

**Trabajo Fin de Máster**

**METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN  
DE LA FIABILIDAD DE LOS DIFERENTES  
MÉTODOS DE DISEÑO UTILIZADOS EN LAS  
REDES INTERIORES DE DISTRIBUCIÓN DE  
AGUA EN VIVIENDAS**

Intensificación: **HIDRÁULICA URBANA**

**Autor:**

**RAZIEL YARIB APONTE**

**Tutor:**

**DR. PEDRO L. IGLESIAS REY**

**Cotutores:**

**DR. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO**

**DR. GONZALO LÓPEZ PATIÑO**

**SEPTIEMBRE, 2019**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE DISEÑO UTILIZADOS EN LAS REDES INTERIORES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN VIVIENDAS

**Título del TFM en inglés:** METHODOLOGY FOR THE DETERMINATION OF THE RELIABILITY OF THE DIFFERENT METHODS OF DESIGN USED IN THE INNER NETS OF DISTRIBUTION OF WATER IN HOUSES

**Título del TFM en Valenciano:** METODOLOGIA PER A LA DETERMINACIÓ DE LA FIABILITAT DELS DIFERENTS MÈTODES DE DISSENY UTILITZATS EN LES XARXES INTERIORS DE DISTRIBUCIÓ D'AIGUA EN HABITATGES

**Alumno:** RAZIEL YARIB APONTE

**Tutor:** PEDRO LUIS IGLESIAS REY

**Cotutores:**

FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ SOLANO

GONZALO LÓPEZ PATIÑO

**Fecha de Lectura:** SEPTIEMBRE, 2019

## Resumen

**En español:**

En las viviendas se encuentran diversos aparatos sanitarios para satisfacer las demandas de agua de sus usuarios, pero existe una incógnita interesante: ¿Cuántos aparatos sanitarios se utilizan a la vez en un grupo de viviendas? La respuesta está directamente relacionada con el caudal máximo que circulará a través de la tubería principal de la red de distribución de agua potable del grupo de viviendas. Se encuentran variedades de métodos para realizar los diseños de las redes interiores de distribución de agua potable y se desea conocer que tan fiables resultan para diferentes casuísticas. Esto motiva a desarrollar un modelo de predicción del caudal máximo demandado, que permita mediante simulación, asociar a cada caudal obtenido una cierta probabilidad de no excedencia, con el fin de determinar el comportamiento de los métodos más empleados en la práctica profesional, y compararlos entre sí mediante un parámetro común entre

ellos. Esto permite elegir, de manera crítica, cual método escoger según cada caso de estudio por su fiabilidad.

Se realizan simulaciones para cuatro tipos de viviendas, agrupando hasta 90 viviendas en una misma edificación, dando esto como resultado que el método racional español es el método que presenta valores de fiabilidad más constantes en los escenarios evaluados, y que el método UNE 149201 es el que ofrece mayor fiabilidad para pocas viviendas agrupadas (entre 20 y 30), brindando valores de probabilidad de no excedencia superiores a 95%. Puede apreciarse como la fiabilidad asociada a los diferentes métodos no depende únicamente de éstos, sino también del número y tipo de viviendas. Se discute también acerca del valor mínimo recomendado para el famoso coeficiente de simultaneidad de la norma francesa.

#### **En valenciano:**

En els habitatges es troben diversos aparells sanitaris per a satisfer les demandes d'aigua dels seus usuaris, però existeix una incògnita interessant: Quants aparells sanitaris s'utilitzen alhora en un grup d'habitatges? La resposta està directament relacionada amb el cabal màxim que circularà a través de la canonada principal de la xarxa de distribució d'aigua potable del grup d'habitatges. Es troben varietats de mètodes per a realitzar els dissenys de les xarxes interiors de distribució d'aigua potable i es desitja conèixer que tan fiables resulten per a diferents casuístiques. Això motiva a desenvolupar un model de predicció del cabal màxim demandat, que permetia mitjançant simulació, associar a cada cabal obtingut una certa probabilitat de no excedència, amb la finalitat de determinar el comportament dels mètodes més emprats en la pràctica professional, i comparar-los entre si mitjançant un paràmetre comú entre ells. Això permet triar, de manera crítica, com mètode triar segons cada cas d'estudi per la seua fiabilitat.

Es realitzen simulacions per a quatre tipus d'habitatges, agrupant fins a 90 habitatges en una mateixa edificació, donant això com a resultat que el mètode racional espanyol és el mètode que presenta valors de fiabilitat més constants en els escenaris avaluats, i que el

mètode UNEIX 149201 és el que ofereix major fiabilitat per a pocs habitatges agrupats (entre 20 i 30), brindant valors de probabilitat de no excedència superiors a 95%. Pot apreciar-se com la fiabilitat associada als diferents mètodes no depèn únicament d'aquests, sinó també del número i tipus d'habitatges. Es discuteix també sobre el valor mínim recomanat per al famós coeficient de simultaneïtat de la norma francesa.

**En inglés:**

In the houses there are several sanitary devices to meet the water demands of its users, but there is an interesting question: How many sanitary devices are used at the same time in a group of houses? The answer is directly related to the maximum flow that will circulate through the main pipe of the drinking water distribution network of the housing group. Varieties of methods are found to make the designs of the interior networks for the distribution of drinking water and it is desired to know how reliable they are for different cases. This motivates to develop a prediction model of the maximum flow demanded, which allows by simulation, to associate with each flow obtained a certain probability of non-exceedance, in order to determine the behavior of the methods most used in professional practice, and compare them between yes through a common parameter between them. This makes it possible to critically choose which method to choose according to each case study because of its reliability.

Simulations are carried out for four types of dwellings, grouping up to 90 dwellings in the same building, giving this as a result that the Spanish rational method is the method that presents more constant reliability values in the scenarios evaluated, and that the UNE 149201 method is the which offers greater reliability for few clustered houses (between 20 and 30), providing probability of non-exceedance values greater than 95%. It can be seen how the reliability associated with the different methods depends not only on these, but also on the number and type of housing. The minimum recommended value for the famous simultaneity coefficient of the French standard is also discussed.

