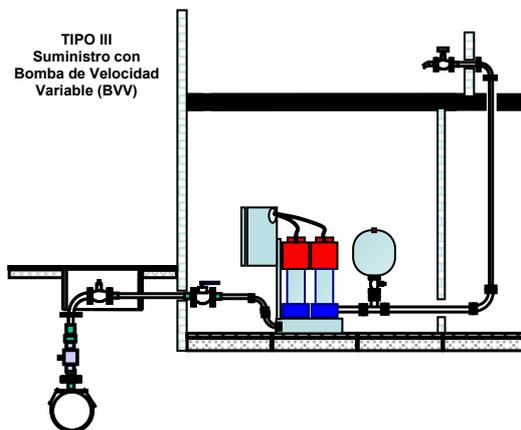


FIGURA 47. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON SUMINISTRO CON BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE.

Respecto a la calidad del agua suministrada y, de forma similar a lo que ocurre en los esquemas anteriores (suministro en directo y suministro con bomba de velocidad fija), al tratarse de un sistema cerrado no se alteran las propiedades del agua suministrada ni la de los agentes desinfectantes.

A diferencia del esquema Tipo II, el funcionamiento del grupo con variador es más moderado, reduciéndose de forma significativa las fluctuaciones de presión originadas en los transitorios de arranque y parada del grupo.

Respecto a la calidad en el suministro, entendida ésta como la capacidad de mantener estables los valores de presión en los puntos de consumo, este esquema consigue mantener constante la consigna de presión programada, de forma que el abonado no experimenta variaciones de presión considerables, y los puntos de consumos mantienen valores prácticamente constantes de presión, reduciendo por tanto, la fatiga de dichos elementos y aumentando la durabilidad de los mismo. Los ruidos generados durante el funcionamiento de este tipo de grupos se reducen respecto al grupo de velocidad fija, esto es debido a la reducción de la velocidad de giro por debajo de la nominal propia de un grupo de velocidad fija. Pueden aparecer problemas de funcionamiento y de rendimiento del equipo, si la programación del equipo no limita la velocidad mínima de giro del motor.

Este esquema está contemplado en el CTE, definido como grupo de accionamiento regulable o de caudal variable, y puede ser instalado sin necesidad de disponer de depósito auxiliar para la desconexión de la red de distribución.

En este tipo de suministros también se incluirían los grupos formados por varias bombas, entre las que se encuentra al menos una equipada con variador, ya que

en este caso, las bombas de velocidad fija cubren los escalones de regulación y es la bomba de velocidad variable la que realiza el ajuste fino de presión.

## II.5 Suministro con grupo de velocidad fija y depósito auxiliar (Tipo IV)

Suministro llamado también “Conexión indirecta” según la norma UNE 806-2. Definido como: “conexión indirecta del dispositivo elevador de la presión a través de una cisterna que está permanentemente abierta a la atmósfera”.

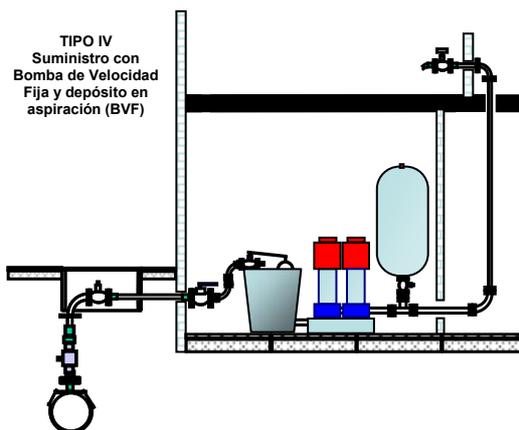


FIGURA 48. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON BOMBA DE VELOCIDAD FIJA Y DEPÓSITO AUXILIAR.

Los problemas más destacados de este sistema de suministro están relacionados con la imposibilidad de garantizar la calidad del agua suministrada en los puntos de consumo, ya que el tiempo de retención del agua en el interior del depósito disminuye la concentración del cloro residual, reduciendo sensiblemente su capacidad de desinfección (Iglesias Rey, P.L.). A partir del Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 45 del 21/02/2003) y, concretamente en su artículo 4, *Responsabilidades y competencias*, se establece que los gestores del servicio (municipios o gestores indirectos) son los responsables de asegurar que el agua suministrada a través de cualquier red de distribución, cisterna o depósito móvil en su ámbito territorial sea apta para el consumo en el punto de entrega al consumidor y, por tanto, son ellos los que deben velar por el correcto mantenimiento de los elementos de la instalación (algunas compañías suministradoras incluyen en su Reglamento de Servicio, la posibilidad de requerir al propietario de la instalación, de evidencias que prueben el correcto mantenimiento de dichos equipos).

Otro problema a considerar derivado de las utilización de depósitos atmosféricos son las pérdidas de agua debido al reducido mantenimiento que se realiza sobre los sistemas de control de llenado, generalmente válvulas de boya, de forma que un incorrecto cierre o un final de carrera a bajos caudales, origina una circulación de caudal reducido que en muchos casos, no es detectado por los contadores domiciliarios y, en otras circunstancias, acaba abandonando el sistema de suministro a través del desagüe del propio depósito atmosférico.

Este tipo de instalación está muy extendido en la mayoría de abastecimientos, ya que la presurización de la red pública no es suficiente para mantener un correcto suministro a las instalaciones más elevadas de un inmueble y además, el coste del equipo, comparado con el del grupo de velocidad variable es significativo (la bomba hidráulica es la misma, pero debe equiparse con el correspondiente variador de velocidad, el cual, para instalaciones comunes de edificios, puede duplicar o triplicar el precio total del grupo).

## II.6 Suministro con depósito en la parte superior del edificio (Tipo V)

El suministro mediante depósito situado en la parte superior del edificio se realiza en abastecimientos o zonas de éste, donde no se puede garantizar el suministro con niveles de presión mínima, de forma que con la presión disponible en red es posible rellenar los depósitos durante el día o en horas de mínima demanda, o bien requieren de un volumen de almacenamiento de emergencia útil en situaciones de corte de suministro. Esto sucede por ejemplo en algunos abastecimientos por gravedad, en zonas próximas a los depósitos, en los que la presión disponible es insuficiente para permitir el correcto funcionamiento de los aparatos durante el día (horas de mayor demanda), y se recurre al suministro a partir del depósito que ha sido previamente llenado en horas de menor demanda.

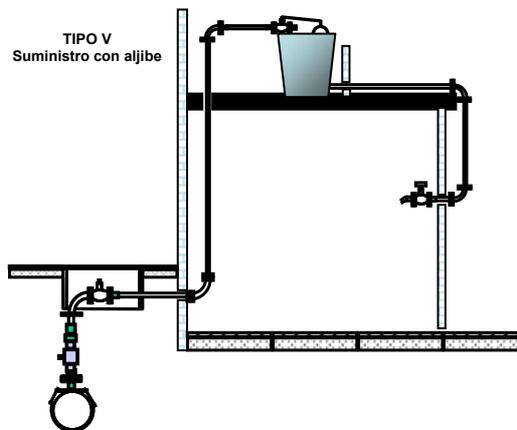


FIGURA 49. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON DEPÓSITO SUPERIOR.

La presión de suministro a los aparatos es función de la altura a la que se encuentra la vivienda, ya que en todo caso la alimentación se realiza por gravedad. Esto origina diferencias de presión sensibles en las diferentes alturas del inmueble, por un lado, los abonados situados en viviendas más alejadas del depósito (viviendas de las primeras plantas) disponen de presión elevada, tanto más cuanto mayor es la diferencia de cotas. Por otro lado, las viviendas situadas más próximas al depósito, viviendas de las plantas superiores, disponen de presiones muy reducidas, con valores inferiores a la diferencia de cotas entre el depósito y los puntos de consumo. Este tipo de instalaciones obliga a disponer de una diferencia de altura entre el aparato más elevado y la solera del depósito, de más de 10 metros, para garantizar la presión residual mínima en todos los puntos de consumo.

Los problemas característicos de esta tipología de suministro son similares a los que experimenta el esquema anterior (suministro indirecto), y están caracterizados principalmente por la incapacidad de asegurar los niveles de calidad mínimos en los puntos de consumo, así como la dificultad de controlar los caudales bajos de llenado. Nótese, que en periodos prolongados sin consumo, desaparece la concentración de desinfectante, y aumenta la probabilidad de contaminación del agua, pudiendo ocasionar problemas derivados de su consumo o, en el mejor de los casos, una pérdida de agua originada por el vaciado total y posterior limpieza del depósito.

Este tipo de instalación tiende a reemplazarse por suministros que incorporan grupos de bombeo, ya que reduce sensiblemente los problemas derivados de este tipo de esquema.



### ANEJO III. PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PAUTAS DE CONSUMO

Para la realización de las simulaciones de cada uno de los escenarios es necesario construir los correspondientes modelos hidráulicos, para posteriormente asignarles las pautas de consumo de los abonados.

En el estudio realizado se utilizan datos de viviendas reales, discretizados cada 10 segundos. Éstos deben ser correctamente almacenados y procesados para poder ser incorporados posteriormente a los modelos de simulación de los escenarios. A continuación se detalla el procedimiento seguido para el tratamiento de los datos de consumo desde su adquisición hasta que finalmente son almacenados.

#### III.1 Adquisición de datos

Los datos han sido recogidos mediante equipos de adquisición de datos portátiles (Data-Loggers) conectados directamente a los contadores domiciliarios en cada una de las viviendas mediante el correspondiente emisor de pulsos.

La siguiente tabla resume la procedencia de los datos, así como el formato de los mismos y el número de días de mediciones que duró la campaña.

TABLA 8. RESUMEN DE LOS DATOS DE CONSUMO DISPONIBLES.

MUNICIPIO		Fecha	Nº días	Nº viv	Formato datos	Días totales	Días reales
Castellón		14/05/98	21	11	P 0.1l	231	231
Benicassim		01/08/98	13	18	P 0.1l	234	219
Betxí 1		04/12/02	15	16	v 10s	240	240
Betxí 2		14/05/03	14	8	v 10s	112	112
Betxí 3		28/05/03	15	3	v 10s	45	44
Betxí 4		12/06/03	14	3	v 10s	42	43
Betxí 5		27/06/03	28	7	v 10s	196	158
Valencia 1			15	15	P 0.1l	225	193
Valencia 2		13/12/98	25	16	v 10s	400	365
Valencia 3		03/07/01	14	15	v 10s	210	203
Javea		05/07/02	32	34	v 30s	1.060	1.030
Vall D'Uixó	Almenara 11	05/07/02	7	8+1	v 10s	68	57
	Creixach 23	15/02/02	14	10+1	v 10s	154	141
	Creixach 25	12/03/03	15	10+1	v 10s	165	132
	Almenara 4	01/12/01	41	8+1	v 10s	369	329
	Mossen1	01/02/02	7	11+1	v 10s	84	84
	No identif	30/03/01	7	7	v 10s	49	0
	Carbonaire	08/06/01	13	6	v 10s	78	76
	Segarra	23/03/02	17	10	v 10s	170	136
<b>TOTALES</b>			<b>327</b>	<b>216</b>		<b>4.132</b>	<b>3.808</b>

La utilización de los datos de consumo exige disponer de una mínima información sobre las mediciones, referente a la localización, tanto espacial como temporal, así como información relativa a las características propias de la instalación.

Respecto a la procedencia de los datos, se puede observar, que las viviendas pertenecen a diversos municipios de la Comunidad Valenciana, destacándose que todos ellos se encuentran en las proximidades de la zona costa de Levante, cuyo patrón de consumo no tiene por qué asimilarse al patrón propio de otras viviendas pertenecientes a otras zonas geográficas. De cada vivienda, además de los datos de consumo, se ha utilizado la información relativa a la tipología del edificio y de la propia instalación interior. Esta información va a permitir poder caracterizar diferentes tipos de consumidores domésticos (chalets, viviendas tipo piso, apartamentos, etcétera), así como diferentes tipos de suministros (suministro en directo, suministro con aljibes, suministros con grupo de bombeo, etcétera).

Como se ha comentado, los datos disponibles de consumo proceden de campañas de mediciones que se desarrollaron en diferentes períodos, comprendidos éstos entre el año 1.998 y 2.003. Los meses de las mediciones también son variables, de forma que es posible caracterizar los consumos domésticos en función de la estación del año, ya que las pautas de consumo en cada una de ellas puede diferir sensiblemente.

Los registros de consumo de cada una de las viviendas se han obtenido con alta resolución, ya que el intervalo temporal entre registros es muy reducido, lo que permite disponer de datos muy discretizados, a diferencia de lo que normalmente se viene haciendo en estudios similares (generalmente el intervalo para la caracterización temporal de la demanda suele ser una hora, a partir de las curvas de modulación horarias).

Concretamente, los datos disponibles están en tres formatos diferentes:

- *Datos de pulso cada 0.1 litros (P\_0.1l)*. Cada décima de litro que circula por el contador origina un pulso que es almacenado en el data-logger junto con la fecha de ocurrencia del mismo.
- *Datos de volumen cada 10 segundos (v\_10s)*. En el data-logger se almacena el volumen que circula por el contador en cada periodo de 10 segundos.
- *Datos de volumen cada 30 segundos (v\_30s)*. En el data-logger se almacena el volumen que circula por el contador en cada periodo de 30 segundos.

Finalmente, los datos de consumo disponibles dependen del emplazamiento. En la tabla anterior se ha diferenciado entre días totales de mediciones (producto del número de viviendas del edificio y los días que se han mantenido los equipos de registro) y los días reales, en los que se ha eliminado los días incompletos o con errores de medida.

Para ello, ha sido necesario fijar el formato con el que se almacena cada uno de los registros, así como los campos que interesa crear para disponer de toda la información necesaria en el caso de realizar consultas en la base de datos y, además, para que éstos mantengan la trazabilidad necesaria, de forma que sea posible identificar la vivienda y fecha correspondiente en caso de que los resultados obtenidos se encuentren fuera de los intervalos de trabajo una vez depurados los mismos.

Dado que la finalidad de la base de datos es almacenar la información de los consumos de cada una de las viviendas, para proceder posteriormente a la lectura de dicha información, bien bajo consultas estructuradas de la base de datos, o a partir de un módulo de programación, es necesario que las tablas generadas aporten agilidad a la hora de acceder a la lectura, y para ellos, es necesario reducir en la medida de lo posible, las dimensiones de dicha tabla.

Por otro lado, una reducción excesiva de los campos y del número de registros, se traducirá en una eliminación de información que puede llegar a ser útil en alguna de las simulaciones, por tanto, es necesario establecer una estructura acorde al trabajo a desarrollar, manteniendo un equilibrio entre las dos propuestas anteriores.

Dado que los datos de consumo disponibles están en formatos diferentes, ha sido necesario transformarlos a un único formato, analizando las características de cada uno de ellos y eligiendo aquél que aporte mayores ventajas al estudio.

A continuación se comentarán las principales características de cada uno de los formatos disponibles en los ficheros de consumo originales:

### **III.2 Formatos de datos disponibles**

De los datos de consumo resumidos en la Tabla 8, es necesario analizar las propiedades de cada uno de ellos para decidir cuál de ellos aporta mayores ventajas al modelo y, posteriormente transformar los otros dos formatos en aquél que ha sido seleccionado.

A continuación se detallan las propiedades de cada uno de los formatos disponibles:

#### **III.2.1 Formato de pulso cada 0.1 litros**

Se trata del formato original de los datos recogidos mediante equipo de adquisición implementado mediante Labview y almacenados en un PC portátil.

Son datos temporales consecutivos que se producen cuando el equipo detecta que el contador ha trasegado un volumen determinado. Generalmente el registro se hace en segundos, y el incremento de volúmenes entre dos registros suele ser el fondo de escala del contador, 0,1 litros para contadores domésticos generalmente.

La siguiente tabla muestra un extracto de los datos originales para una vivienda y un día concreto de mediciones:

TABLA 9. FORMATO DE DATOS DE OCURRENCIA DE PULSOS CADA 0.1 LITROS.

$\Delta T$ (formato segundos)	$\Delta T$ (formato horario)
39712.148	11:01:52,15
39713.751	11:01:53,75
39738.961	11:02:18,96
39739.449	11:02:19,45
39742.309	11:02:22,31
39742.859	11:02:22,86

El primer registro de la tabla se corresponde con el segundo del día 39712.148 (11:01:52.15 horas), y en este instante el emisor de pulsos envía la señal correspondiente al sistema de adquisición de datos, ya que ha detectado que por el contador ha circulado un volumen de 0,1 litros. El siguiente registro se corresponde con el siguiente instante en el que el equipo detecta que de nuevo ha circulado el volumen anterior, y así consecutivamente hasta que finaliza el día.

Las principales ventajas de este formato son:

- Gran resolución (limitada únicamente por el fondo de escala de equipo de medición domiciliario).
- Elevada precisión en la medida.

Por el contrario, de entre los inconvenientes se destacan:

- Precisa gran cantidad de memoria para el almacenamiento, el dato se almacena como número decimal largo (long).
- Este formato tiene muy poca representación en la totalidad de datos originales de consumo, y el procesamiento para su obtención a partir de otros formatos no es posible.

Este formato por tanto, no es óptimo para la representación de los valores de consumo en la base de datos principal.

### III.2.2 Formato de volumen cada 10 segundos

Este formato es propio de los equipos de adquisición de datos portátiles comerciales (data-loggers), ya que permiten la programación de las lecturas para diferentes intervalos de tiempo. Pero también es posible obtener dicho formato a partir de la programación con Labview como en el caso anterior.

En este caso el equipo almacena el volumen trasegado por el contador cada 10 segundos, obtenido éste a partir de la superposición de pulsos de 0,1 litros que se originan dentro de un mismo periodo de 10 segundos.

Como se observa en la Tabla 8, este formato es mayoritario entre los formatos disponibles, y un extracto del formato tiene el siguiente estilo:

TABLA 10. FORMATO DE DATOS PULSO CADA 10 SEGUNDOS.

$\Delta V$ (formato pulso cada 10 segundos)
0.2
0.0
0.1
0.0
0.1
0.0

El primer registro de la tabla corresponde al volumen consumido para uno de los periodos del día, calculado éste a partir del cómputo del número de celdas por encima del registro (cada celda se corresponde con la medida cada 10 segundos). En este caso, para el intervalo considerado, se consumió 0.2 litros en los 10 segundos correspondientes, mientras que el instante siguiente el consumo es nulo, y así consecutivamente.

Cada una de las filas del fichero original se corresponde con cada uno de los intervalos de 10 segundos en los que se divide el día, de forma que la suma de toda una columna será el volumen total consumido por la vivienda en ese día.

El formato se caracteriza principalmente por la gran cantidad de valores nulos que aparece en la tabla, en tal caso, para el correspondiente intervalo de 10 segundos, no se produce ningún consumo por parte del abonado. Este análisis muestra claramente la posibilidad de que en una vivienda hayan fugas en periodos nocturnos y pueden darse si para esas horas los valores registrados son no nulos y presentan un comportamiento regular y constante.

Las principales ventajas del formato son:

- Mantiene elevada resolución (ocurrencia de pulsos cada 10 segundos).
- Precisa de menor memoria para almacenar los registros, tanto por el tipo de número como por la cantidad de registros (nótese que es posible almacenar varios datos del formato anterior en una única celda).
- Este formato representa a la mayoría de los datos originales de consumo, por lo que resultará interesante su utilización.