**Palabras clave español:** Redes de distribución internas, Caudal punta, Método de Montecarlo.

**Palabras clave valenciano:** Xarxes de distribució internes, Cabal punta, Mètode de Montecarlo.

**Palabras clave inglés:** Internal distribution networks, Peak flow, Montecarlo method.

## Índice de contenidos

1	Introducción .....	13
	Objetivos.....	14
2	Estado del arte.....	15
2.1	Método de Hunter .....	17
2.2	Método del coeficiente de simultaneidad (Norma Francesa).....	20
2.3	Método Racional Español .....	23
2.4	Método UNE 149201 .....	25
2.5	Modelo de uso último.....	29
3	Metodología .....	33
3.1	Modelo estocástico.....	33
3.2	Parámetros de entrada del modelo.....	34
3.2.1	Intensidad .....	34
3.2.2	Frecuencia.....	35
3.2.3	Duración .....	38
3.2.4	Patrones de comportamiento diario de los usuarios .....	39
3.3	Modelo de simulación desarrollado .....	41
4	Casos de estudio .....	47
5	Resultados .....	49
5.1	Gráficas de fiabilidad de los métodos evaluados .....	55
5.1.1	Resultados de grupos de viviendas tipo B.....	55

5.1.2	Resultados de grupos de viviendas tipo C.....	57
5.1.3	Resultados de grupos de viviendas tipo D.....	59
5.1.4	Resultados de grupos de viviendas tipo E.....	61
5.2	Factor de simultaneidad del método francés.....	63
6	Conclusiones.....	65
7	Referencias bibliográficas.....	69

## Índice de figuras

Figura 1. Caudal máximo probable según Hunter. Fuente: Robayo (1998). .....	18
Figura 2. Coeficiente de simultaneidad $k_0$ (método de Hunter). .....	19
Figura 3. Coeficientes de simultaneidad $k_1$ ; $k_{1,2}$ ; y $k_{1,3}$ (método francés). .....	22
Figura 4. Coeficiente de simultaneidad global $k_2$ (método racional). .....	25
Figura 5. Caudal instantáneo vs caudal punta según expresiones de la UNE 149201. ....	27
Figura 6. Coeficiente de simultaneidad estimado (método UNE 149201). .....	28
Figura 7. Flujograma característico de los procedimientos típicos en simulaciones con Montecarlo. ....	31
Figura 8. Función de distribución de probabilidad de Poisson para un lavabo. ....	36
Figura 9. Diagrama de flujo del modelo de predicción del caudal máximo demandado. ...	42
Figura 10. Resultados de demandadas para grupos de viviendas tipo B (para probabilidades de 90, 95 y 99%). .....	49
Figura 11. Resultados de demandadas para grupos de viviendas tipo C (para probabilidades de 90, 95 y 99%). .....	50
Figura 12. Resultados de demandadas para grupos de viviendas tipo D (para probabilidades de 90, 95 y 99%). .....	50
Figura 13. Resultados de demandadas para grupos de viviendas tipo E (para probabilidades de 90, 95 y 99%). .....	51
Figura 14. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo B. .....	55
Figura 15. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo C. .....	57

Figura 16. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo D.  
..... 59

Figura 17. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo E.  
..... 61

## Índice de tablas

Tabla 1. Unidades para distintos aparatos sanitarios. Fuente: Robayo (1998). .....	18
Tabla 2. Tipificación de las viviendas según la NIA.....	24
Tabla 3. Caudal instantáneo mínimo para cada tipo de aparato. Fuente: Ministerio de Fomento (2017).....	34
Tabla 4. Frecuencia para cada tipo de aparato. Fuente: Blokker (2010). .....	37
Tabla 5. Duración para cada tipo de aparato. Fuente: Blokker (2010). .....	39
Tabla 6. Patrones de comportamiento de los usuarios. Fuente: Blokker (2010).....	40
Tabla 7. Datos de los eventos de uso para el ejemplo de simulación.....	45
Tabla 8. Coeficientes de simultaneidad y caudales para una vivienda de cada tipología estudiada .....	47
Tabla 9. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo B). .....	52
Tabla 10. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo C). .....	52
Tabla 11. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo D). .....	53
Tabla 12. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo E).....	53
Tabla 13. Valores mínimos de $k_1$ recomendados para grupos de viviendas tipo B y C.....	63
Tabla 14. Valores mínimos de $k_1$ recomendados para grupos de viviendas tipo D. ....	64
Tabla 15. Valores mínimos de $k_1$ recomendados para grupos de viviendas tipo E.....	64



## 1 Introducción

Las metodologías de diseño tradicionalmente empleadas para dimensionar las redes de distribución interna (en adelante RDI) están basadas en la aplicación de códigos, normativas o expresiones más o menos comunes en la práctica profesional. De hecho, es frecuente que en un mismo país coexistan diversos métodos para el dimensionado de las RDI, lo que suele generar incertidumbre a los diseñadores. Por este motivo en este trabajo se plantea desarrollar una metodología que permita establecer la fiabilidad de cada uno de los métodos de diseño de RDI existentes.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es el caso de España, donde la normativa de cumplimiento obligatorio (en las nuevas construcciones) que se tiene es el Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2017), que se compone de una serie de normativas, que se dividen a su vez en dos categorías (Documentos Básicos de Seguridad y Documentos Básicos de Habitabilidad), donde la parte que corresponde al agua potable es el DB-HS (Documento Básico de Salubridad), específicamente la sección 4, que se titula: “Suministro de agua”. En el DB-HS4 se proporciona una tabla con los caudales instantáneos mínimos de cada aparato sanitario, así como otra tabla con los diámetros nominales de las tuberías según el caudal máximo simultáneo que se requiere trasegar a través de las mismas, pero no se muestra de manera explícita como obtener dicho caudal simultáneo. La sección que hace referencia al caudal simultáneo dicta realizar el “establecimiento de los coeficientes de simultaneidad de cada tramo de acuerdo con un criterio adecuado”, con lo cual queda entendido que se da libertad al proyectista a la hora de seleccionar el método de diseño a utilizar, y por tanto es su responsabilidad profesional escoger ese “criterio adecuado”.

Uno de los primeros métodos de caracterización del patrón de comportamiento de los consumos que se presentan en las RDI es el definido por Buchberger (1996), quien establece que cada consumo queda representado mediante tres parámetros: intensidad, duración y

frecuencia (IDF). Posteriormente, Blokker (2010) desarrolla un modelo para predecir las demandas instantáneas de agua de un conjunto de viviendas basándose en la determinación de los parámetros IDF definidos por Buchberger, algunos datos de censos de población y en la aplicación de un modelo estadístico no determinista.

En este trabajo se desarrolla un modelo de predicción del caudal máximo simultáneo de una vivienda o un grupo de viviendas, en base a la utilización de datos estadísticos de los usuarios y de los aparatos sanitarios instalados; este caudal estará siempre asociado a una probabilidad de ocurrencia (también llamada probabilidad de no excedencia). La meta final es poder definir el nivel de fiabilidad de las distintas metodologías de diseño de RDI más empleadas en la vida profesional, en función de la probabilidad de éxito que brinda cada método, para distintos casos de estudio. Ello permitirá comparar los métodos entre sí con un mismo parámetro de medida, algo que hasta ahora no era posible.

## Objetivos

Este trabajo presenta una metodología para establecer la fiabilidad al estimar el caudal punta (llamado también caudal máximo de demanda) con los diferentes métodos de diseño utilizados en redes interiores de distribución de agua potable en viviendas. Este objetivo se concreta con los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de un modelo estadístico que simule el uso de los aparatos sanitarios dentro de vivienda.
- Obtención de los parámetros de entrada del modelo estadístico desarrollado (Intensidad, duración, frecuencia, horarios de usos y demás).
- Selección de los tipos y cantidades de viviendas a evaluar.
- Simulación de cada escenario de estudio utilizando modelo estadístico desarrollado.
- Obtención de la fiabilidad para cada método de diseño escogido.
- Comparación de los resultados de los diferentes métodos en los distintos escenarios analizados.