Por el contrario, de entre los inconvenientes se destacan:

- Dispone menor resolución que el formato anterior.
- Puede ser definido en la base de datos como decimal simple (single), y éste ocupa más memoria que un entero. Aunque es posible almacenarlo en mililitros en lugar de litros, de forma que el valor almacenado pueda ser definido como entero.
- La transformación de otros formatos a éste puede conllevar una pérdida de información (concretamente si el intervalo de tiempo es mayor, se deberá promediar el volumen total en el intervalo y repartirlo en los 10 segundos de este formato).

### **III.2.3 Formato de volumen cada 30 segundos**

Este formato de registro es similar al anterior, pero en este caso el intervalo de tiempo entre dos registros consecutivos es de 30 segundos.

La principal desventaja frente a los formatos anteriores es que al trabajar con intervalos de 30 segundos, se lamina demasiado los comportamientos de los abonados, entendiéndose tal laminación como una reducción de las exigencias en la demanda de la vivienda (nótese que se reparte el consumo total en los 30 segundos que dura el intervalo, mientras que en el caso anterior, el intervalo es menor y, por tanto, la laminación correspondiente también es menor).

### **III.3 Selección del formato definitivo**

Analizados los formatos disponibles y, acudiendo a la premisa anteriormente indicada, en la que se aludía a la necesidad de establecer un equilibrio entre la resolución de los datos (fijada a partir del incremento de tiempo entre registros) y la agilidad para el acceso a la base de datos para la realización de consultas, se decide trabajar con el formato de datos en el que se almacena el volumen en intervalos de 10 segundos.

Dicha decisión precisa la transformación de los otros dos formatos al formato seleccionado. En el caso del formato de ocurrencia de pulsos de 0.1 litros, la

transformación es inmediata, agrupando los pulsos originados en intervalos de 10 segundos. Por otro lado, para el formato de agrupación de pulsos cada 30 segundos, es necesario repartir el volumen total almacenado en los tres intervalos resultantes.

### **III.4 Depuración de datos**

En la tabla principal de consumos se han almacenado los datos de consumos procedentes de las mediciones y cuyo formato se ha estandarizado a registros cada 10 segundos. Pero no todos los datos almacenados se corresponden con instalaciones de la misma tipología de suministro, ni proceden de viviendas tipo doméstico. Y, puesto que se trata de homogeneizar las viviendas de la base de datos de forma que representen con la mayor fidelidad posible, el comportamiento de viviendas en zonas residenciales urbanas, es necesario realizar una depuración de la tabla de consumos.

Entre los datos a eliminar se incluyen los correspondientes a viviendas residenciales, tales como bungalows, chalets, apartamentos... siendo el consumo medio de estos contadores, así como la modulación en los mismos, diferentes a los que nos podemos encontrar en una vivienda situada en un núcleo urbano; por ejemplo, a los datos procedentes de chalets, muchas veces se les asocia un consumo propio de piscinas o de riego de jardines, condiciones que no se encuentran normalmente en las viviendas de un núcleo urbano de una población. La base de datos también recoge datos de viviendas con aljibe, dichos datos tampoco pueden ser considerados como datos correspondientes a viviendas alimentadas en directo, ya que dicho comportamiento ha sido alterado tras la laminación originada por el aljibe.

Del mismo modo, la base de datos también recoge datos de contadores generales, instalados a la entrada de edificios y cuyo volumen corresponde aproximadamente a la totalidad de volumen consumido por los abonados, en este caso, estos datos no deberán ser considerados como datos característicos de una vivienda, y es necesario eliminarlos, ya que su contemplación mayoraría notablemente los consumos medios reales.

Finalmente, hay que tener en cuenta los datos tomados en las viviendas, tanto el primer como el último día de las mediciones, ya que en muchos casos estos datos no están completos para todos los instantes del día, en este caso, su consideración minimizaría el consumo medio al calcular la media horaria de los registros, además de inducir consumos nulos no reales durante los periodos en los que el equipo no estuvo midiendo.

El procedimiento seguido para la depuración de datos es el siguiente:

1. Obtención de una tabla con los registros correspondientes a la totalidad de viviendas pero sólo de aquellos días en los que las mediciones se han tomado durante todo el día.
2. Eliminación de todos aquellos registros que no se corresponden con la tipología de viviendas urbanas (pisos unifamiliares), tales como chalets, bungalows, etcétera.
3. Obtención de los datos de sólo aquellas pólizas en las que el suministro se realiza de forma directa desde la entrada de la acometida al edificio, por tanto, se han eliminado aquellas pólizas en las que el suministro se ve alterado por aljibes o depósitos domiciliarios.
4. Identificación de las viviendas cuyos datos de consumo son excesivamente elevados o, por el contrario, demasiado bajo. Los primeros podrían corresponder a viviendas cuya tipología no es exactamente de viviendas unifamiliares, pudiéndose originar dichos consumos elevados debido a riego, y que en su momento no fue clasificada. En el otro extremo se encontrarían todas aquellas viviendas con consumo muy reducido o nulo, posiblemente debido a la ausencia de usuarios durante el periodo de mediciones.

Para identificar los datos anteriores es necesario calcular el consumo total por día de cada una de las viviendas, para posteriormente establecer un rango de consumos considerado como aceptable. Para ello, se calcula el consumo promedio, el máximo y el mínimo de las viviendas de la base de datos una vez realizada la depuración comentada anteriormente.

La siguiente tabla muestra los valores de consumos promedios:

TABLA 11. VALORES PROMEDIO DEL CONSUMO DIARIO.

<b>Volúmenes consumidos (litros/día)</b>			
<b>Máximo consumo</b>	<b>Consumo promedio</b>	<b>Mínimo consumo</b>	<b>Desviación típica</b>
3.820	394.9	0.1	324.7

Como se observa en la tabla anterior, hay viviendas que tienen al menos un día con un consumo total superior a 3.800 litros, que correspondería a una casa con 19 habitantes para una dotación de 200 litros habitante y día, se trata de un consumo muy elevado para una vivienda tipo piso. La razón de que se aparezca esta vivienda con ese consumo en la base de datos es porque algunos de los datos referentes a la información propia de las características de los inmuebles no aparecen en los ficheros de datos, por lo que resulta necesario localizarlos con tal de eliminarlos de la tabla principal de consumos.

Por otro lado, hay una vivienda que ha consumido 0,1 litros en un día, valor muy bajo, por lo que se procede a identificar la misma para comprobar el historial de

consumo de ésta (caracterizado por la demanda media diaria y su desviación típica) de forma que si el consumo se mantiene bajo el resto de días se procederá a su eliminación de la tabla de consumos para que su influencia en el consumo medio del resto de viviendas no reduzca dicho valor.

Se realiza una consulta para determinar el volumen promedio, máximo y mínimo consumido al día para cada una de las viviendas, junto con la desviación típica del valor medio con tal de identificar el comportamiento de cada una de las viviendas.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos al realizar una consulta sobre la totalidad de las viviendas:

<b>Volumen Viviendas</b>				
<b>póliza</b>	<b>V max</b>	<b>V med</b>	<b>V min</b>	<b>Desv</b>
1	1455.8	570.2	49.5	437.2
2	981.4	526.9	243.6	224.7
3	619.7	304.3	158.5	131.3
4	1112.8	323.4	0.1	301.7
5	618.8	452.0	273.9	98.4
6	1397.5	862.6	216.6	390.3
7	649	316.3	25.4	193.4
8	100.5	25.6	6.2	33.8
9	52.9	5.8	0.3	14.1
10	758.7	297.4	72.3	245.4
11	958.3	483.5	312.1	189.0
12	43.8	30.1	14.1	9.3
13	547.5	396.6	164.8	149.7
14	1012.6	332.0	5.9	274.9
15	1322.8	442.6	182.3	378.2
16	795.8	358.1	97.8	203.6
17	686.1	473.4	8.5	224.5
18	472.8	191.0	0.1	197.6
19	1013.2	769.0	516.8	129.4
20	560	345.9	105.6	134.2
21	282.5	178.0	85.7	67.8
22	534	348.6	105.1	150.4
23	1121.4	751.5	0.1	285.2
24	281.1	230.2	148.9	44.3
25	518.9	406.1	237.4	79.0
26	1017.6	401.9	13.3	528.9
27	716.5	417.2	156.5	160.5
28	559.2	289.8	1.1	202.6
29	572	370.5	161.9	134.3
30	491.1	370.1	208.5	112.8
31	1052.9	685.5	8.9	267.0
32	765.4	400.3	156.2	196.2
33	641.2	451.9	93.2	164.1
34	686.6	375.7	38.5	169.5
35	654.3	332.4	2.3	275.4
36	853.4	321.1	54.7	229.4
37	616.1	207.1	7.6	217.8
38	1039.4	507.2	124.2	244.0
39	487.7	234.2	3.4	135.1
40	755	354.9	40.7	167.5
41	725.7	509.9	122.3	172.2
42	523.7	404.6	191.5	106.3
43	1110	492.1	166.3	229.6
44	639.2	435.4	198.6	131.3
45	1133.2	500.7	142.9	263.8
46	424.9	287.2	178.1	79.4
47	218.1	75.9	0.5	70.8
48	553.6	299.4	163	118.5
49	1312.8	328.0	139	309.2
50	523.4	275.1	126	140.8
51	545.8	303.5	156.6	103.8
52	447.4	207.3	0.1	164.7
53	350.1	168.2	14.3	110.1
54	441.3	310.4	201.4	68.1
55	1427.8	725.4	129.5	383.1
56	472.3	329.4	226.8	71.7
57	6.2	5.0	3.7	0.6

58	384.9	280.4	232.7	54.4
59	618.6	439.7	300.8	102.1
60	106.8	49.7	27.2	26.7
61	937.6	512.3	233.1	175.0
62	592	445.7	234.3	94.0
63	500.1	225.5	12.9	138.9
65	643.7	375.2	182.9	128.9
66	159.8	63.4	27.2	34.6
67	352	241.1	115	69.2
77	759.7	453.4	161	194.6
78	994.7	506.7	225.5	198.3
79	1822.4	1128.7	807.9	245.8
80	434.6	206	29.4	103.3
115	1302.9	626.3	77.7	307.2
116	622.6	298.6	8.5	178.1
117	832.9	454.0	128.3	217.7
118	1150.7	344.2	100.7	271.1
119	722.7	379.9	202.6	136.5
120	802.6	400.4	63.7	173.3
121	2074	995.5	468.6	390.2
122	1195.3	636.2	336.1	188.5
123	73.2	15.2	2.5	20.6
124	13.3	6.7	3.2	2.4
125	3820	1632.9	0.1	857.3
126	1547.5	785.8	165.9	367.1
127	91.5	44.3	22.7	14.8
128	1364	446.5	8.7	505.2
129	968.5	396.0	5.7	383.6
172	438	260.6	113.8	86.0
173	6.4	1.9	0.1	2.0
174	402.2	175.9	75.5	78.8
175	864	551.4	319.9	134.5
176	1131.9	234.5	14.8	196.8
177	99.1	47.5	7.6	27.1
178	1079.2	393.1	41	215.8
179	901.6	544.6	283	168.4
191	594.9	392.3	76.6	174.6
194	340.5	245.9	140	70.4
195	370.8	145.0	0.5	137.5
196	592.7	490.5	353.5	66.6
197	1146.2	695.5	443.4	214.5
198	1312.3	700.6	493.4	205.4
199	371.4	194.8	0.7	132.7
200	776.9	619.3	359.1	126.4
201	609.9	217.4	55.9	155.5
202	519.2	349.7	157.4	94.1
203	428.9	233.9	3	130.8
204	927	615.0	466	149.7
205	768.7	543.3	399.5	125.2
206	709.4	403.5	0.1	293.6
207	467.7	264.2	59.5	107.7
208	441.5	187.2	13	117.8
209	942.9	519.6	245.8	169.3
210	185.3	87.5	59.1	45.8
211	1271.1	846.6	197.2	277.2
213	926.6	609.9	429.1	176.3
214	1099.9	845.0	500.2	240.4
215	843.6	437.7	194.7	259.6

Se establece el siguiente rango de consumos medio para las viviendas que formarán la tabla final de consumos:

- Consumo medio > 100 litros/día.
- Consumo medio < 1.500 litros/día

Finalmente se decide eliminar las siguientes viviendas por no encontrarse dentro del rango de consumos establecido:

TABLA 12. VIVIENDAS ELIMINADAS DE LA TABLA DE CONSUMOS.

<b>Volúmenes Viviendas</b>				
<b>Póliza</b>	<b>V max</b>	<b>V med</b>	<b>V min</b>	<b>Desv</b>
<b>Consumo medio inferior a 100 litros/día</b>				
8	100.5	25.6	6.2	33.8
9	52.9	5.8	0.3	14.1
47	218.1	75.9	0.5	70.8
57	6.2	5.0	3.7	0.6
60	106.8	49.7	27.2	26.7
66	159.8	63.4	27.2	34.6
123	73.2	15.2	2.5	20.6
124	13.3	6.7	3.2	2.4
127	91.5	44.3	22.7	14.8
173	6.4	1.9	0.1	2.0
177	99.1	47.5	7.6	27.1
<b>Consumo medio superior a 1500 litros/día</b>				
79	1822.4	1128.7	807.9	245.8
125	3820	1632.9	0.1	857.3
126	1547.5	785.8	165.9	367.1

### III.5 Estructura de las base de datos de consumo

Todos los datos de consumo han sido almacenados en una base de datos de consumos creada a tal efecto, de forma que se agilicen las consultas y los accesos para la adquisición de los valores de consumo de cada vivienda, para incorporarlos posteriormente al modelo de simulación.

Con la finalidad de optimizar las consultas en las base de datos, se han creado varias tablas vinculadas entre sí, de forma que cada una de ellas contenga una información determinada y sea posible, entre otras cosas, mantener la trazabilidad en todo el proceso de análisis.

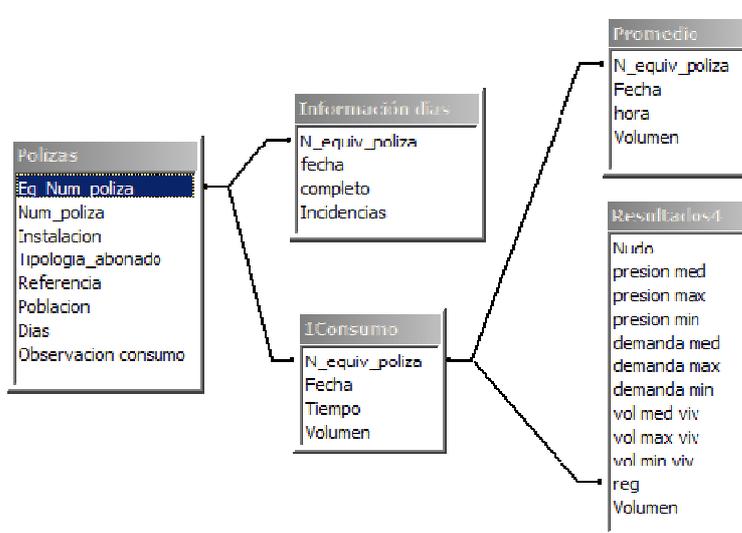


FIGURA 50. RELACIÓN ENTRE LAS TABLAS DE LA BASE DE DATOS.

La tabla principal de la base de datos es la tabla de consumos. Ésta reúne toda la información relativa a los datos de consumo de cada una de las viviendas. Para su obtención, se han realizado todos los procedimientos comentados anteriormente.

#### III.5.1 Estructura de la tabla de consumos

En Access se debe incorporar una tabla principal que contenga la información correspondiente a los consumos de cada una de las viviendas, con la información temporal del consumo con un formato adecuado.

Entre la información con la que cuenta la tabla, se deben incluir los siguientes campos:

- *Nº equivalente de póliza*. Muestra información de la vivienda a la que pertenecen los registros.

- *Fecha (día de medición)*. Puesto que se dispone de varios días de mediciones para cada una de las viviendas, es necesario incorporar información de la fecha correspondiente al registro.
- *Tiempo*. Se corresponde con el periodo del día en el que se ha originado el consumo. Dentro del día de medición, el tiempo de la lectura identifica la hora, minuto e intervalo de 10 segundos concreto del día.
- *Volumen*. Se almacena el volumen consumido por cada una de las viviendas para cada uno de los días de mediciones y para cada periodo de tiempo de 10 segundos. Éste será el campo que se adaptará convenientemente a la información hidráulica del escenario, para representar la demanda de una posible vivienda.

Dado que en muchos instantes del día, el consumo en una vivienda puede anularse, sólo se almacenan los instantes de tiempo en los que el volumen registrado no es nulo, de forma que se reduce notablemente el tamaño de la tabla principal de consumos y, por tanto, se agiliza el acceso a la misma.

### **III.5.2 Estructura de las tablas secundarias**

Además de la tabla anterior, es necesario crear tablas con información complementaria a la de consumo. Esta información va a permitir realizar consultas cruzadas que serán útiles a la hora de incluir o excluir datos de consumo de las consultas realizadas.

#### *Tabla de información sobre la instalación (Pólizas)*

En esta tabla se incluye todo lo relativo a la instalación, siendo los campos considerados los siguientes:

- *Nº equivalente de Póliza*. Es el identificativos de cada instalación. Se trata del campo común que mantiene con la tabla de consumos.
- *Nº de Póliza*. Es el identificativos real de cada instalación. Este campo mantiene la trazabilidad con los ficheros originales de datos de consumo, de forma que en cualquier momento se puede acudir a tal fichero y comprobar si los resultados de las consultas son correctos o existe algún error de programación.
- *Tipo de instalación*. Se distingue entre aquellas instalaciones en las que el suministro se realiza en directo, a través de grupo de bombeo, con aljibe, etcétera. Este campo permite realizar consultas específicas para analizar el comportamiento promedio en cada uno de los tipos de instalaciones.
- *Tipología del abonado*. Identifica las diferentes tipologías de viviendas: vivienda tipo piso, chalet, bungalow, etcétera. Permitirá excluir de las consultas generales aquellas instalaciones que pueden estar provistas de consumos notables, como piscinas o jardines.

- *Referencia.* Mantiene el número de serie del contador de la vivienda.
- *Población.* Aporta información sobre el municipio en el que se encuentra la vivienda.
- *Días de mediciones.* Número de días en los que se ha mantenido instalados los equipos de registro.
- *Observación consumos.* Se especifica si se han detectado irregularidades en los datos de consumo.

#### *Tabla de información sobre los días de mediciones (Información días)*

En esta tabla se incluye todo lo relativo a las fechas de mediciones, incorporándose la información referente a los días en los que se ha mantenido el registro de los equipos. Los campos considerados son:

- *Nº equivalente de Póliza.* Es el identificativos de cada instalación. Se trata del campo común que mantiene con las tablas anteriores.
- *Fecha.* Se especifica cada uno de los días en los que se dispone de registros de consumo.
- *Días completos.* Identifica los días en los que se dispone de la totalidad de datos de consumo en cada uno de los intervalos de tiempo y aquéllos que son incompletos (como en el caso del día de instalación de los equipos y el día de retirada de los mismos).
- *Días con incidencias.* Se especifica aquellos días de mediciones en los que se ha detectado alguna anomalía en los registros o algún comportamiento extraño, intencionado u originado por un defecto en el sistema de registro.

#### *Tabla de valores promedio*

Especifica, para cada uno de los días de mediciones, los volúmenes horarios consumido en cada una de las viviendas. A partir de esta tabla se obtiene la curva de modulación promedio de las viviendas de la base de datos.

### *Tabla de resultados*

En esta tabla se almacenan los resultados de la simulación obtenidos mediante la simulación de los modelos con Epanet.