## 2 Estado del arte

El agua es una necesidad humana básica, ya que un ser humano sin acceso al agua potable no puede mantenerse saludable. Una persona debe tomar al menos 3 litros de agua al día, para recuperar los fluidos que el cuerpo pierde en condiciones normales, y esto en un clima templado (Moreno, 2008). Las necesidades de agua en las personas no se limitan solamente a la ingestión de la misma, sino también a las actividades cotidianas como preparar alimentos, lavarse los dientes, tomar un baño, lavar los platos, la ropa y demás.

El agua potable llega normalmente de las redes de los acueductos hasta las viviendas, en donde se conecta a través de una acometida domiciliaria, desde donde normalmente se distribuye a los distintos aparatos sanitarios (inodoros, lavabos, duchas, fregaderos, etc.) que finalmente brindan los servicios requeridos a los usuarios (sean residentes o visitantes). La red hidráulica que va desde la acometida hasta cada uno de los aparatos sanitarios (incluyendo aquí todos los aparatos que utilizan agua potable, como la lavadora y el lavavajillas) es la llamada red de distribución interna (RDI).

El mayor problema a la hora de dimensionar hidráulicamente la RDI es conocer el caudal que circulará a través de cada tramo de tubería, ya que ello representa un problema más estadístico que hidráulico. El caudal depende entre otras cosas del usuario, que puede tener hábitos diferentes según sus condiciones de vida, su cultura, el precio del agua, etc. Un ejemplo claro de ello es el volumen de agua que utiliza una persona para bañarse, que en un país desarrollado es de 70 litros (en promedio), y en un país en pobreza una persona puede llegar a usar menos de 5 litros para ejecutar la misma tarea (Gleick, 1996).

Un factor importante en la variación del caudal es el modelo de aparato que se tenga, por ejemplo, en duchas de modelos distintos, se emiten caudales distintos para el mismo grado de apertura de su válvula. A su vez una misma ducha de un modelo determinado emite un caudal diferente según sea la presión en la salida de la misma. Por ello al tener el mismo grado de apertura en dos duchas del mismo modelo, en una misma edificación, cuya

alimentación viene directa de la red de acueducto, se tienen caudales distintos en el primer piso y en un piso más alto. Lo más importante a denotar aquí es que, según los datos arrojados en investigaciones realizadas por López (2016), cada usuario ajusta la válvula de la ducha para obtener el caudal que le brinda mayor confort.

Es de suma importancia estimar las demandas en las RDI de manera cercana a la realidad, ya que con el caudal máximo que se estima circula a través de la tubería, se dimensiona la misma. Indica Acero (2008) que un dimensionamiento inadecuado podría provocar estallidos de tuberías, daños en los aparatos sanitarios por sobrepresiones, deterioros rápidos en los equipos de bombeo, mal funcionamiento de los sistemas de calentamiento de agua, entre otros problemas.

Una forma de conocer el caudal demandado en una RDI de una edificación suele ser mediante la realización de una auditoría de consumo de agua, que consiste en medir, para cada aparato sanitario de la edificación, el caudal suministrado, la frecuencia de utilización del mismo, y la duración de aquellos usos. Este método implica instalar equipos de medición durante un tiempo determinado que registren estos datos, y luego procesarlos para obtener la información que se necesite. Es de importancia mencionar que este método es largo y costoso a la hora de su aplicación (López, 2016).

Según Robayo (1998) se trataron de determinar con mediciones directas los caudales máximos en edificios multifamiliares en Estados Unidos, Inglaterra y Japón; brindando resultados de frecuencia y duración de los usos (de los aparatos) distintos, provocando (en esa ocasión) no poder generalizar en cuanto a caudales se refiere. Estudios realizados en Colombia por Ladino et. al (2006) y Garzón (2014), midieron los caudales máximos en usuarios residenciales de Bogotá y los compararon con los resultados de aplicar los métodos más comunes de diseño de RDI, obteniendo como resultado que los caudales máximos medidos eran inferiores a los calculados empleando los métodos de diseño tradicionales.

En las RDI se han empleado históricamente métodos para estimar las demandas, los cuales se basan en experiencias y en aplicaciones de análisis probabilísticos realizados a datos tomados en campo. Una de las maneras más simples de enfocar este problema, consiste en intentar estimar el número de aparatos sanitarios que se encuentran funcionando en el instante de máxima demanda, conociendo este dato podemos entonces calcular el caudal de máxima demanda en función de dichos aparatos y sus consumos unitarios, en ello se basó Hunter.

## 2.1 Método de Hunter

Roy B. Hunter presentó un método a la National Bureau of Standards de los Estados Unidos de Norteamérica, el cual consiste en considerar que solamente unos pocos aparatos sanitarios de los conectados a la red entran en funcionamiento de manera simultánea en un determinado instante. Según Hunter (1940) el dimensionamiento es satisfactorio cuando se puede suministrar la demanda para  $m$  del total de  $n$  aparatos del edificio, de modo que no más de  $m$  serán encontrados en uso simultáneo por más del 1% del tiempo. Ello implica diseñar para una probabilidad de éxito de 99%, o lo que es lo mismo para una probabilidad de excedencia del caudal de diseño de un 1%. Esta forma de diseñar tomando dicho 1% fue escogido por Hunter al principio de forma arbitraria, sin embargo, sigue utilizándose hoy día con mucho éxito.

Hunter seleccionó parámetros para los aparatos sanitarios utilizados en esa época, aplicó la teoría de probabilidades a un sistema compuesto por aparatos de un mismo tipo, y por último adaptó el método para aplicarse a sistemas con diversos tipos de aparatos. Para aplicar el método a sistemas con diversidad de aparatos, Hunter parametrizó los aparatos respecto a uno (la válvula de fluxómetro), de modo que el número que identifica un aparato (llamado número de unidades, unidades de gasto, etc.) es una relación del número de válvulas de fluxómetro que producen el caudal de dicho aparato.

Hunter creó tablas que relacionan cada tipo de aparato con el número de unidades que le corresponde, en la tabla 1 se muestran los aparatos de interés en este trabajo, con sus respectivas unidades asignadas.

Tabla 1. Unidades para distintos aparatos sanitarios. Fuente: Robayo (1998).

Unidades para diferentes aparatos	
Aparato	Unidades
Inodoro (cisterna)	3
Lavabo	1
Ducha	2
Lavadora	3
Lavaplatos	2

De igual manera Hunter representa gráficamente las relaciones del número de unidades con el caudal máximo probable, también llamado caudal de diseño, ello se muestra en la figura 1.

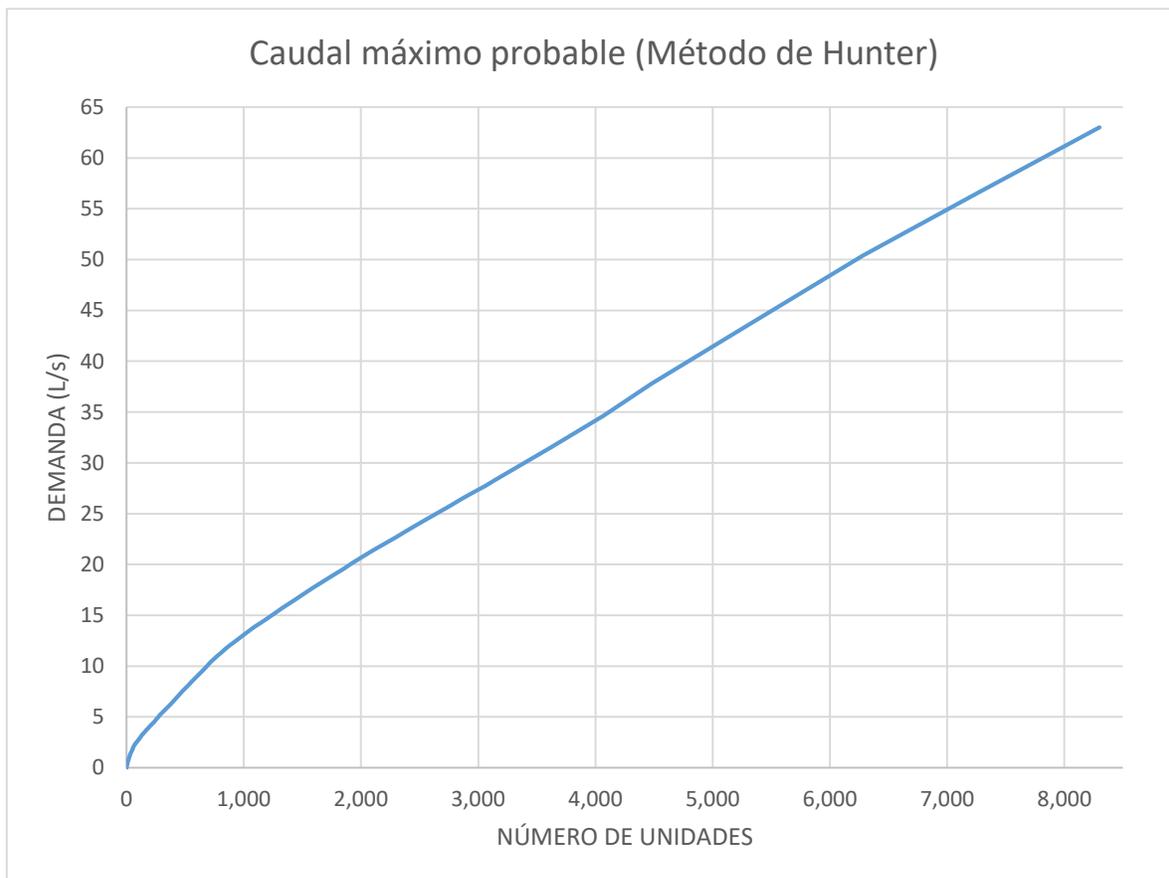


Figura 1. Caudal máximo probable según Hunter. Fuente: Robayo (1998).

Se puede estimar un coeficiente que represente la relación entre el caudal máximo probable (caudal punta) y el caudal instantáneo en un tramo estudiado de una red, se plantea el cálculo de dicho parámetro para tener algún margen de comparación entre los distintos métodos de diseño. Dicho parámetro se conoce comúnmente como factor de simultaneidad, ya que representa de manera directa el porcentaje de uso en un momento determinado de la capacidad total de la red, de manera genérica los métodos persiguen acercarse a la realidad, y brindar ese factor para el momento de máximo consumo. En la figura 2 se representa gráficamente este factor de simultaneidad, denominado  $k_0$ .

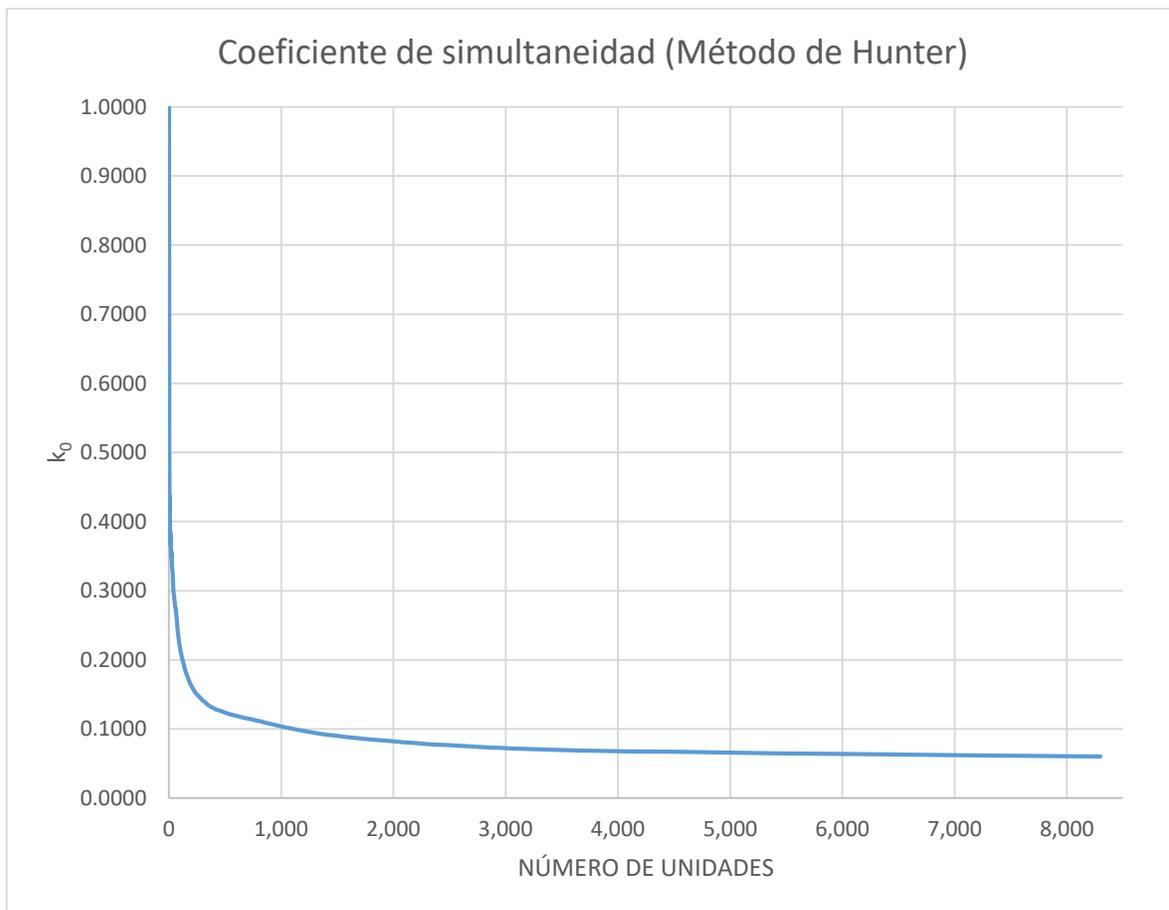


Figura 2. Coeficiente de simultaneidad  $k_0$  (método de Hunter).