Por un lado, se almacenan los valores de presión (máxima, media y mínima) que se alcanza en cada nudo para cada conjunto de simulaciones. Y por otro, la demanda total de cada uno de los nudos, resultado de la suma, para la hora de simulación, del volumen de agua demandado por cada edificio hipotético.

Los campos de volúmenes (*vol*) representan el volumen máximo, medio y mínimo consumido en las viviendas conectadas a cada uno de los nudos. Se trata de mostrar, para cada una de las simulaciones, si ha habido una vivienda que ha consumido excesivamente, o ha coincidido que el nudo está formado por varias viviendas con altos consumos. Relacionado con lo anterior, el campo *reg* almacena los números de póliza de las viviendas conectadas a cada nudo del tramo.



#### ANEJO IV. PENDIENTES MÁXIMAS EN RÉGIMEN PERMANENTE (TIPO I Y TIPO III)

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 79 mm:

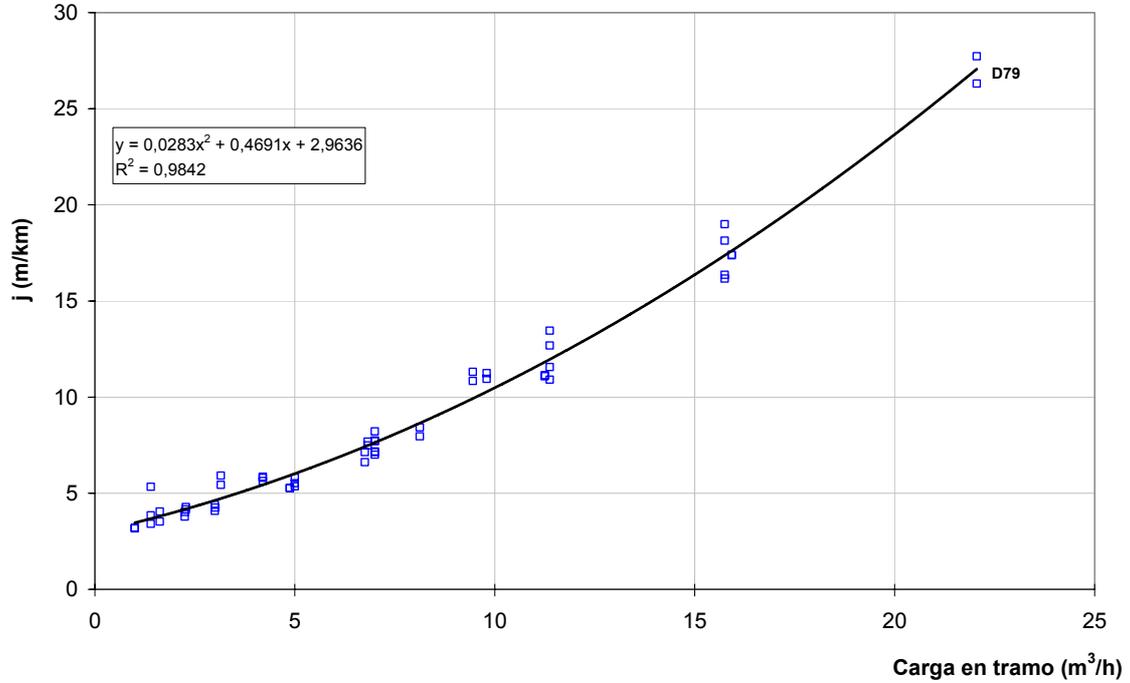


FIGURA 51. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 79 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 96 mm:

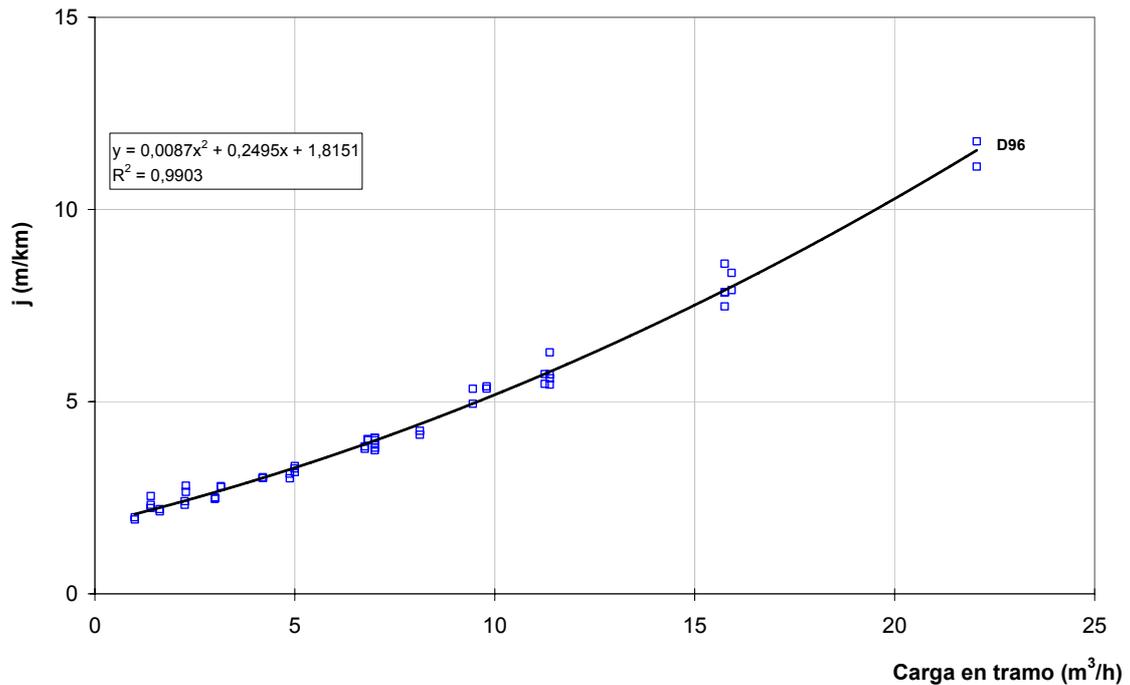


FIGURA 52. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 96 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 110 mm:

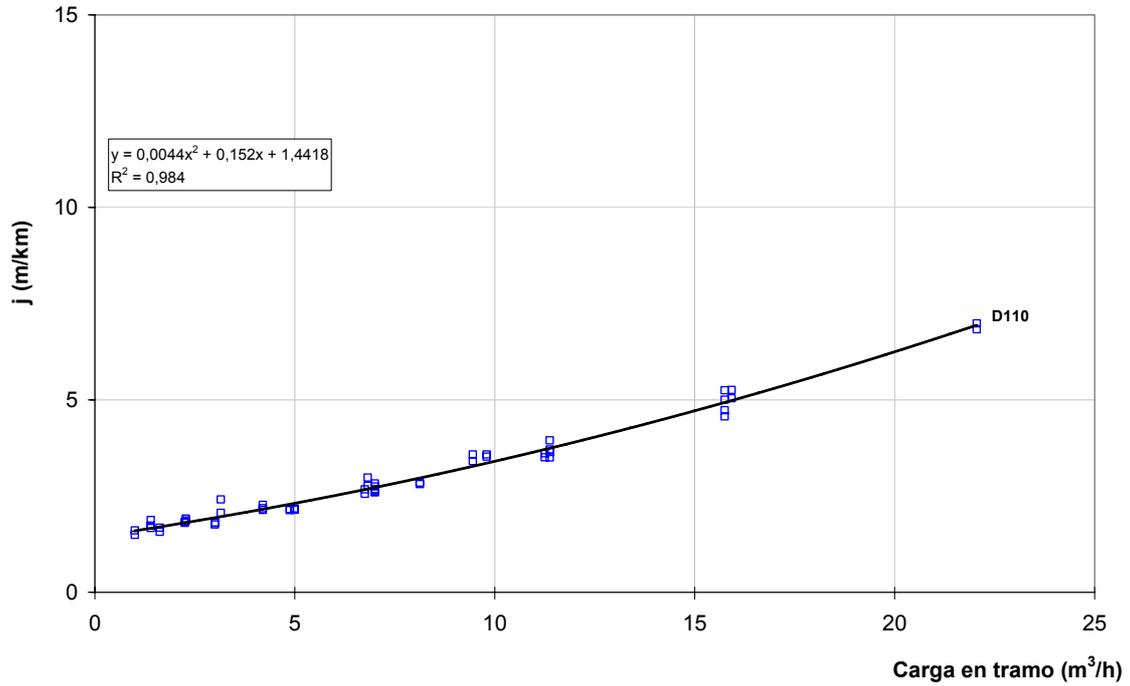


FIGURA 53. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 110 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 123 mm:

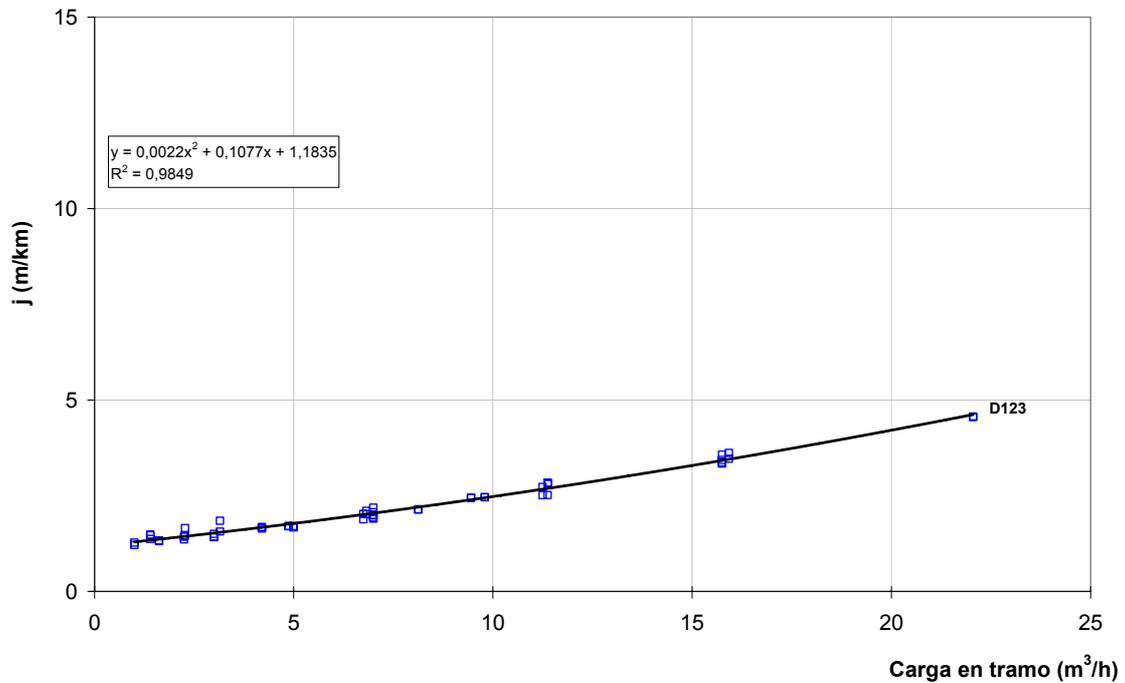


FIGURA 54. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 123 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 141 mm:

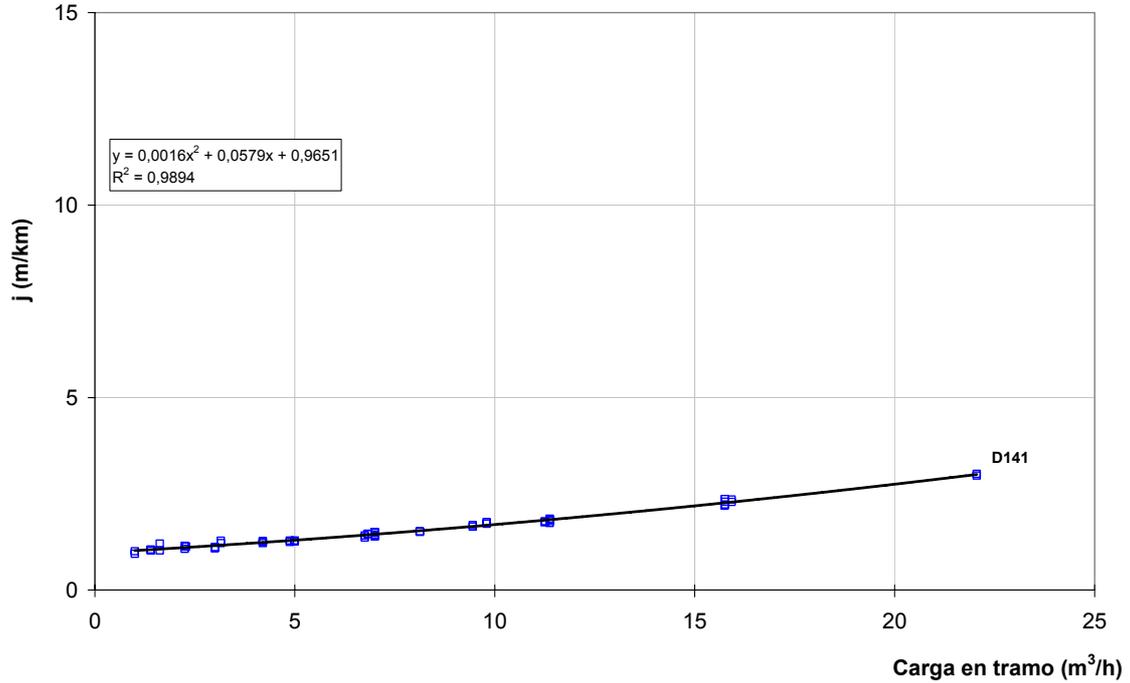


FIGURA 55. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 141 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diámetro interior de conducción de 158 mm:

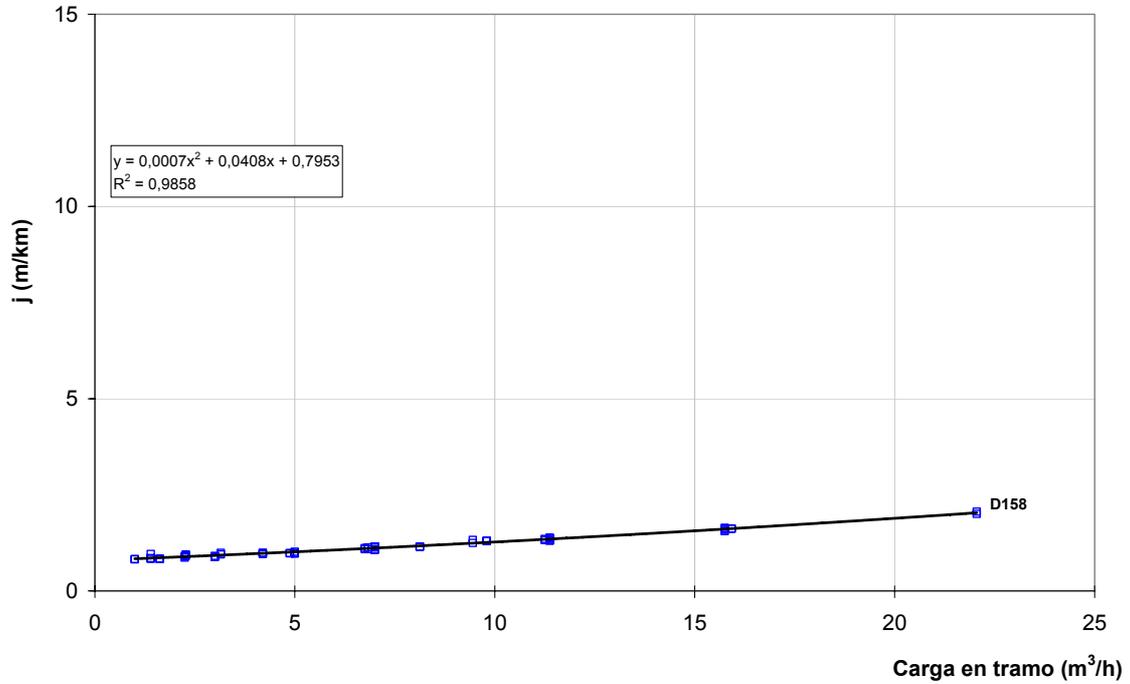


FIGURA 56. AJUSTE DE DEL VALOR DE PÉRDIDA UNITARIA MÁXIMA PARA DIÁMETRO INTERIOR 158 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para diferentes diámetros interiores, resultado de las simulaciones cuando el suministro se realiza en directo, con bombas de velocidad variable, o una combinación de ambas situaciones:

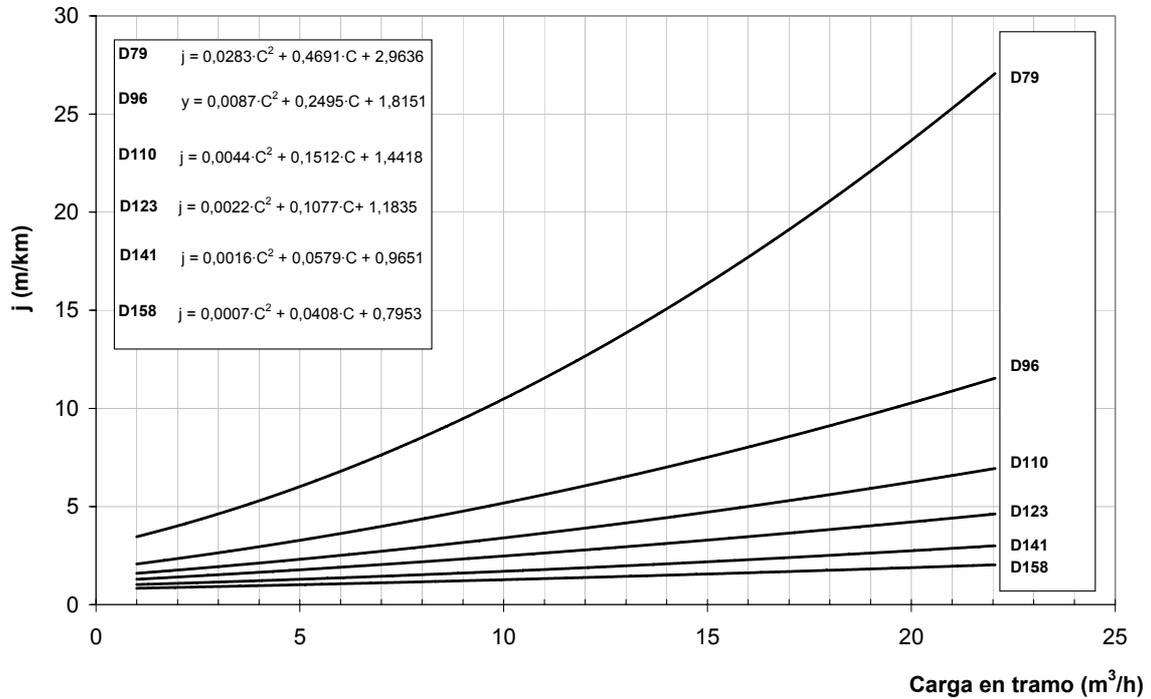


FIGURA 57. CURVAS DE PÉRDIDAS UNITARIAS MÁXIMAS PARA DIFERENTES DIÁMETROS INTERIORES.