## 2.2 Método del coeficiente de simultaneidad (Norma Francesa)

Llamado también método del factor de simultaneidad, se basa en calcular un coeficiente de simultaneidad ( $k_1$ ), el cual se multiplica por el caudal instantáneo (caudal máximo emitido por los aparatos), obteniéndose así el caudal punta (AFNOR, 1988). Este coeficiente de simultaneidad depende del número de aparatos conectados al tramo en cuestión, y recomiendan diversos autores utilizar un valor mínimo de 0.20 (Carmona, 2015); aunque ello es revisable. Para calcular el coeficiente de simultaneidad, normalmente se emplea la siguiente expresión:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \quad (1)$$

donde:

- $k_1$  es el coeficiente de simultaneidad.
- $n$  es el número de aparatos abastecidos.

Finalmente, el caudal punta se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_p = k_1 \sum_{i=1}^n q_i * n_i \quad (2)$$

donde:

- $Q_p$  es el caudal punta (también llamado caudal máximo probable, caudal simultáneo y caudal de diseño).
- $q_i$  es el caudal unitario del aparato tipo  $i$ .
- $n_i$  es el número de aparatos del tipo  $i$ .

El primer registro hallado de este método data de 1988 (AFNOR, 1988), en el *Documento Técnico Unificado sobre redes de agua inmobiliaria*, DTU 60.11 de Francia, donde se presenta la llamada “hipótesis de simultaneidad para el cálculo de demandas de

alimentación para partes colectivas”, que establece un coeficiente de simultaneidad calculado con la expresión:

$$k_{1,2} = \frac{0.8}{\sqrt{n-1}} \quad (3)$$

Esta expresión se recomendaba aplicar a partir de 5 aparatos, aunque posteriormente se modificó, surgiendo distintas expresiones a lo largo de los años, hasta llegar a las que se utilizan hoy día. Otra expresión, variante de la ecuación 1 que se emplea ampliamente en la práctica profesional para el cálculo del coeficiente de simultaneidad es la siguiente:

$$k_{1,3} = a + \frac{1-a}{\sqrt{n-1}} \quad (4)$$

donde:

- $a$  es un valor que suele oscilar entre 0.1 y 0.2 según criterio del profesional.

La ecuación 4 es muy empleada en la práctica profesional, para tener con una sola expresión el valor del coeficiente de simultaneidad truncado a un valor mínimo de forma automática, esta se emplea sobre todo en hojas de cálculo. Se denominará en lo adelante  $k_{1,3}$  si el valor de  $a$  es 0.1 y  $k_{1,4}$  si el valor de  $a$  es 0.2; se podrían emplear valores de  $a$  distintos a los seleccionados.

El punto débil aparente de este método es no considerar que el caudal de cada tipo de aparato sanitario es distinto al de los demás tipos (por ejemplo, según Hunter una ducha consume el doble de caudal que un lavabo), a la hora de calcular el coeficiente de simultaneidad. Se representan gráficamente las tres expresiones presentadas para el cálculo del coeficiente de simultaneidad según el método francés en la figura 3.

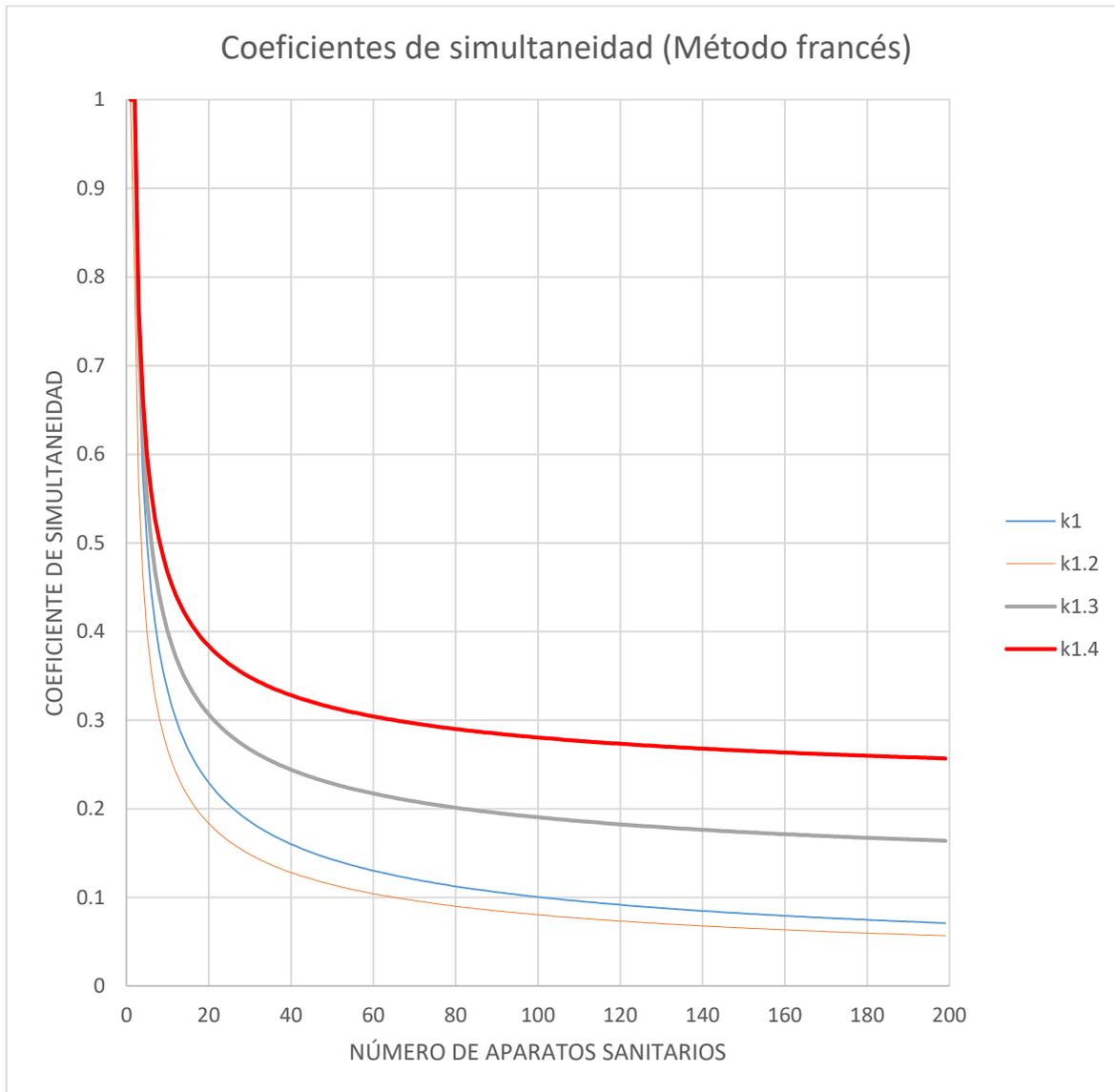


Figura 3. Coeficientes de simultaneidad  $k_1$ ;  $k_{1,2}$ ; y  $k_{1,3}$  (método francés).

Es de importancia mencionar algo que resulta evidente, y es que no se pueden comparar directamente los gráficos de los coeficientes de simultaneidad del método de Hunter con los del método francés, debido a que en el eje de las abscisas los parámetros son distintos. La razón anterior da más motivos a buscar alguna metodología de comparación, en donde puedan compararse de manera directa los métodos, y llegar a conclusiones numéricas evidentes. Otra observación importante es que, en lo adelante al hacer referencia a la norma francesa se utiliza la ecuación 1 para el cálculo del coeficiente de simultaneidad.

### 2.3 Método Racional Español

Es una modificación del método francés, donde se contabilizan los aparatos de cada vivienda, y se obtiene el caudal punta para una vivienda aplicando el factor  $k_1$  visto anteriormente. Luego de ello se calcula un coeficiente de simultaneidad para las viviendas llamado  $k_{2,nR}$  (Roca & Carratalá, 2002), el cual toma en cuenta que la probabilidad de que todas las viviendas utilicen el caudal punta (de ellas) a la vez es menor que 1. La expresión para calcular el coeficiente de simultaneidad de viviendas es:

$$k_{2,nR} = \frac{n_R + 19}{10 * (n_R + 1)} \quad (5)$$

donde:

- $k_{2,nR}$  es el coeficiente de simultaneidad de viviendas.
- $n_R$  es el número de viviendas equivalentes.

Luego de calcular ambos coeficientes de simultaneidad, se calcula un coeficiente de simultaneidad global:

$$k_2 = k_1 * k_{2,nR} \quad (6)$$

donde:

- $k_2$  es el coeficiente de simultaneidad global del método racional español.

Se calcula entonces el caudal punta con la expresión:

$$Q_p = k_2 \sum_{i=1}^n q_i * n_i \quad (7)$$

A pesar de realizar una revisión bibliográfica extensa no se ha podido encontrar el origen del método racional español, pero es innegable que es uno de los métodos más empleados en España, y uno de los más conocidos en América.

Para representar gráficamente el coeficiente de simultaneidad global del método racional español, necesitarían tenerse unas tipologías de viviendas, de manera que se coloque en el eje de las abscisas una cierta cantidad de viviendas tipo, y en las ordenadas el coeficiente referido. Para lograr esto se emplean las tipologías de viviendas de la normativa NIA (Ministerio de Industria, 1975), que son las llamadas “Normas Básicas para las instalaciones interiores de suministro de agua” (ya sustituida por el mencionado DB-HS4 del CTE).

La NIA clasificaba los suministros de agua en cinco tipos, que van desde el tipo A hasta el E. Los del tipo A representan locales sin cuarto de baño, refiriéndose a locales comerciales pequeños, los cuales por la naturaleza de este trabajo (de estudiar casos enfocados en viviendas) no se evalúan. Los del tipo B representan viviendas con un solo cuarto de baño, el tipo C representa viviendas más amplias y así sucesivamente hasta llegar al tipo E, que representa las viviendas con más aparatos sanitarios de grupos multifamiliares (Tabla 2).

*Tabla 2. Tipificación de las viviendas según la NIA.*

Vivienda	Aparatos sanitarios
Tipo B	1 cuarto de baño, 1 lavadora y 1 fregadero.
Tipo C	1 cuarto de baño, 1 cuarto de aseo, 1 fregadero, 1 lavadora y 1 lavadero.
Tipo D	2 cuartos de baño, 1 lavadero, 1 lavadora, 2 fregaderos (uno es lavavajillas).
Tipo E	2 cuartos de baño, 1 cuarto de aseo, 1 lavadero, 1 lavadora, 2 fregaderos (uno es lavavajillas).

En la tabla 2 al referirse a un cuarto de baño, se incluyen: lavabo, inodoro y ducha; mientras que al hablar del cuarto de aseo sólo se incluyen lavabo e inodoro. Parametrizadas las viviendas de interés, se puede entonces obtener una gráfica donde se relacionen la cantidad de viviendas con el coeficiente de simultaneidad global del método racional, ello se presenta en la figura 4.

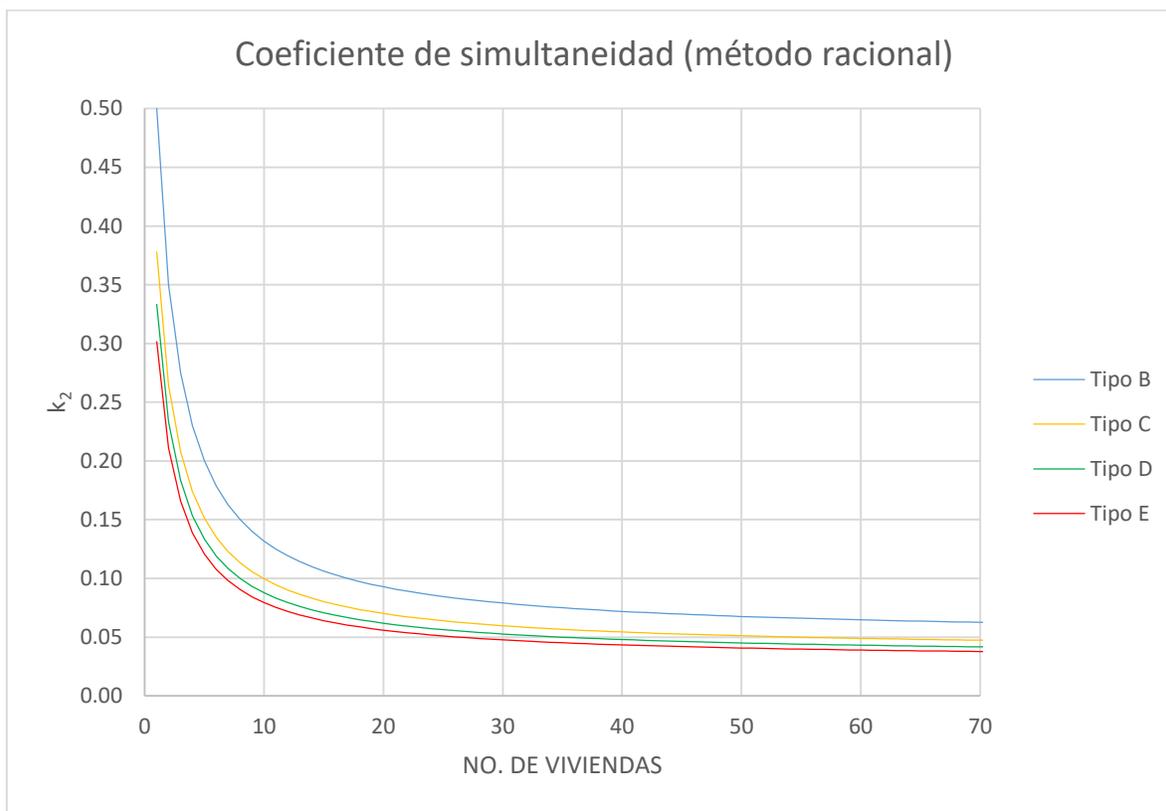


Figura 4. Coeficiente de simultaneidad global  $k_2$  (método racional).