Particularización de las gráficas anteriores para conducciones de Polietileno PE100 de diferentes diámetros comerciales:

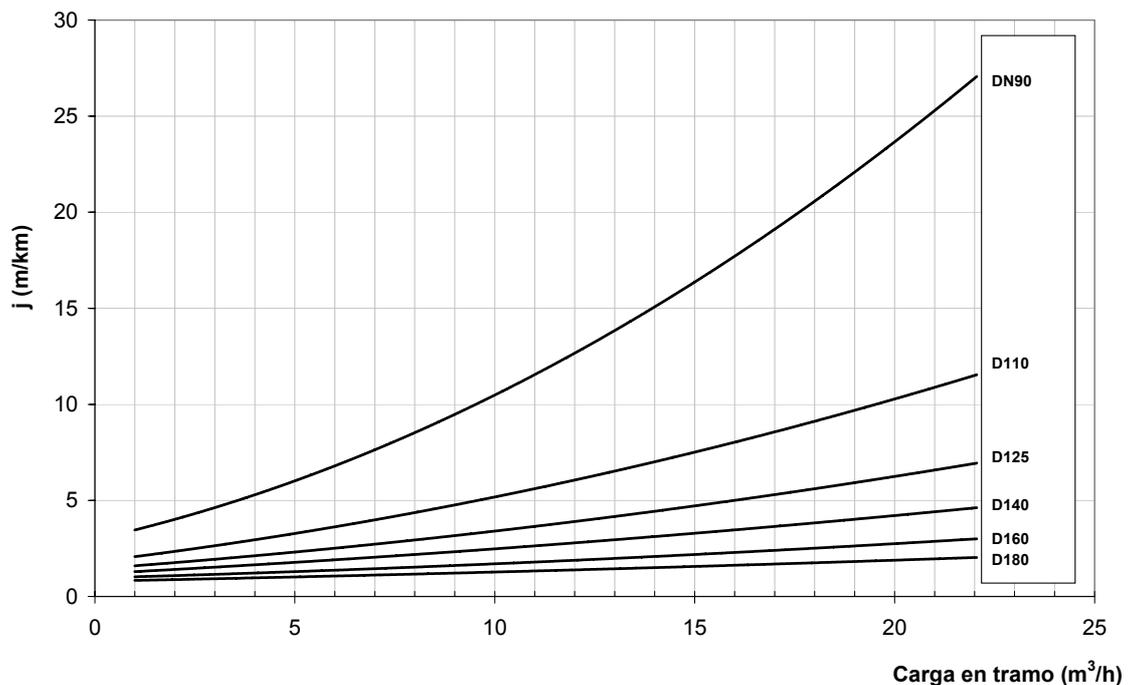


FIGURA 58. CURVAS DE PÉRDIDAS UNITARIAS MÁXIMAS PARA PE100.

## ANEJO V. COMPARACIÓN RESPUESTAS SEGÚN ESQUEMA DE SUMINISTRO

A continuación se muestran cada una de las gráficas con los resultados de las simulaciones para los tres casos comentados anteriormente; suministro en directo (Tipo I) o con grupo de velocidad variable (Tipo III), suministro con bombas de velocidad fija (Tipo II), suministro con bomba de velocidad fija al 33% de las viviendas totales y en directo al resto (Tipo mixto).

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 79 mm:

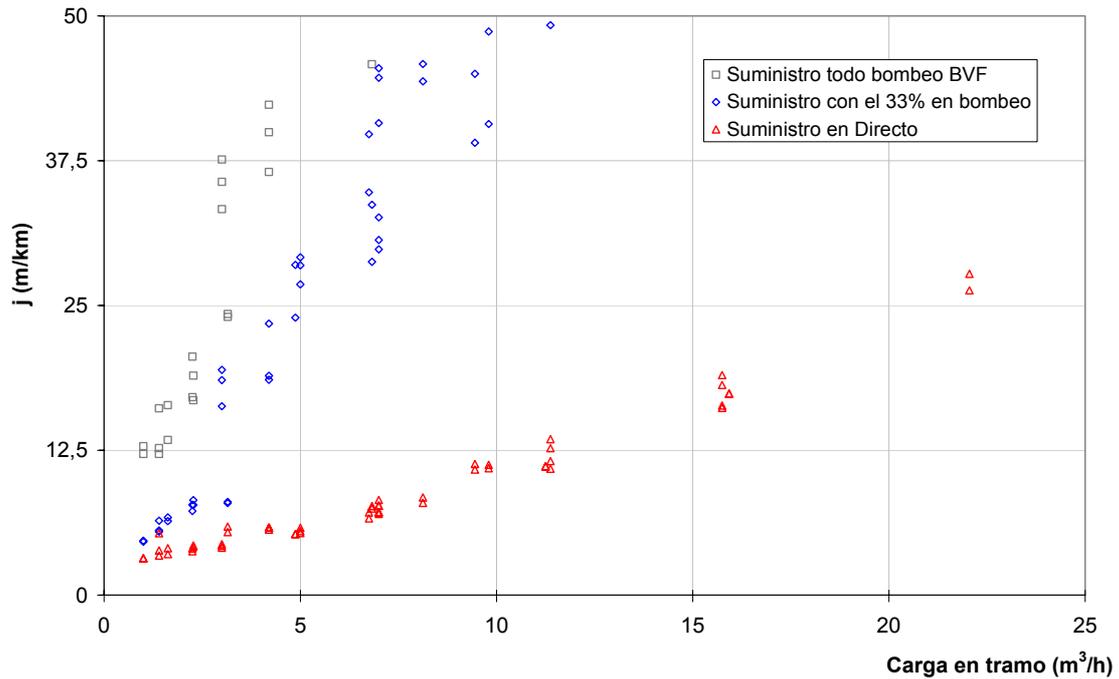


FIGURA 59. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 79 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 96 mm:

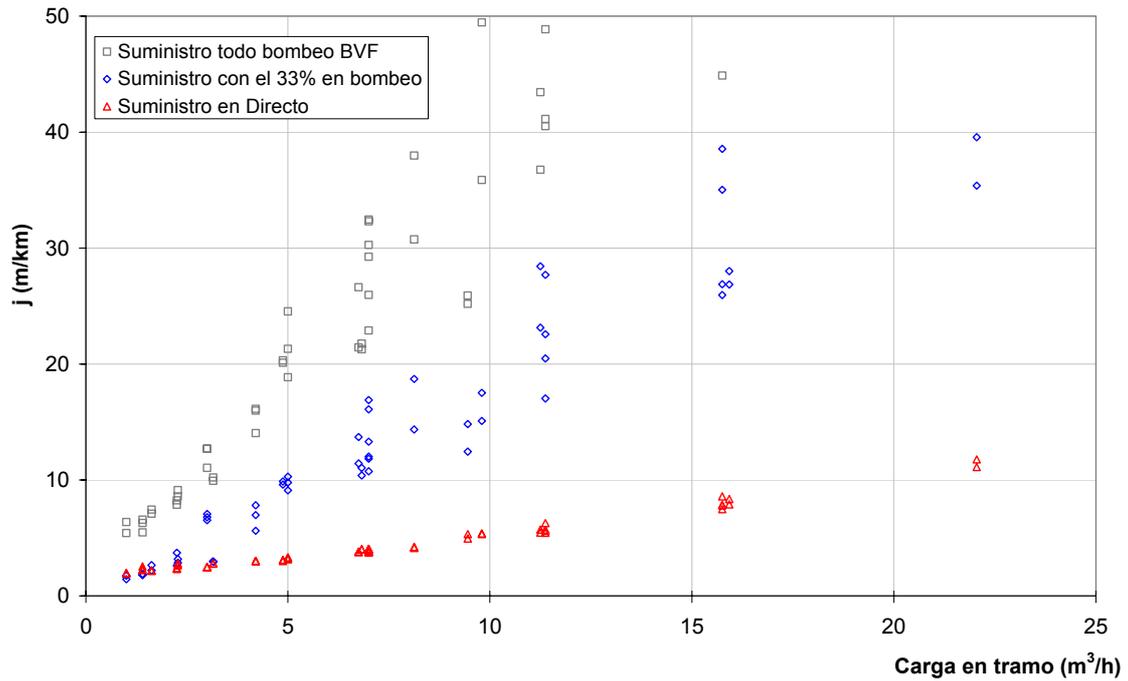


FIGURA 60. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 96 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 110 mm:

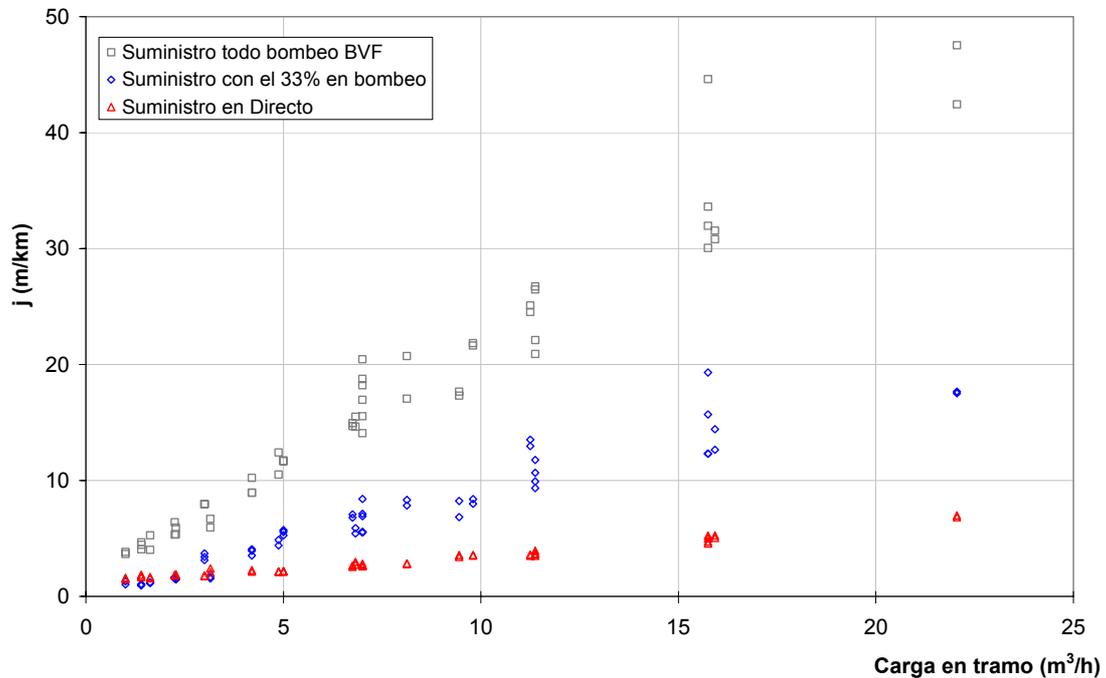


FIGURA 61. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 110 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 123 mm:

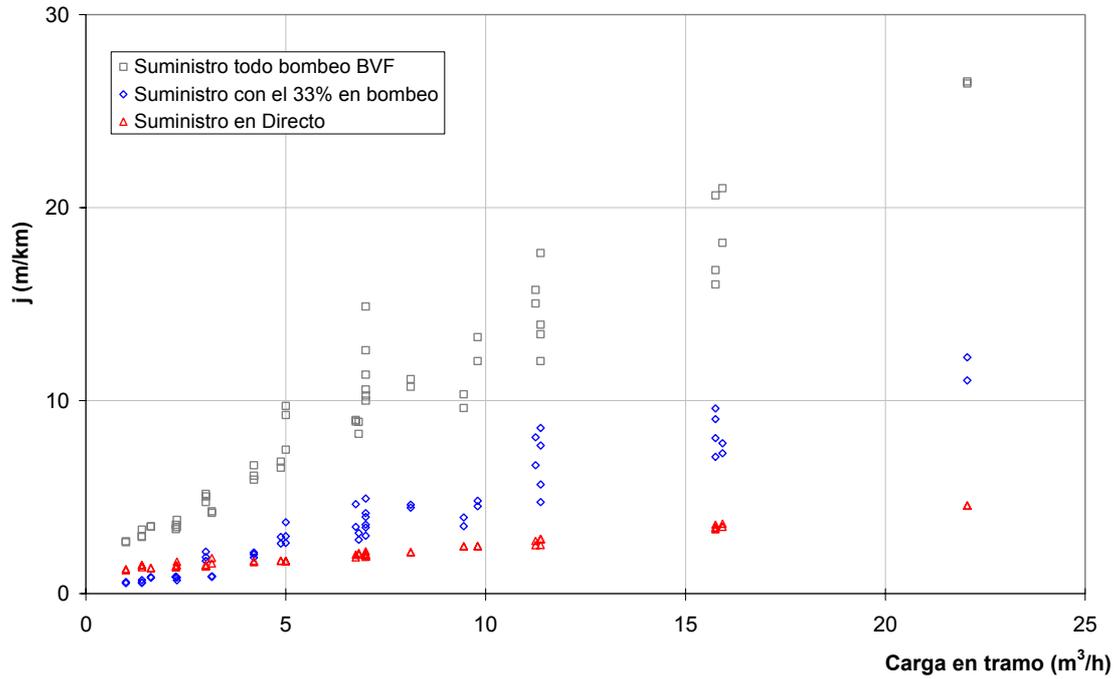


FIGURA 62. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 123 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 141 mm:

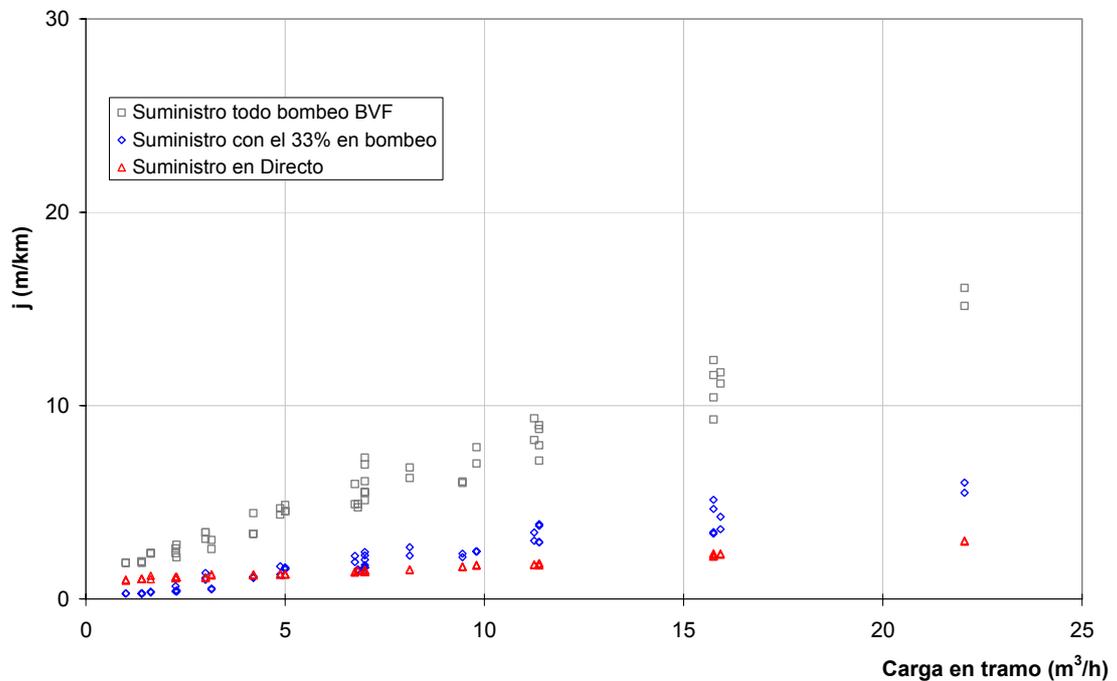


FIGURA 63. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 141 MM.

Ajuste de las pérdidas unitarias máximas para un diámetro interior de 158 mm:

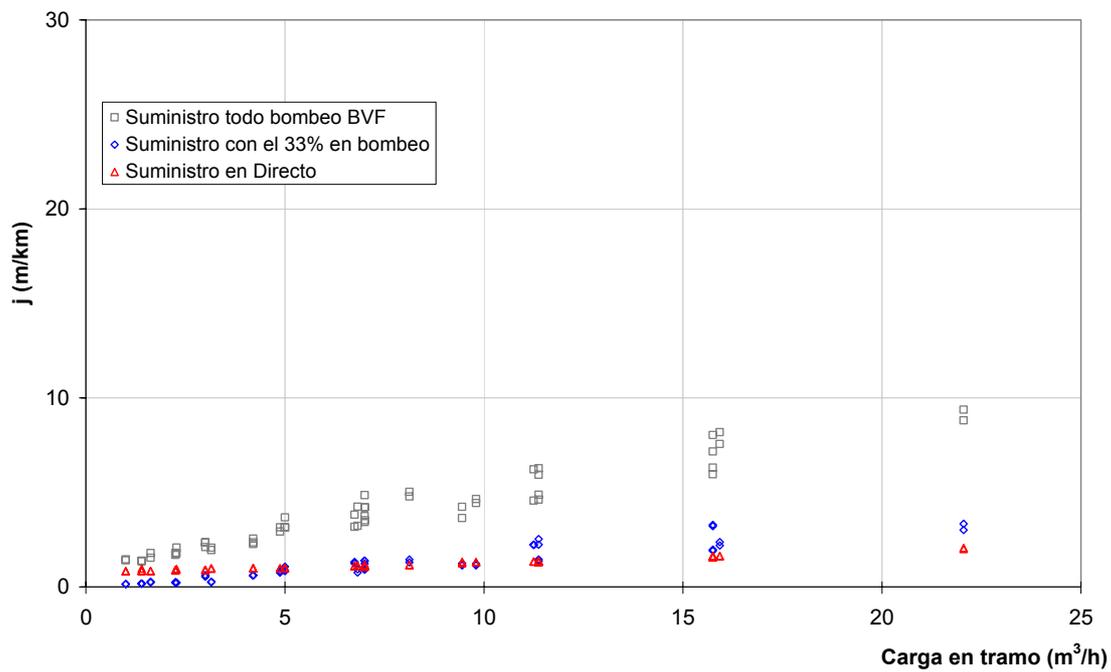


FIGURA 64. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PARA TUBERÍAS DE 158 MM.

## ANEJO VI. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

### VI.1 Aplicación de la gráfica de pendientes máximas en un tramo real

Con las gráficas obtenidas en el estudio es posible validar la posibilidad de eliminar depósitos atmosféricos de las viviendas, comprobando las exigencias reales del tramo con la capacidad disponible del mismo.

A continuación se resume el esquema de un procedimiento seguido para la comprobación de la posibilidad de eliminación de los depósitos intermedio en las viviendas.

#### VI.1.1 Descripción del procedimiento

La siguiente figura muestra el esquema del tramo final de una red de un municipio, del que se conocen todos los datos y cuyas viviendas están parcialmente equipadas con depósitos de almacenamiento comunitario que se desea eliminar.