Esta representación gráfica muestra comportamientos similares para el factor de simultaneidad global, con gran decrecimiento para pocas viviendas y asíntotas horizontales para grupos de viviendas más significativos. Dado que el comportamiento de la gráfica luego de 70 viviendas es asíntótico, no se representa para valores mayores en la abscisa.

## 2.4 Método UNE 149201

La norma española de abastecimiento de agua (AENOR, 2008), específicamente la parte titulada: “Dimensionado de instalaciones de agua para consumo humano dentro de los edificios”, publicada en febrero de 2008, presenta unas expresiones para calcular el caudal simultáneo ( $Q_p$ ) en viviendas, partiendo de conocer el caudal instantáneo (suma de los caudales unitarios de los aparatos aguas abajo). Esta norma tiene también expresiones para hallar el caudal simultáneo para oficinas, estaciones, aeropuertos, hoteles, discotecas, museos y centros comerciales. Es importante mencionar que las siglas UNE (Una Norma

Española) representan un conjunto de normas creadas en los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), estas normas son por definición de cumplimiento voluntario en España.

Para edificios de viviendas se tiene que:

Si  $Q_i > 20$  L/s se emplea la expresión:

$$Q_p = 1.7 * Q_i^{0.21} - 0.7 \quad (8)$$

Si  $Q_i \leq 20$  L/s entonces la expresión depende de los caudales instantáneos mínimos ( $Q_{min}$ ):

Si todo  $Q_{min} < 0.5$  L/s se emplea:

$$Q_p = 0.682 * Q_i^{0.45} - 0.14 \quad (9)$$

Si algún  $Q_{min} \geq 0.5$  L/s se emplea la ecuación 8, siempre que  $Q_i > 1$  L/s.

En caso que:  $Q_i \leq 1$  L/s no se aplica simultaneidad (resultando  $Q_p=Q_i$ ).

donde:

- $Q_i$  es el caudal instantáneo del tramo.
- $Q_{min}$  es el caudal instantáneo unitario (caudal promedio a la salida de cada aparato sanitario).

Es importante aclarar que el caudal instantáneo unitario utilizado en este trabajo es siempre menor a 0.5 L/s, ya que se trabaja con viviendas, y los aparatos utilizados no tienen fluxores. Para comprender mejor el comportamiento del caudal punta al cambiar de expresión de la UNE cuando se llega al valor de 0.20 L/s del caudal instantáneo, se representan gráficamente valores de caudal instantáneo en las abscisas y sus valores correspondientes del caudal punta en las ordenadas, se muestra el resultado en la figura 5.

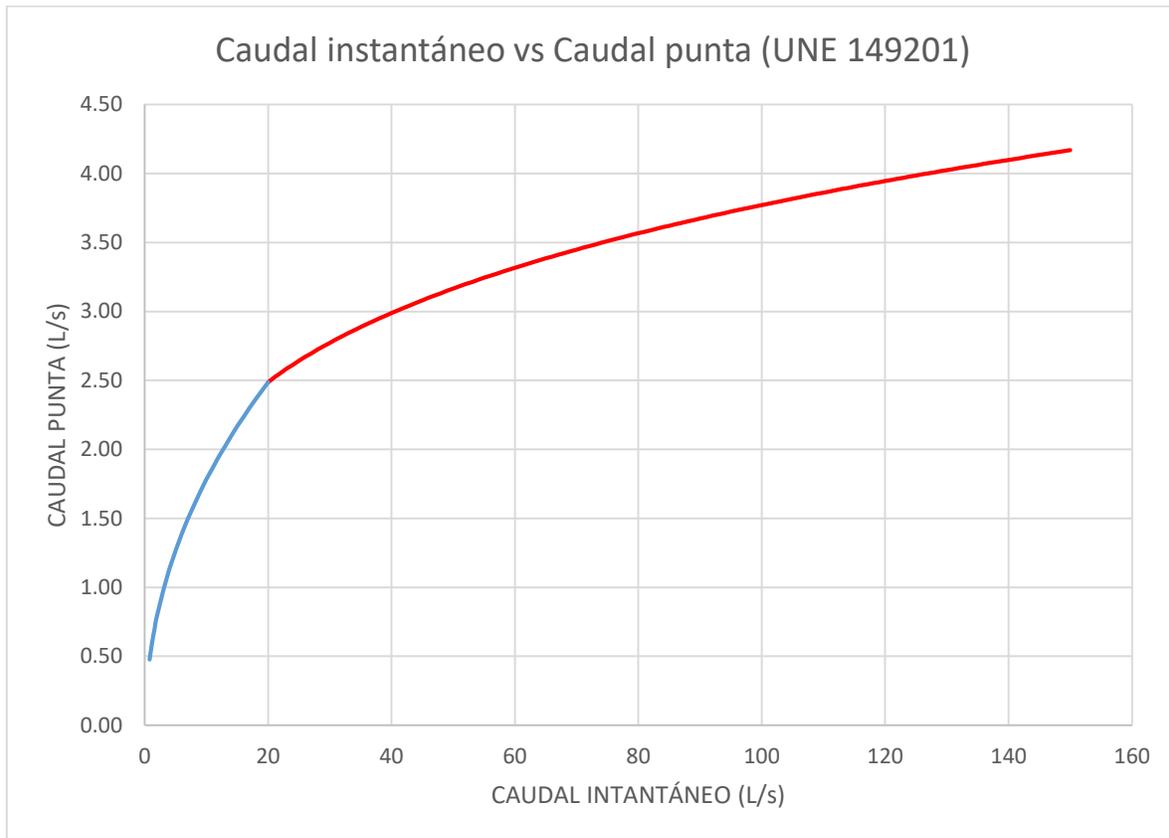


Figura 5. Caudal instantáneo vs caudal punta según expresiones de la UNE 149201.

De la figura 5 se puede concluir que el ritmo de crecimiento del caudal punta disminuye al llegar al valor de 0.20 L/s del caudal instantáneo, esto producto del cambio en la expresión utilizada para su cálculo. Se estima un coeficiente de simultaneidad para el método de la normativa UNE, este se expresa como:

$$k_3 = \frac{Q_p}{Q_i} \quad (10)$$

donde:

- $k_3$  es el coeficiente de simultaneidad global del método UNE 149201.

El principal inconveniente que se tiene al representar gráficamente el coeficiente  $k_3$  es estimar algún parámetro para colocarlo en las abscisas, ya que no tendría mucho sentido colocar caudales allí. Finalmente se realiza una estimación del número de viviendas de

tipo D que se tendrían para cada caudal instalado, y de esa forma se representa esto en las abscisas. De esta manera se logra en la figura 6 presentar el comportamiento del coeficiente de simultaneidad asociado al método de la normativa UNE 149201.