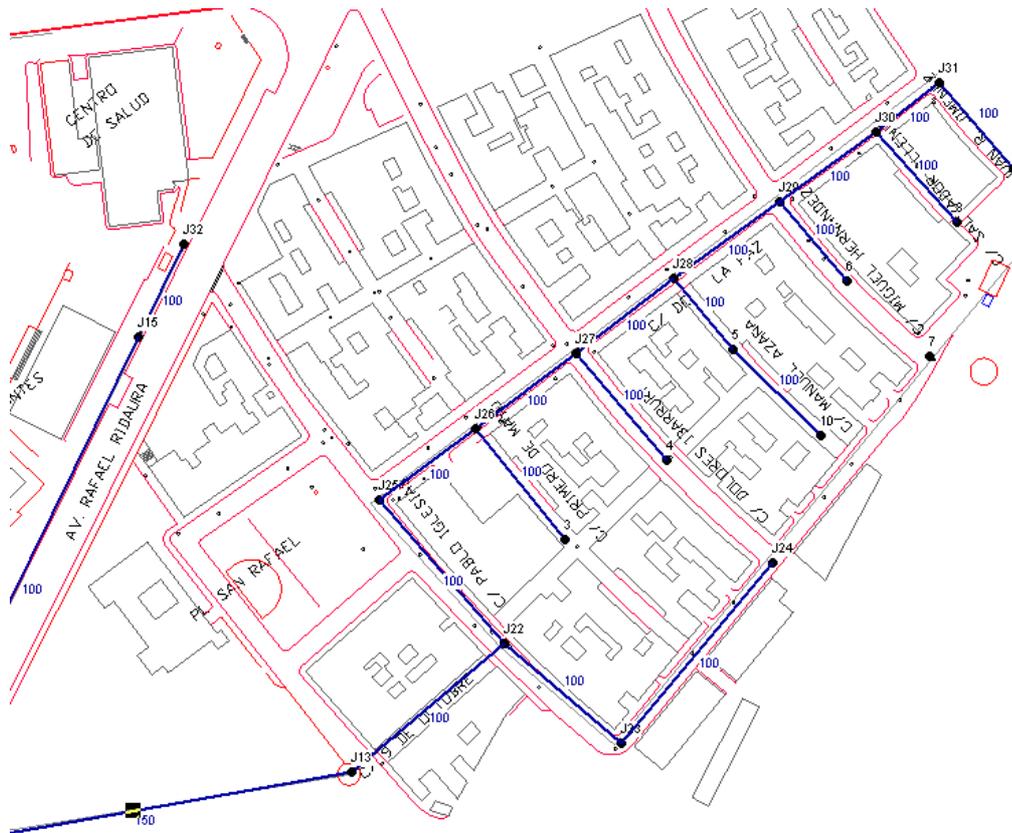


FIGURA 65. ESQUEMA DEL TRAMO DE UNA RED.

El esquema anterior puede ser simplificado en uno similar al mostrado en la siguiente figura:

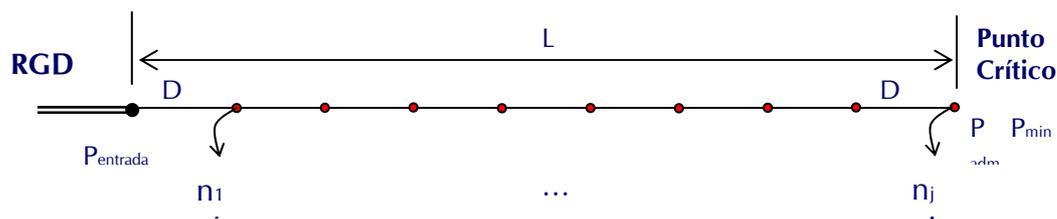


FIGURA 66. ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL TRAMO.

Los datos necesarios del tramo pueden ser los siguientes:

- Presión a la entrada ( $P_{\text{entrada}}$ )
- Presión mínima admisible en el punto más alejado o punto crítico ( $P_{\text{min adm}}$ )
- Diámetro interior de las conducciones ( $D$ )
- Distancia entre el punto de alimentación al tramo y el punto crítico ( $L$ )
- Diferencia de cotas entre nudo crítico y alimentación
- Número de viviendas conectadas a cada nudo (número total de viviendas suministradas en el tramo)
- Valor del volumen suministrado en hora punta por vivienda o para la totalidad del tramo

A continuación se calculan los parámetros necesarios para acceder a la gráfica.

La carga en tramo se corresponde con el volumen total que circula en una hora en el tramo de análisis, calculado a partir de un contador a la entrada del mismo, mediante lecturas de históricos de los contadores domiciliarios o a partir de la estimación de dicho caudal tal como se detalla a continuación:

- Se debe contabilizar el número de viviendas totales a abastecer por el tramo.
- Se debe asignar un consumo máximo por vivienda para la hora de máxima demanda.

Con el producto de estos datos se entra en la tabla y se localiza la pendiente hidráulica máxima asociada al diámetro instalado en el tramo. Si se compara este valor con el valor máximo que puede darse en la red, obtenido en función de la presión de entrada al tramo, la presión mínima asegurada por el gestor y la longitud total del tramo, se puede tener una aproximación sobre la posibilidad de sustituir los depósitos por grupos de velocidad variable.

### VI.1.2 Desarrollo numérico

Dada la topología del terreno y la distancia al nudo de alimentación, se concluye que el nudo más desfavorable es el nudo 9 de la red (Figura 65).

El resto de datos para el cálculo son los siguientes:

- Presión mínima en la entrada del tramo en condiciones normales: 26 m
- Presión mínima asegurada en acometida asegurada por el gestor: 20 m
- Diámetro de las conducciones es de 100 mm (diámetro interior)
- Viviendas totales en el tramo: 210
- Consumo medio en hora punta por vivienda: 31 litros
- Desnivel nudo más alejado: 2 metros
- Distancia hasta punto más alejado: 650 metros

La carga en el tramo se calcula según la siguiente expresión:

$$C = 210 \frac{\text{viviendas}}{\text{tramo}} \cdot 31 \frac{\text{litros}}{\text{vivienda} \cdot \text{hora}} = 6,5 \frac{\text{m}^3}{\text{hora} \cdot \text{tramo}} \quad \text{EC. 14}$$

Acudimos a la gráfica para diámetro 96 mm, que es el que más se aproxima con el diámetro instalado en el tramo, y se obtiene el valor de pendiente unitaria máxima.

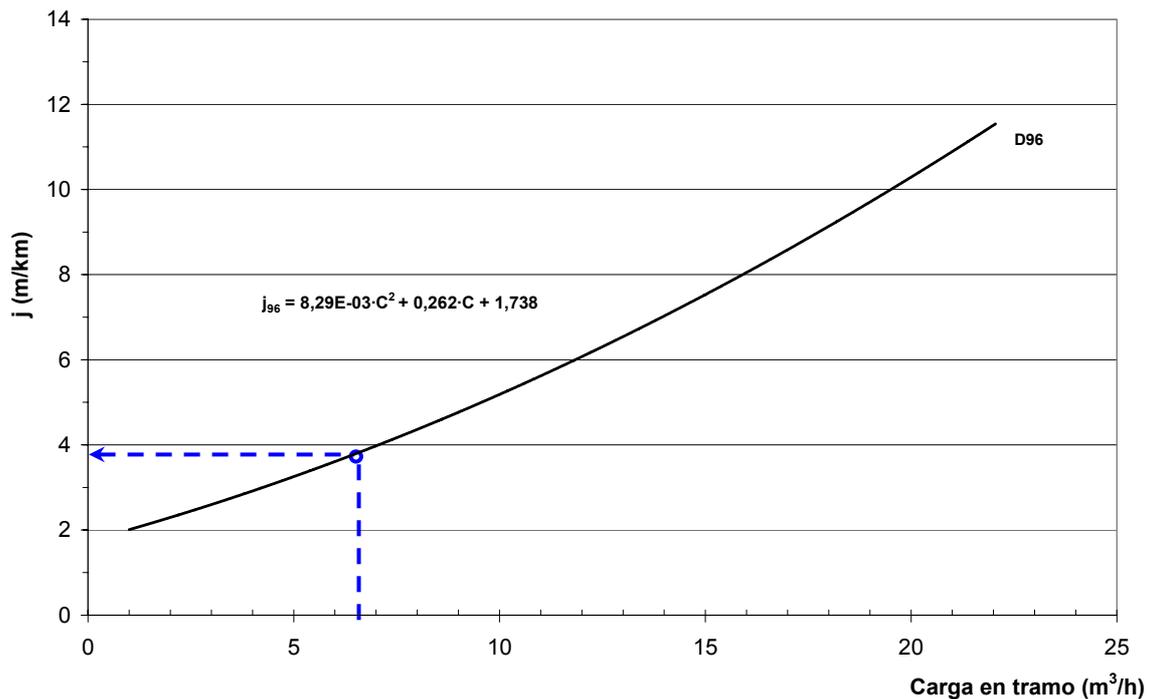


FIGURA 67. PENDIENTE MÁXIMA ADMISIBLE PARA EL DIÁMETRO INSTALADO.

Para la carga indicada, la pérdida unitaria máxima es de 3,8 metros por kilómetro. Por tanto, la presión mínima en el punto más desfavorable de la red es:

$$j = 3,8 = \frac{26 \text{ m} - (p_{\min} - 2) \text{ m}}{0,65 \text{ km}} \rightarrow p_{\min} = 21,53 \text{ m} \quad \text{EC. 15}$$

Dado que la presión mínima obtenida con la curva es mayor que la presión mínima que debe asegurar el gestor a la entrada de la acometida del nudo más desfavorable, se concluye que con el diámetro instalado es posible realizar la sustitución de los depósitos domiciliarios por un suministro en directo, para las casas en las que sea posible éste, y un suministro con grupo de bombeo de velocidad variable en aquellas casas en las que la presión en red sea insuficiente, para asegurar una presión residual mínima de 10 mca en los puntos de consumo.

## VI.2 Aplicación práctica del procedimiento de simulación

Enmarcado dentro de los desarrollos que se realizan con la empresa municipal de aguas de Sevilla (EMASESA), se plantea la posibilidad de simular la respuesta de un tramo de red real ante la instalación de un grupo de bombeo que abastezca un edificio de viviendas. a diferencia del ejemplo anterior en el que se utilizaron la gráfica de pendientes máximas, en este caso se desarrolla íntegramente la construcción particular del tramo de estudio, realizando las correspondientes simulaciones sobre el modelo de éste.

La instalación se encuentra en uno de los municipios gestionados por la empresa EMASESA, concretamente en la población de San José de la Rinconada, próximo a Sevilla. Se trata de un conjunto de bloques de viviendas conectados en directo a la red pública de abastecimiento, sin que exista ningún elemento intermedio entre la acometida o la instalación particular de los abonados.

El aumento de la demanda en la zona, originado por el desarrollo urbanístico, ha provocado un descenso de la presión disponible en los puntos de consumo de algunos abonados y, por ello, se plantea la posibilidad de conectar un grupo de bombeo en directo en la instalación, de forma que se contrarreste el descenso de presión derivado del aumento de la demanda.

A continuación se muestran los pasos seguidos para el análisis del tramo de red, y su ajuste para la simulación hidráulica del mismo.

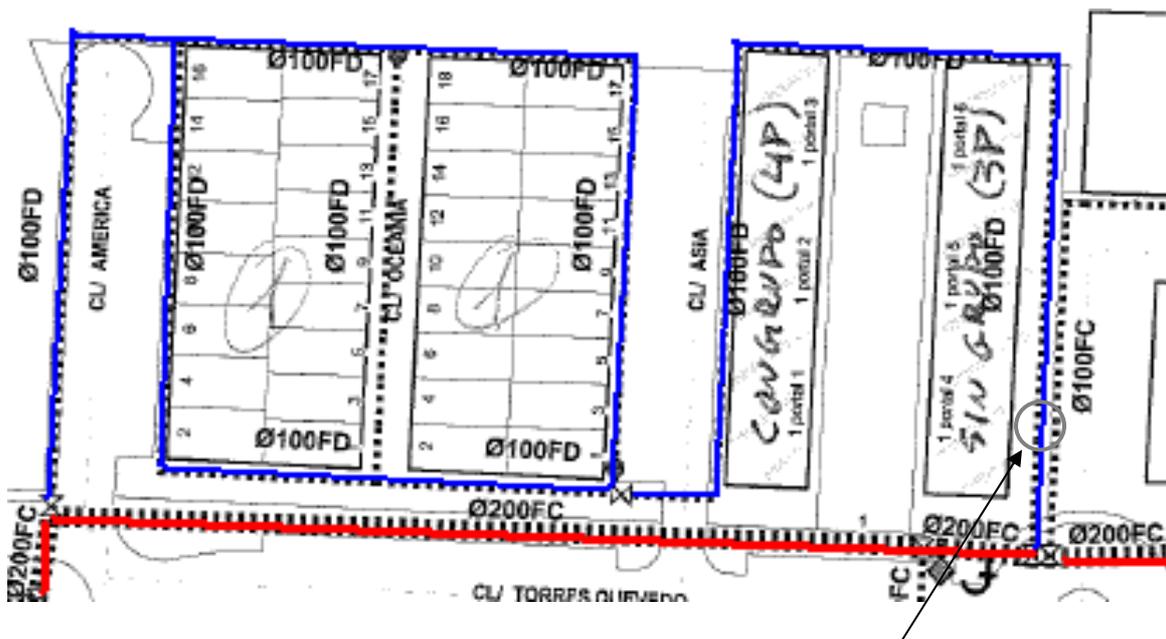
### **VI.2.1 Identificación de la estructura del tramo**

Dado un determinado tramo, se debe identificar los elementos que lo integran así como la estructura física del mismo.

Las siguientes figuras muestran la ubicación y esquema general del tramo de estudio, así como la zona aproximada de instalación del equipo de presión:



FIGURA 68. SITUACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.



Punto aproximado de instalación  
 del grupo de presión

FIGURA 69. ESQUEMA GENERAL DEL TRAMO DE ANÁLISIS Y UBICACIÓN APROXIMADA DEL GRUPO DE PRESIÓN.

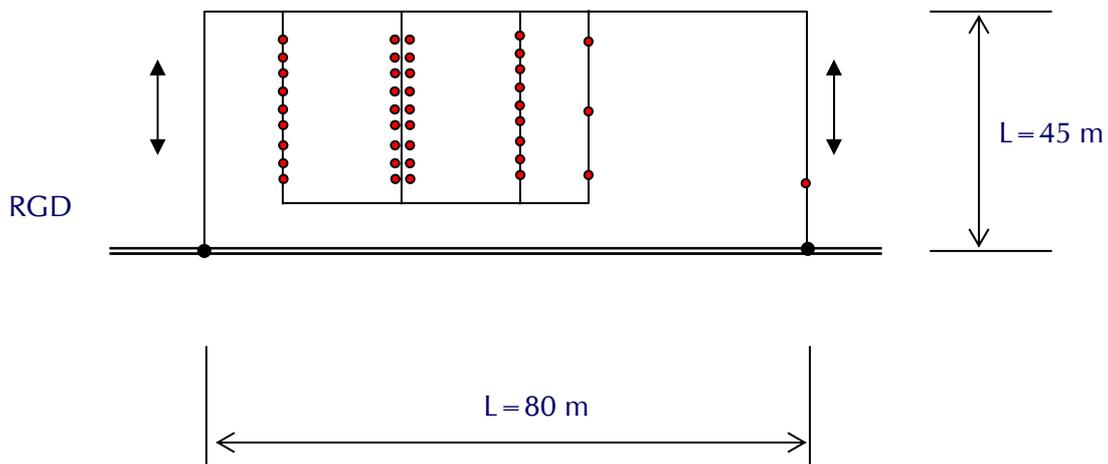
### VI.2.2 Simplificación del tramo

La casuística de cada instalación obliga a analizar de forma particular cada problema, y puesto que se trata de estimar la respuesta de una red a partir de la simulación del comportamiento hidráulico de la misma, interesa simplificar la representación del tramo, facilitando de esta forma su implementación en el modelo, sin que con ello se vea alterado el problema real.

Observando la Figura 68, se comprueba que la zona de estudio incluye dos tramos anidados a la red mallada principal (conducción de FC200) de idéntica topología, cuyo esquema general se puede ver en la Figura 69. Dada la similitud de los tramos y la conexión de los mismos a la conducción principal, no resulta alterado el problema si se trabaja con uno de los tramos anidados.

En la Figura 69 se ha simplificado el tramo original, mostrándose únicamente una de las zonas de estudio. En esta misma figura, se especifica además la zona aproximada donde se pretende instalar el grupo de bombeo, justo en uno de los ramales de aspiración conectados a la red pública de abastecimiento.

La siguiente figura muestra la representación física aproximada de la red, donde se identifican los puntos de conexión de las acometidas de las instalaciones de cada uno de los bloques de abonados, así como las principales dimensiones del tramo.



- Punto de conexión de acometida
- Punto de conexión red anidada (con válvula de seccionamiento)

FIGURA 70. ESQUEMA HIDRÁULICO APROXIMADO DEL TRAMO DE ANÁLISIS.

A partir de la figura anterior, se ha considerado que el esquema del tramo a modelar que mayor exigencia presenta y, por tanto, puede ser representativo para la determinación de las condiciones de presión críticas de la red, es el siguiente:

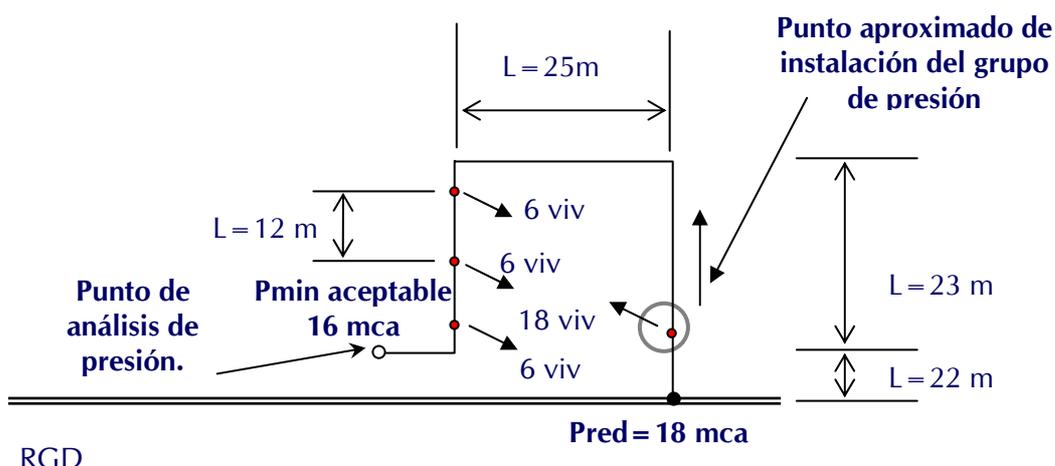


FIGURA 71. SIMPLIFICACIÓN DEL ESQUEMA DEL TRAMO MODELADO PARA LAS SIMULACIONES.

El esquema anterior representa la zona correspondiente a bloques de 3 y 4 alturas, suministrando el primero de ellos a un total de 18 viviendas y, bajo el supuesto de funcionamiento con un único grupo de presión de velocidad variable, se considerará un único punto de demanda, equivalente a 18 viviendas suministradas en directo. Por otro lado, la demanda del bloque de 4 plantas será representada por 3 nudos de consumo, correspondiéndose cada uno de ellos con un único portal de 6 viviendas y en tal caso, se le asignará a cada nudo la demanda de cada portal (suministro en directo sin grupo de bombeo).

### VI.2.3 Desarrollo de las simulaciones

Una vez simplificado el modelo físico del tramo a simular es posible construir su modelo matemático equivalente a partir de las características hidráulicas del mismo. Éstas vienen definidas principalmente por las características dimensionales del tramo; diámetro interior de cada una de las partes en las que se divide, material de las conducciones (definido por la medida de la rugosidad del mismo), longitud de cada tramo y distancia a cada uno de los puntos de demanda.

Por otro lado, se ha modelado las características particulares de los puntos de consumo, definidas éstas a partir del tipo de suministro existente. Para las viviendas de algunos de los bloques el suministro se realiza en directo, sin la interposición de ningún elemento de almacenamiento ni bombeo, y en el bloque de 16 viviendas se ha programado el modelo correspondiente al grupo de bombeo de velocidad variable.

Respecto a la carga del modelo (implementación de las condiciones de consumos de las instalaciones conectadas al tramo), se ha fijado el valor medio de consumo probable de una vivienda en condiciones más desfavorables (horas de máxima demanda). Este valor ha sido obtenido a partir de los datos proporcionados por el abastecimiento. El volumen total asignado a cada nudo de consumo durante una hora corresponde al producto del número de viviendas asociadas al nudo y la dotación considerada por vivienda (para este caso 50 l/vivienda/hora).

En cuanto a la distribución de la demanda a lo largo de la hora de simulación, para la representación de cada una de las casas conectadas al tramo, se ha accedido de forma aleatoria a la base de datos de viviendas, adquiriendo los registros correspondientes a una hora real de suministro de la vivienda.

El total de simulaciones realizadas para este caso práctico son de 1000 simulaciones de una hora de duración cada una de ellas. En cada una de las simulaciones se ha cargado el modelo de simulación con los datos de viviendas de la base de datos independientes. La frecuencia entre consumos es de 10 segundos, tal como está fijada en la base de datos de consumos.

#### VI.2.4 Resultado de las simulaciones

A continuación se presentan los resultados del análisis efectuado de las 1000 simulaciones, de una hora de duración (equivalente a un año de funcionamiento de la instalación), obtenidos utilizando la herramienta Toolkit de Epanet y datos reales de consumo de viviendas en intervalos de 10 segundos, a partir de las viviendas de la base de datos.

Las presiones obtenidas después de 1000 simulaciones se representan en la siguiente figura, donde se muestran los valores medios y mínimos de presión obtenidos en el punto de análisis del tramo para cada simulación de una hora de funcionamiento.

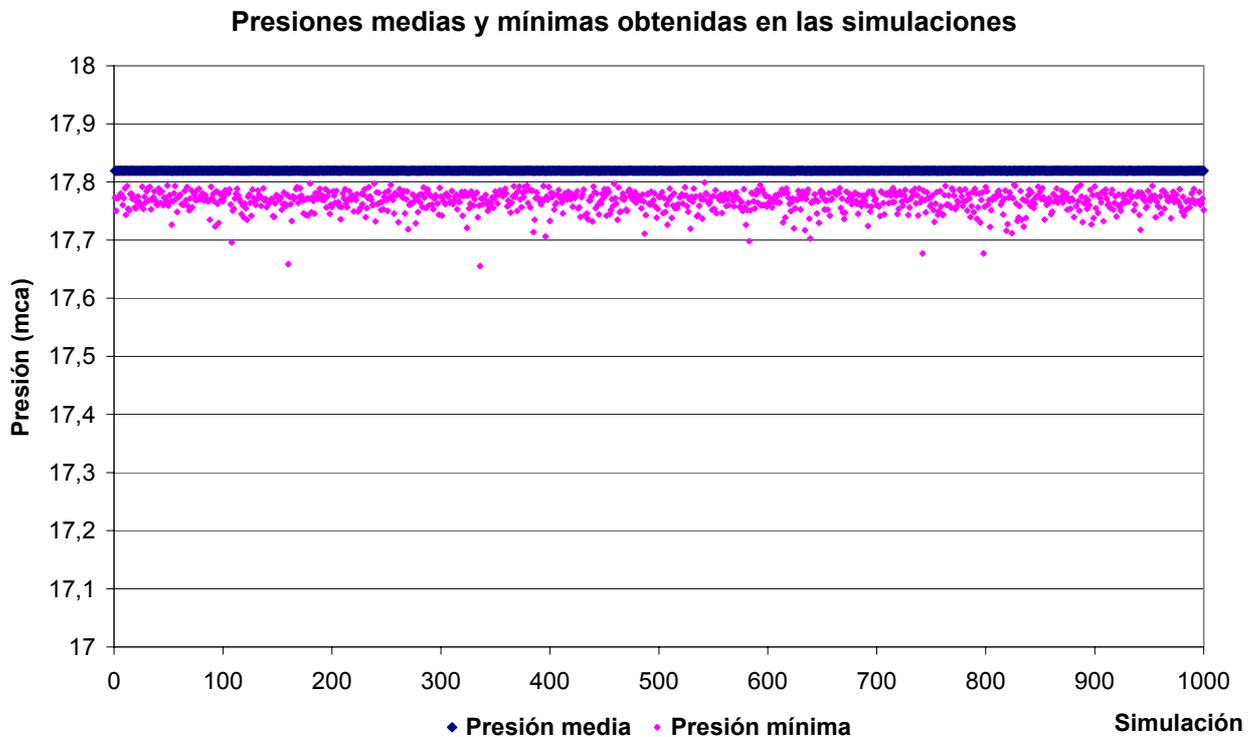


FIGURA 72. GRÁFICA CON LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.

Como se puede observar en la figura anterior, la presión media en el punto de control es de aproximadamente 17,82 mca, la presión registrada en el nudo de análisis del tramo no desciende por debajo de 17,6 mca en ninguna de las simulaciones.

La siguiente gráfica muestra el tiempo anual estimado en que la presión descenderá de un determinado valor para un año de funcionamiento del grupo.

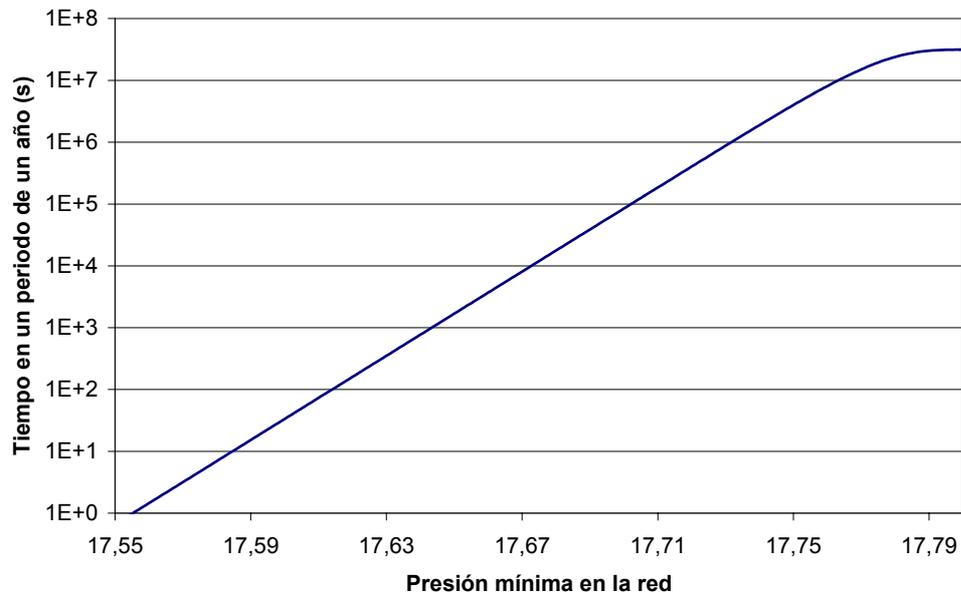


FIGURA 73. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO TOTAL EN EL QUE SE ALCANZARÁN LOS VALORES DE PRESIÓN MÍNIMOS.

Por ejemplo, se estima que la presión descenderá por debajo de 17,62 mca durante aproximadamente 200 segundos al año, siendo lo más usual que el valor mínimo de ésta sea próximo a 17,8 mca.

Con la siguiente gráfica, obtenida a partir del análisis estadístico de los resultados, es posible comprender mejor la distribución de los valores de presión mínima obtenidos con las simulaciones.

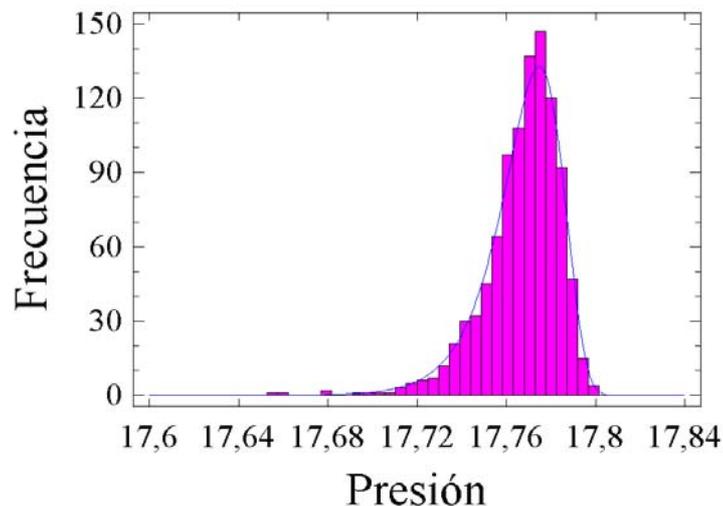


FIGURA 74. FUNCIÓN DE DENSIDAD DE LAS PRESIONES MÍNIMAS.

A partir de las simulaciones realizadas se puede concluir que la presión en el punto más desfavorable del tramo no desciende más de 0,5 mca con respecto a la presión de entrada en el mismo.

Dado que la restricción impuesta para la instalación del equipo de bombeo es que la presión en condiciones normales de funcionamiento en el punto más desfavorable no descienda por debajo de 16 mca (equivalente a una pérdida de presión en el tramo de 2 mca) se concluye que es aceptable la instalación de un grupo de presión de velocidad variable correctamente dimensionado.

#### **VI.2.5 Validación de los resultados aplicando los criterios de la NIA.**

En el siguiente apartado se persigue la validación de los resultados anteriores imponiendo los caudales instantáneos propuestos por la NIA en lo referente a caudales punta de diseño para equipos de bombeo.

Por tanto, se analizará el tramo de estudio en el supuesto de que cada nudo de la instalación demande un caudal equivalente al caudal punta que, según la NIA, deberá ser capaz de aportar la bomba durante su funcionamiento normal.

El caudal punta en cada nudo se obtiene según la siguiente expresión:

$$Q_{\text{punta}} = N_{\text{viv}} k_1 k_2 Q_{\text{inst}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $N_{\text{viv}}$  representa el número de viviendas suministradas mediante el grupo de bombeo (será función de las viviendas de cada acometida),  $k_1$  es el coeficiente de simultaneidad que tiene en cuenta el número de aparatos de una vivienda que están siendo utilizados al mismo tiempo,  $k_2$  es el coeficiente de simultaneidad que tiene en cuenta el número de viviendas que están consumiendo agua durante el mismo instante y  $Q_{\text{inst}}$  es el caudal instalado en cada una de las viviendas, que para el Tipo D vale 1,95 lps.

Una vez calculados los caudales instantáneos demandados por cada uno de los nudos (2,11 lps para el primer bloque y 1,26 lps para los nudos que forman el segundo bloque), se ha procedido a la simulación mediante Epanet del modelo simplificado del tramo bajo dichas condiciones de funcionamiento.

En la siguiente imagen se observa el modelo implementado en Epanet:

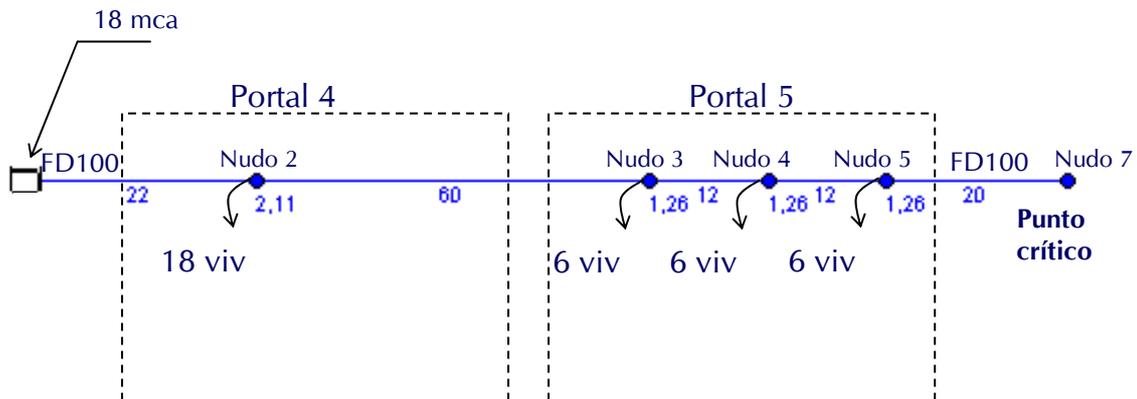


FIGURA 75. ESQUEMA DEL TRAMO DE RED A SIMULAR.

Para el análisis, se ha simulado la red cargando los nudos de demanda con los caudales obtenidos según la NIA, tal como si cada acometida demandase el caudal punta de diseño equivalente al suministro del número de viviendas conectadas a ésta.

Los resultados obtenidos en una única simulación estática del funcionamiento de la red pueden ser observados en la siguiente tabla:

ID Nudo	Presión m
Nudo 2	17,85
Nudo 3	17,68
Nudo 4	17,67
Nudo 5	17,66
Nudo 7	17,66

FIGURA 76. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

Tal como se puede apreciar en la tabla, bajo las condiciones más críticas de suministro, la presión que se alcanza en el nudo más desfavorable del tramo está dentro del rango de valores determinado en el estudio, concluyéndose por tanto, que es posible proceder a la instalación de un grupo de bombeo correctamente dimensionado, sin que la presión descienda por debajo del valor admisible.

## ANEJO VII. ANÁLISIS DE LAS DEPRESIÓN OIGINADA POR EL ARRANQUE DE BOMBAS

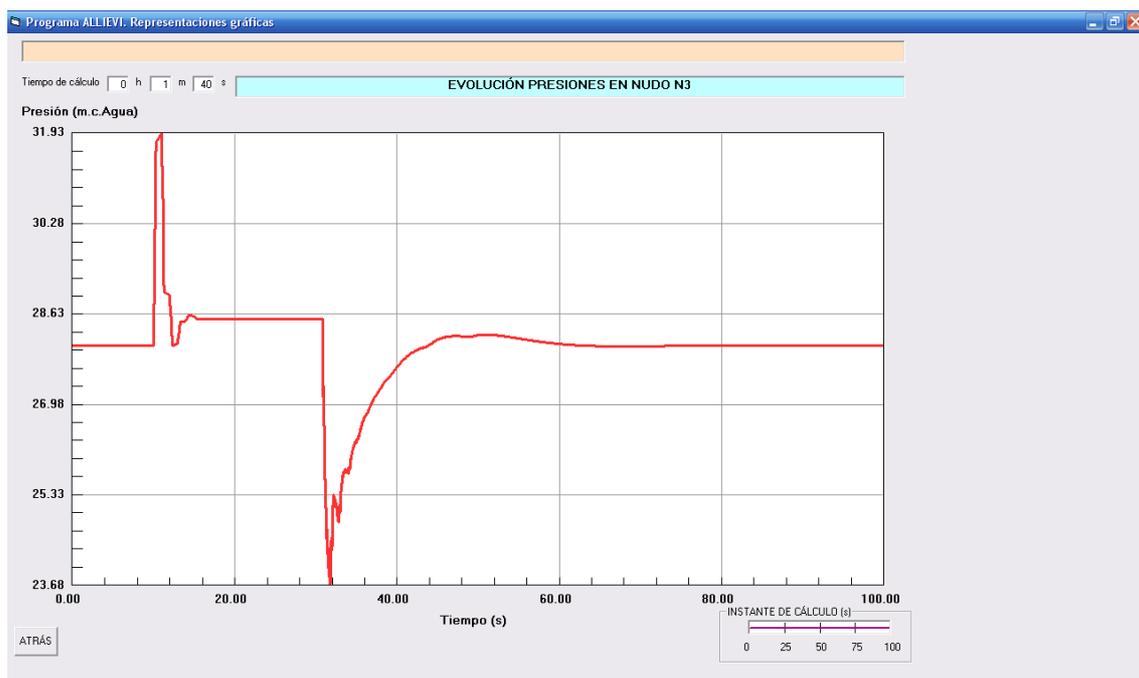
Como se ha contemplado en el estudio, el instante del arranque de la bomba es el instante de su funcionamiento que mayores depresiones genera durante el transitorio.

A continuación se muestra los efectos de algunas simulaciones del funcionamiento de un único grupo de bombeo conectado a la red pública para diferentes configuraciones del mismo (diámetro interior y demanda del edificio).

### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 79 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.05 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 5 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

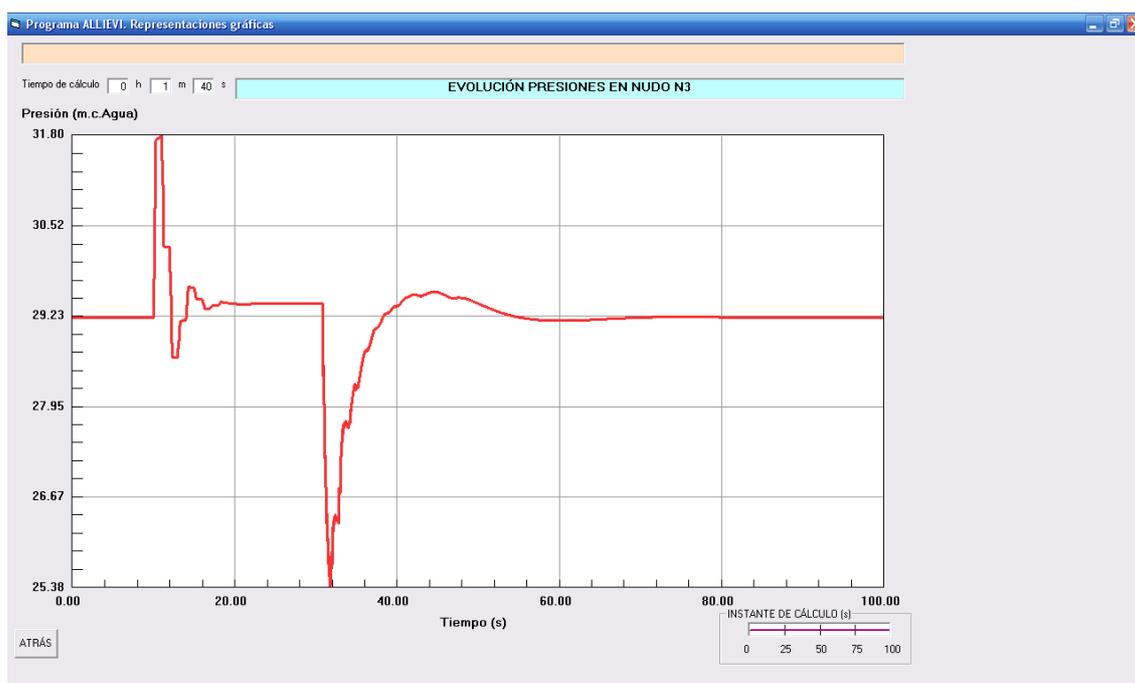
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 96 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.05 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 5 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

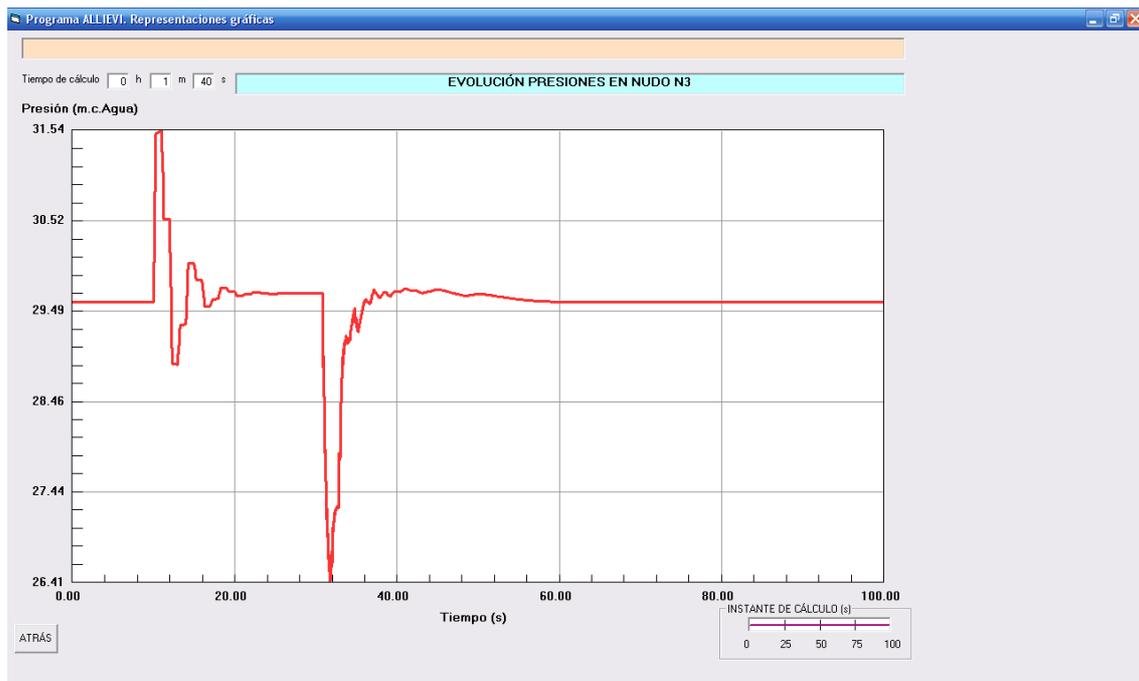
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 110mm  
Caudal punta de la bomba: 1.04 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 5 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 123mm

Caudal punta de la bomba: 1.05 l/s

Presión a la entrada del tramo: 30 mca

Longitud total tramo: 5.000 m

Celeridad de la onda: 1.000 m/s

Tamaño aproximado del edificio: 5 viviendas

Tiempo de arranque de la bomba: 1 s

Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s

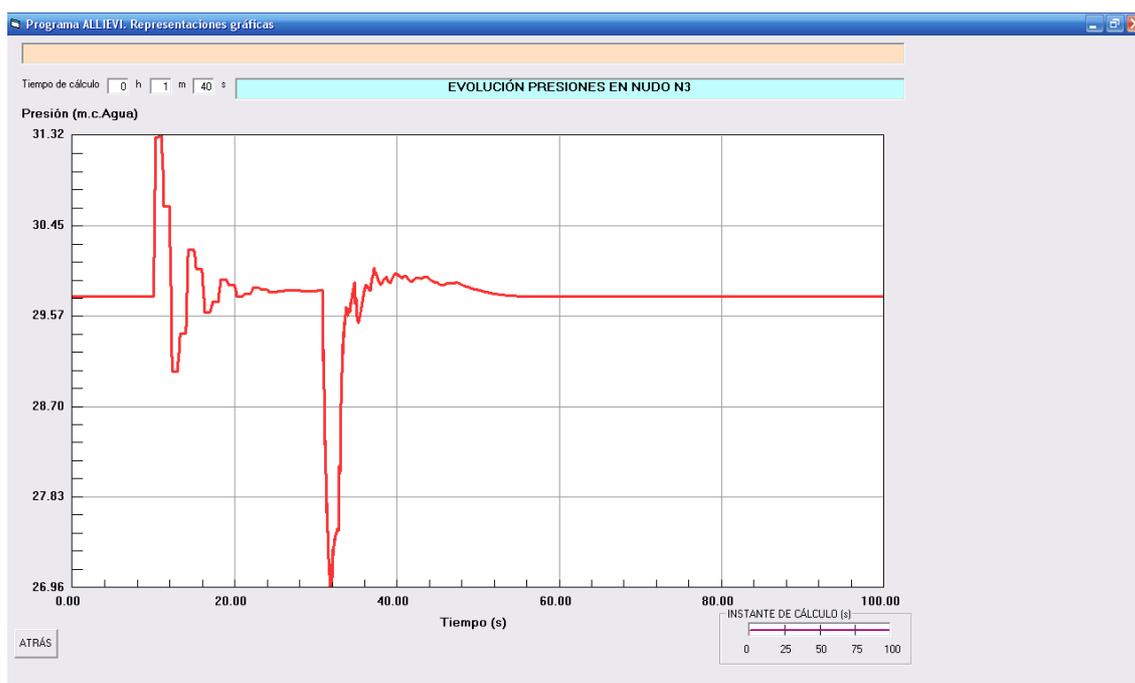
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s

Altura aportada por la bomba: 30 mca

Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>

Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

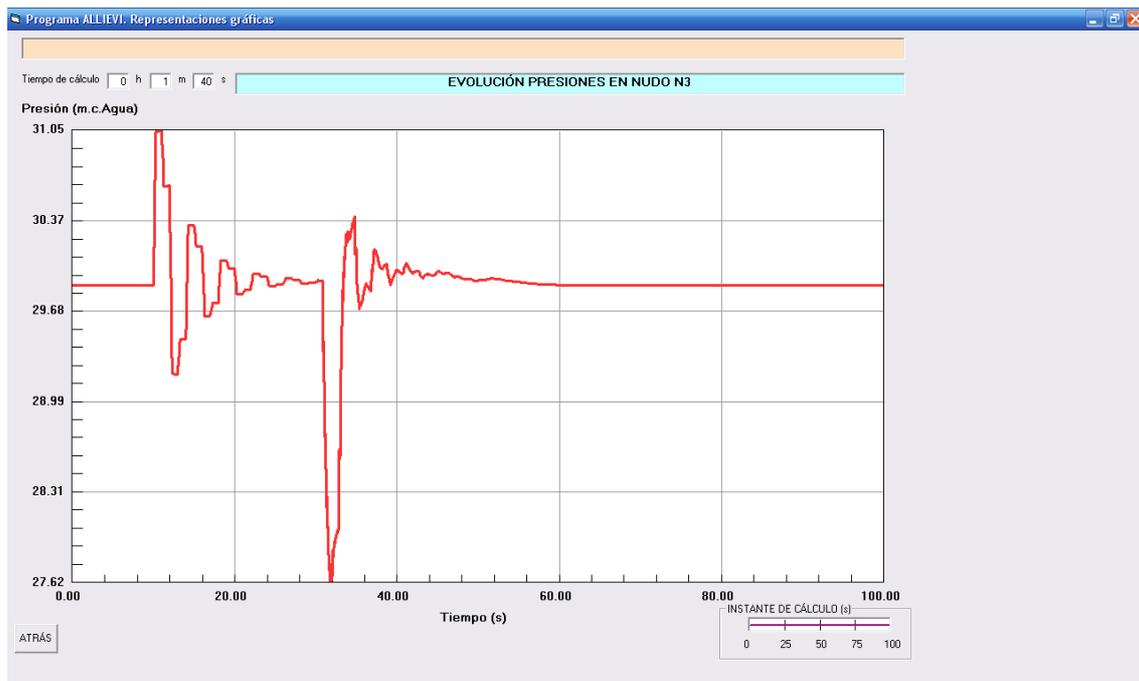
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 141mm  
Caudal punta de la bomba: 1.08 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 5 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

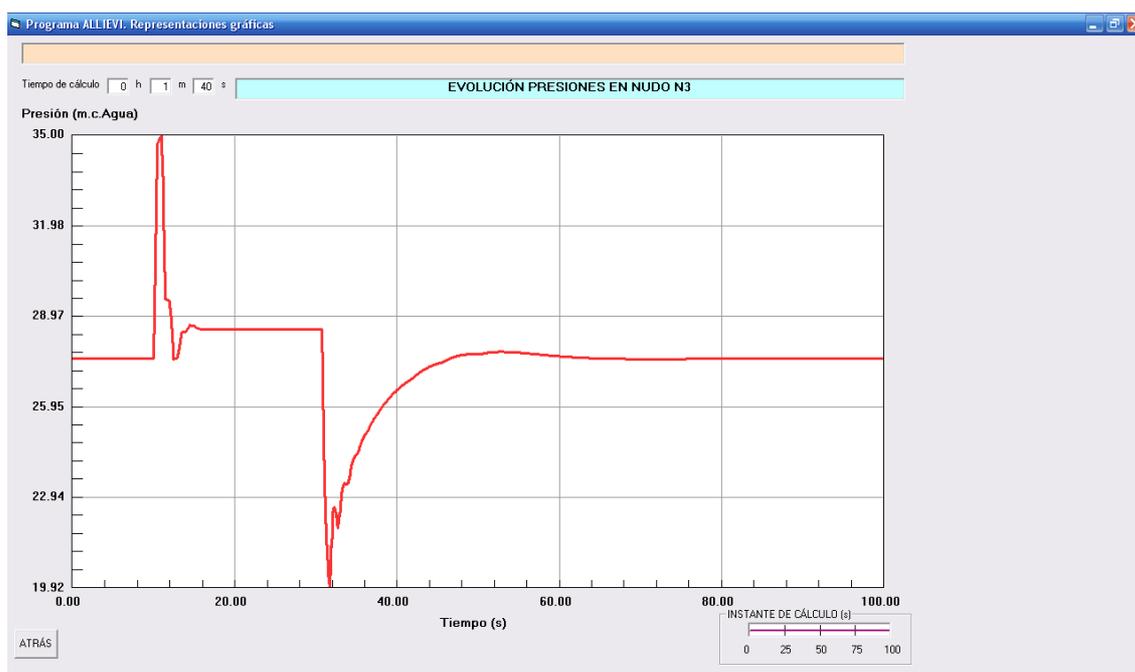
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 79 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.72 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 15 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

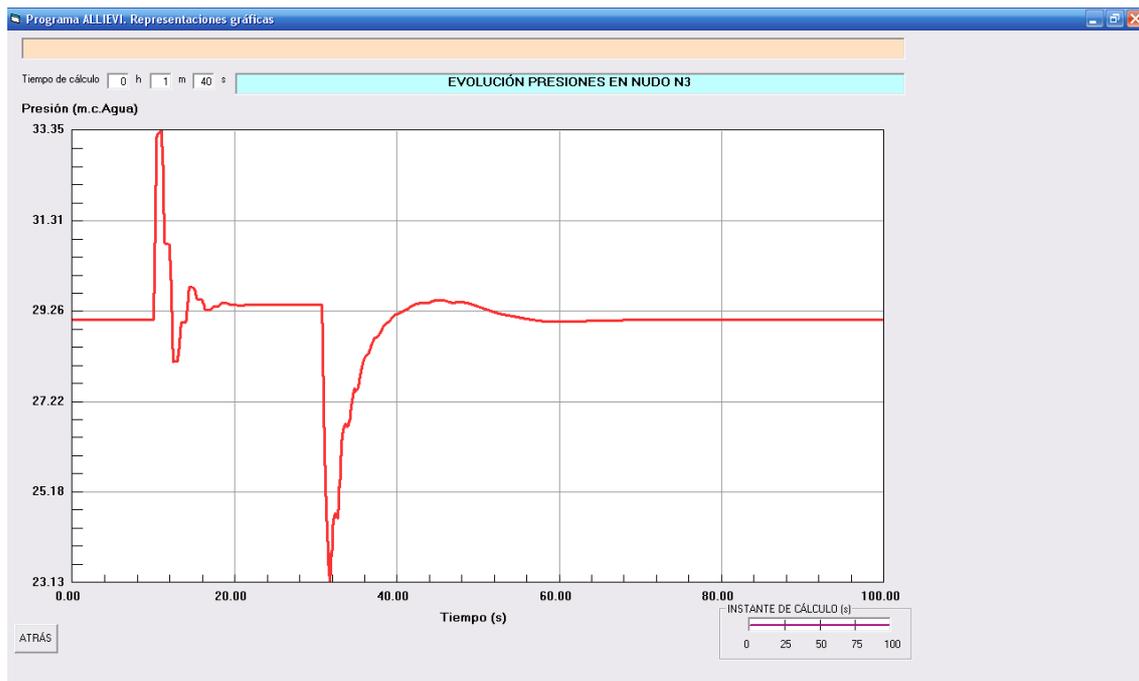
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 96 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.75 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 15 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

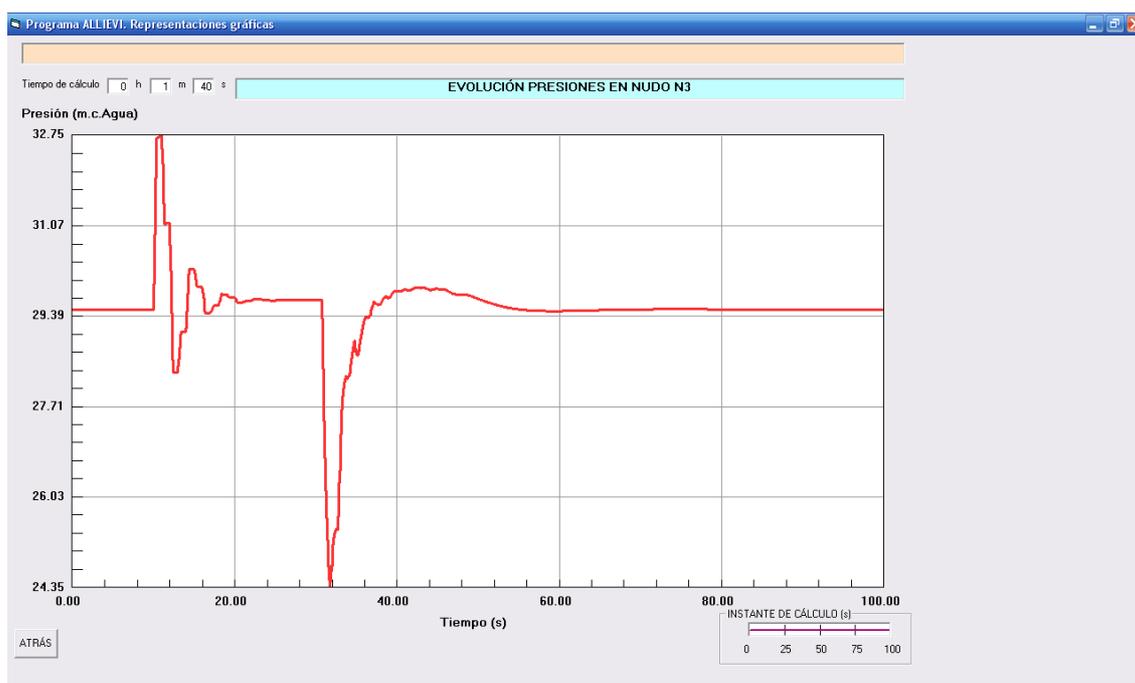
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 110 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.71 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 15 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

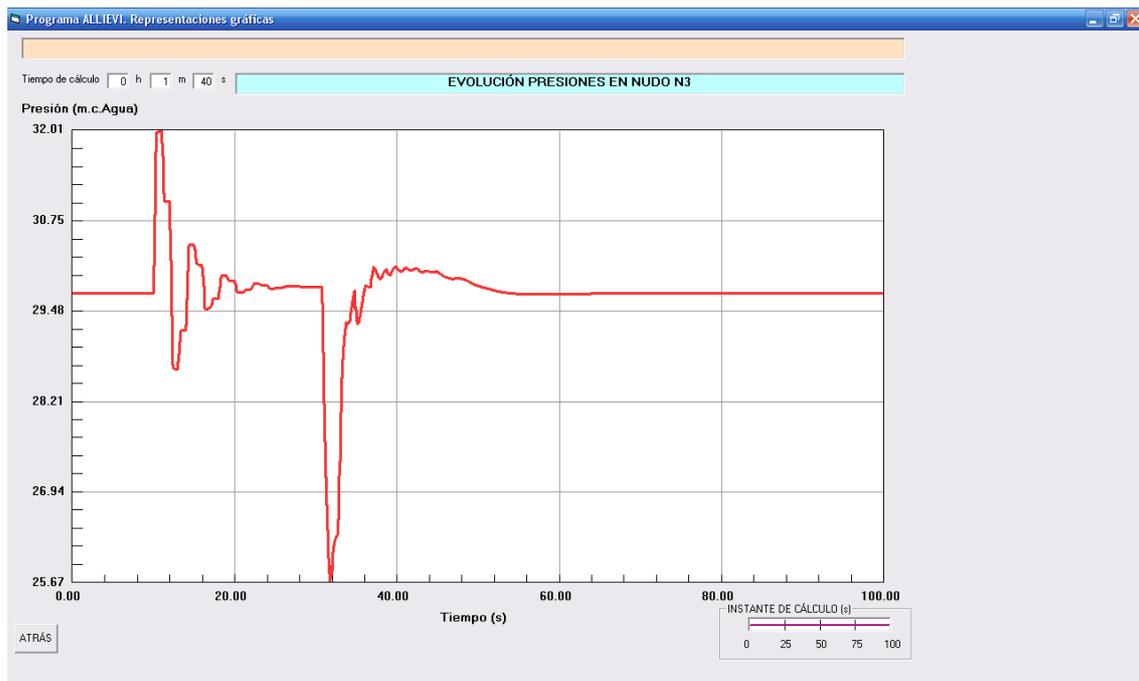
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 123 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.74 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 15 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

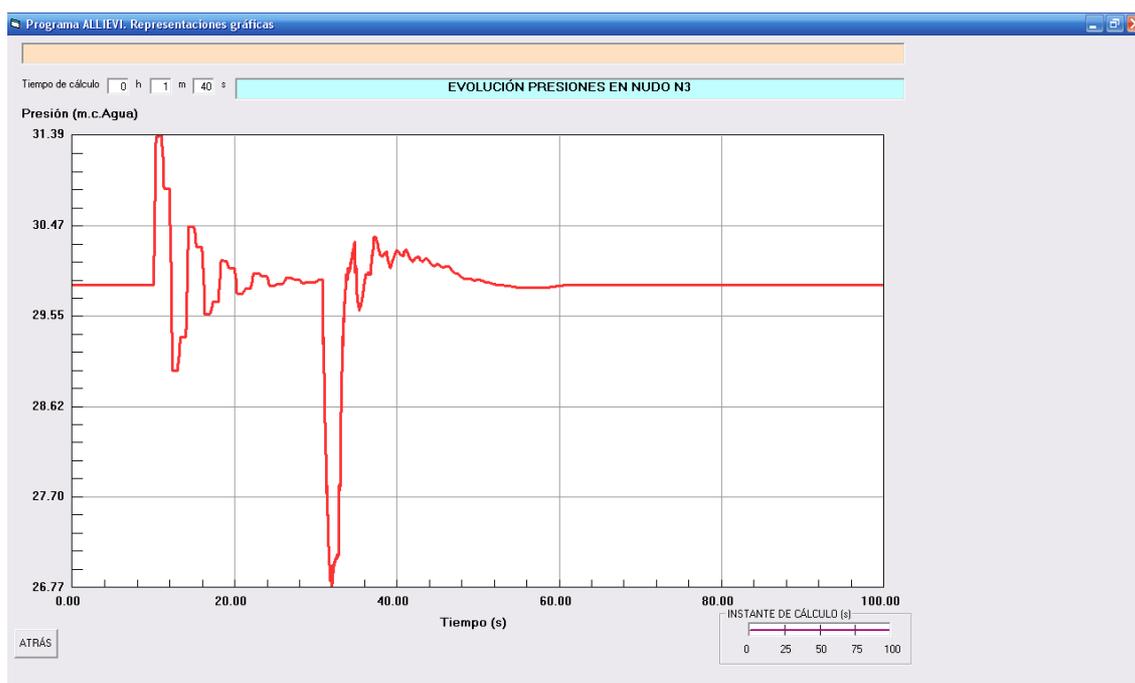
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 141 mm  
Caudal punta de la bomba: 1.70 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 15 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

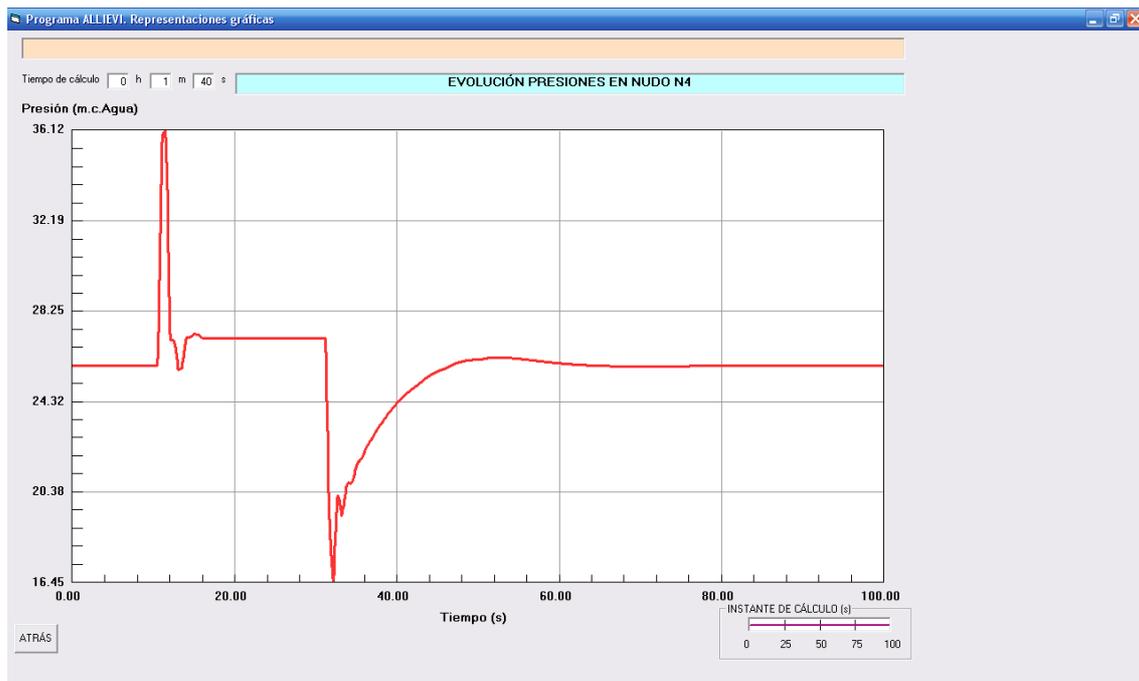
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 79 mm  
Caudal punta de la bomba: 2.49 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 30 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

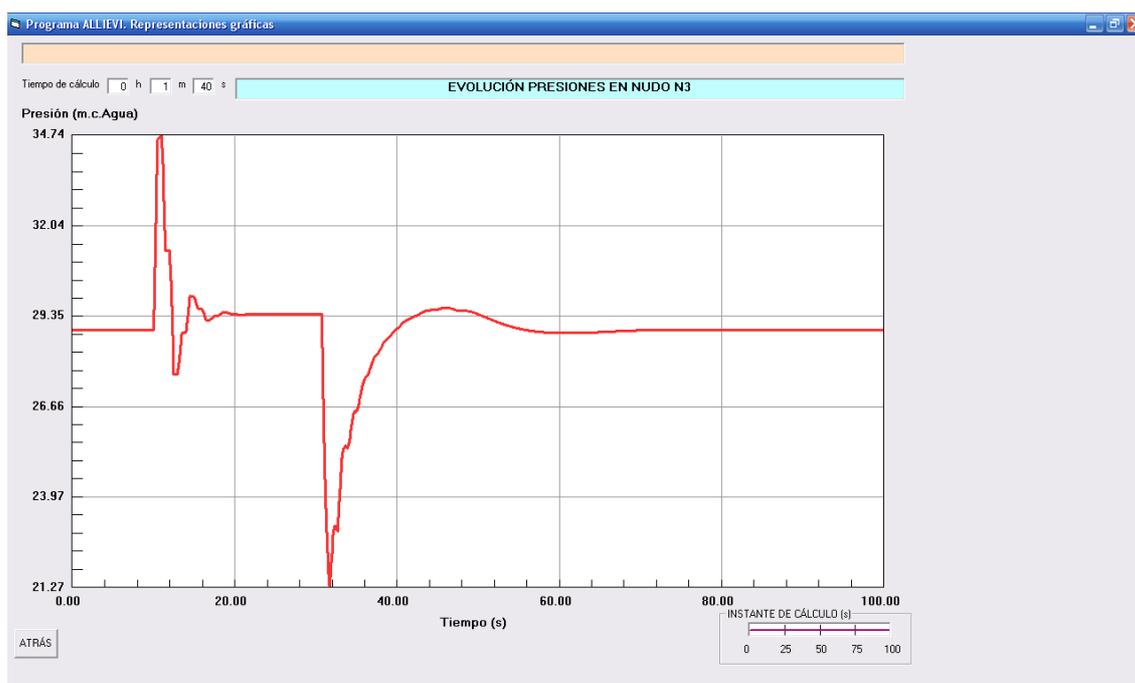
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 96 mm  
Caudal punta de la bomba: 2.45 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 30 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

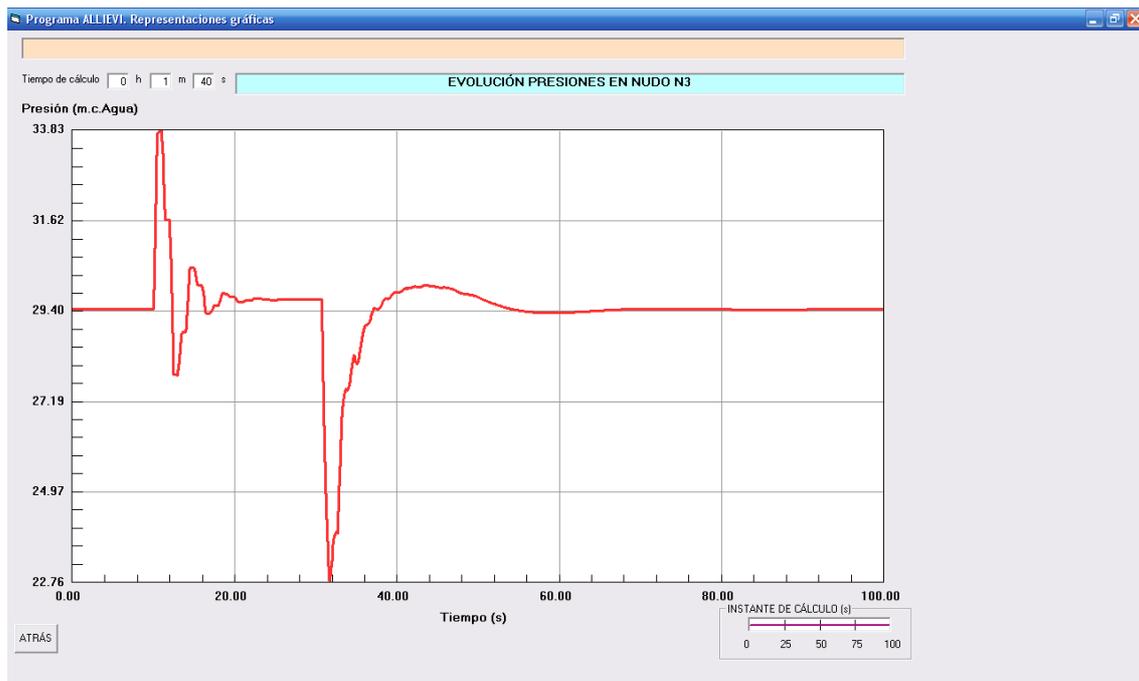
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 110 mm  
Caudal punta de la bomba: 2.47 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 30 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

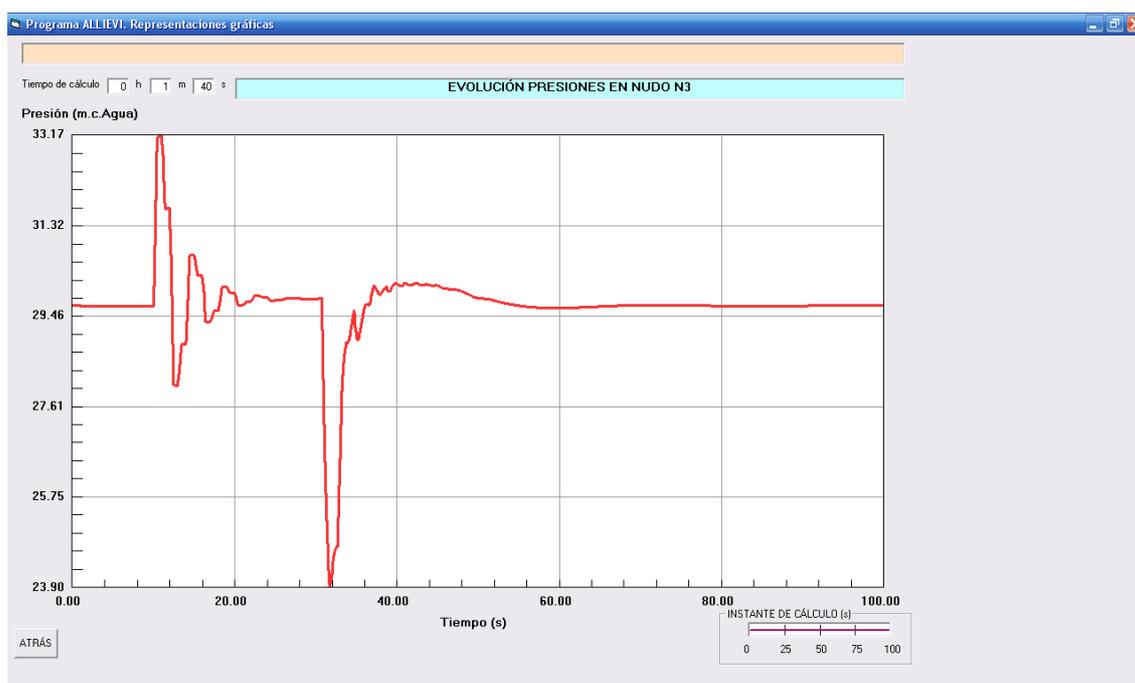
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 123 mm  
Caudal punta de la bomba: 2.47 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 30 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

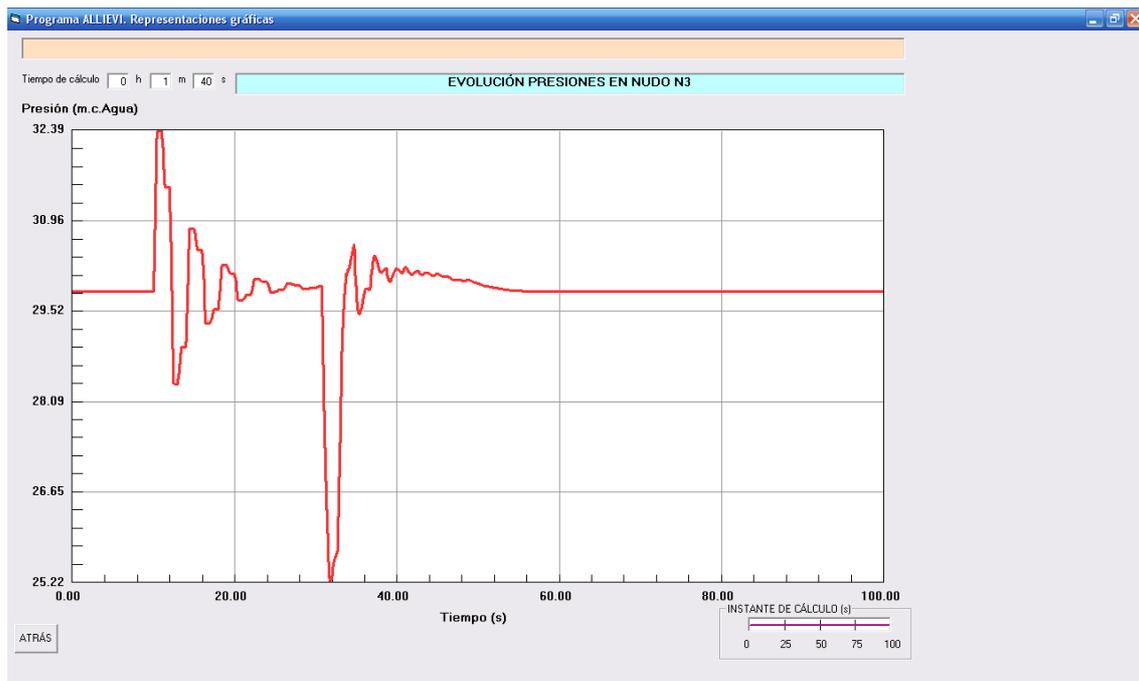
Variación de presión en la acometida del edificio:



### Datos de la simulación:

Diámetro interior de la conducción general: 141 mm  
Caudal punta de la bomba: 2.48 l/s  
Presión a la entrada del tramo: 30 mca  
Longitud total tramo: 5.000 m  
Celeridad de la onda: 1.000 m/s  
Tamaño aproximado del edificio: 30 viviendas  
Tiempo de arranque de la bomba: 1 s  
Instante de parada de la bomba:  $t = 10$  s  
Instante de arranque de la bomba:  $t = 30$  s  
Altura aportada por la bomba: 30 mca  
Inercia de la bomba: 0.01 Kg·m<sup>2</sup>  
Velocidad en punto rendimiento óptimo: 2.900 rpm

Variación de presión en la acometida del edificio:



El análisis de las gráficas anteriores permite obtener una serie de correlaciones entre los principales parámetros analizados; diámetro de la conducción general, caudal punta de la bomba y la máxima depresión alcanzada en el arranque.

La siguiente gráfica muestra la correlación entre la depresión originada en el arranque del grupo de bombeo y el diámetro de la conducción general, en función de el caudal punta que detrae la bomba en el arranque.

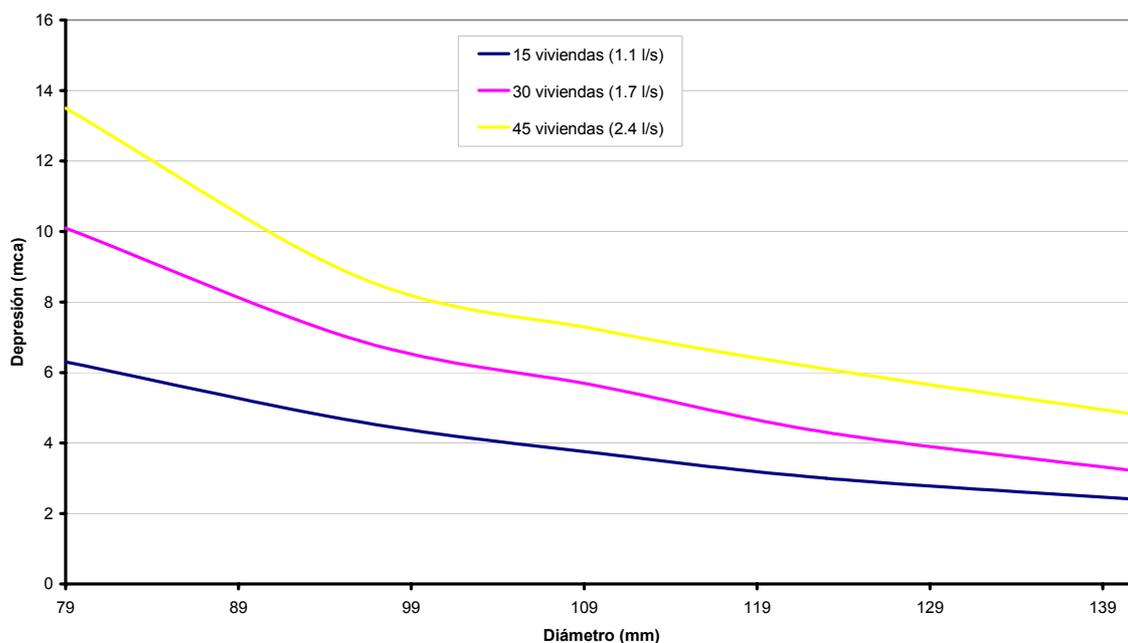


FIGURA 77. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON DEPÓSITO SUPERIOR.

La siguiente gráfica muestra la correlación entre la depresión originada en el arranque del grupo de bombeo y el caudal del grupo de bombeo del edificio, en función del diámetro interior de la conducción de la red pública.

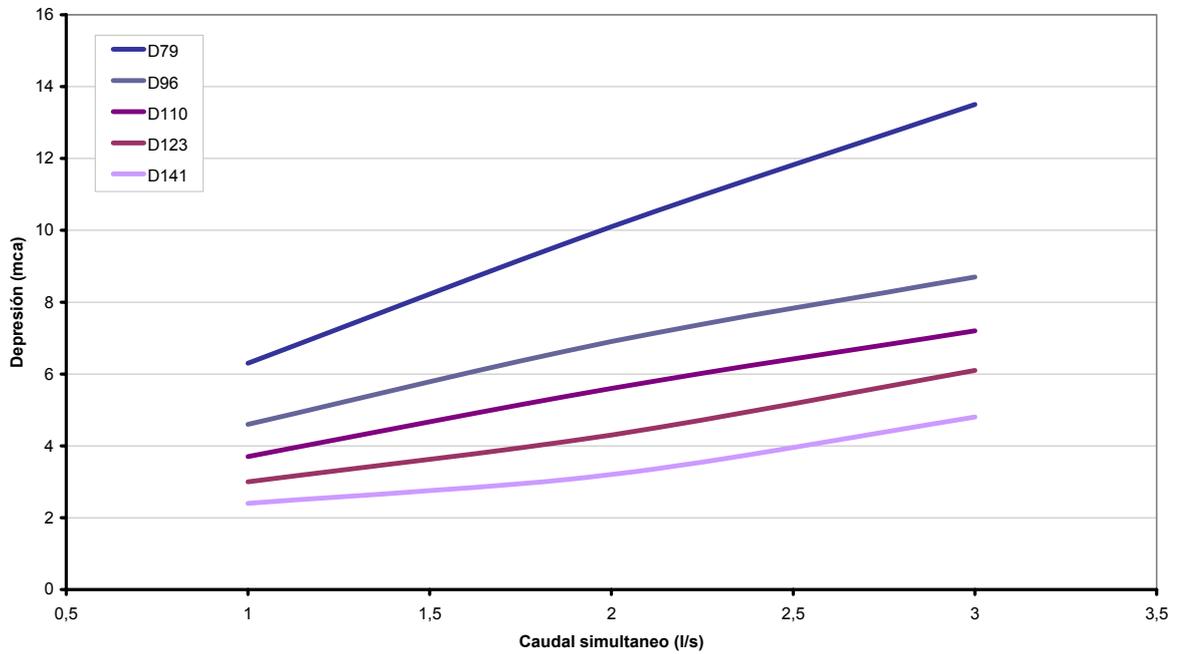


FIGURA 78. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN CON DEPÓSITO SUPERIOR.