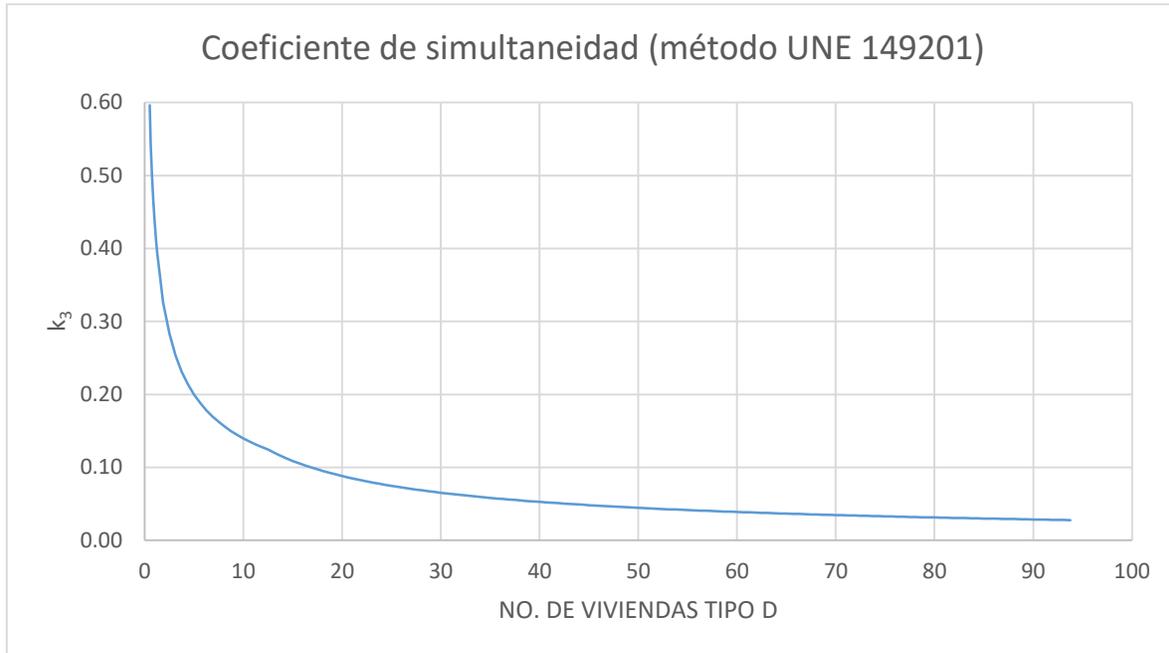


Figura 6. Coeficiente de simultaneidad estimado (método UNE 149201).

De forma análoga como se ha representado en esta gráfica el coeficiente  $k_3$  podría presentarse para los demás tipos de viviendas, pero el comportamiento es similar y no aporta nada nuevo en relación a comparar este método con los demás. Esto porque los parámetros de las abscisas aquí empleados seguirían resultando incomparables con las cantidades de aparatos que se presentaron en el método francés, y con los números de unidades que se presentaron en el método de Hunter.

## 2.5 Modelo de uso último

Uno de los métodos más conocidos para la caracterización del patrón de comportamiento de los consumos que se presentan en las redes de distribución es el modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson, definido por Buchberger (1996), quien establece que cada consumo queda representado mediante tres parámetros: intensidad, duración y frecuencia (IDF). El objetivo perseguido por este método es caracterizar los consumos de agua de una vivienda, con el fin de mejorar las estimaciones de demanda en las redes de distribución de los acueductos.

Por otro lado, Blokker (2010) desarrolla el modelo de uso último, que estima mediante simulación los caudales en las RDI partiendo del uso último dado al agua, es decir, del comportamiento del aparato sanitario que funciona con esa agua. El objetivo de este modelo es predecir las demandas instantáneas de agua (en escalas de tiempo muy pequeñas) de un conjunto de viviendas basándose en la determinación de los parámetros estadísticos (IDF) definidos por Buchberger, algunos datos levantados en censos de población, y en la aplicación de un modelo estadístico empleando el método de Montecarlo.

Para lograr su objetivo, Blokker asigna a cada uno de los tres parámetros (IDF) una función de distribución de probabilidad (una para cada tipo de aparato sanitario empleado), obtenidas con mediciones realizadas en Holanda. Estas mediciones no dependen significativamente de la ubicación geográfica del sistema, por tanto, pueden ser utilizadas para diferentes zonas, obteniéndose resultados válidos. Los resultados de la aplicación del modelo de uso último se contrastaron con mediciones reales tomadas en viviendas y se obtuvieron resultados satisfactorios.

Para calcular valores de demanda con el modelo de uso último se necesitan datos de escenarios muy específicos, aunque podrían obtenerse valores de caudales empleando el modelo de uso último, estos ya estarían asociados a probabilidades de éxito (algo que los otros métodos expuestos no tienen de manera explícita). Por esa razón no se puede

explicitar el coeficiente de simultaneidad para este método como se ha hecho con los anteriores. Por otra parte, siempre que se ejecuta el cálculo por algún método, luego puede estimarse un coeficiente de simultaneidad con una ecuación análoga a la 10. Esto no quiere decir que se pueda siempre comparar estos coeficientes de simultaneidad, ya que, para hacerlos comparables entre ellos, deberían calcularse con el mismo parámetro, ya sea número de aparatos, número de viviendas, o número de unidades.

La simulación consiste en imitar las características y el comportamiento de un sistema real, con el fin de predecir comportamientos de eventos que ocurren al presentarse determinados escenarios, sin tener que sufrir sus consecuencias en la vida real. Simular permite obtener soluciones aproximadas a problemas que pueden tornarse muy complicados para buscar soluciones analíticas. En la mayoría de los casos las simulaciones requieren el uso de ordenadores, de hecho, hasta la aparición de los ordenadores las simulaciones no se aplicaban de manera satisfactoria (Rodríguez, 2011).

El método de Montecarlo hace posible la solución de problemas matemáticos utilizando la simulación de variables aleatorias. El método data de la década de 1940 (Rodríguez, 2011), cuando John Von Neumann lo aplica como herramienta de investigación en estudios de reacción nuclear (para el desarrollo de la bomba atómica). Posteriormente se empieza a utilizar con mayor frecuencia, por la rápida evolución de los ordenadores, especialmente para resolver problemas complejos cuya solución analítica no es posible.

El método de Montecarlo consiste en bombardear el problema asumiendo unas funciones de distribución para los parámetros de entrada y posteriormente generando números aleatorios que asignan valores a dichas entradas, el proceso se repite una gran cantidad de veces. En cada simulación interviene el azar, por tanto, cada una de ellas es única. Por estar tan relacionado con el azar, el método lleva el nombre de uno de los casinos más famosos del mundo, el Casino de Montecarlo (Mónaco), haciendo una especie de homenaje a la ruleta. Como es por muchos conocido la ruleta es uno de los aparatos mecánicos más sencillos que genera números aleatorios.

El método de Montecarlo se utiliza para diversas aplicaciones, entre ellas realizar el cálculo de integrales, aproximando el área de superficies acotadas por funciones matemáticas, cuya solución analítica es compleja (Peña, 2001). Además, se utiliza también para: optimización de recursos hídricos (Vázquez, 2010), hidrología subterránea (Bereciartua, 2003), hidráulica urbana (Lacasta et al., 2015), geología (Pardo & Rodríguez, 2013), geofísica (Sánchez, 2018), entre muchas otras aplicaciones más. Cuando se trata de realizar simulaciones utilizando el método de Montecarlo, el procedimiento general a seguir es el presentado en la figura 7.

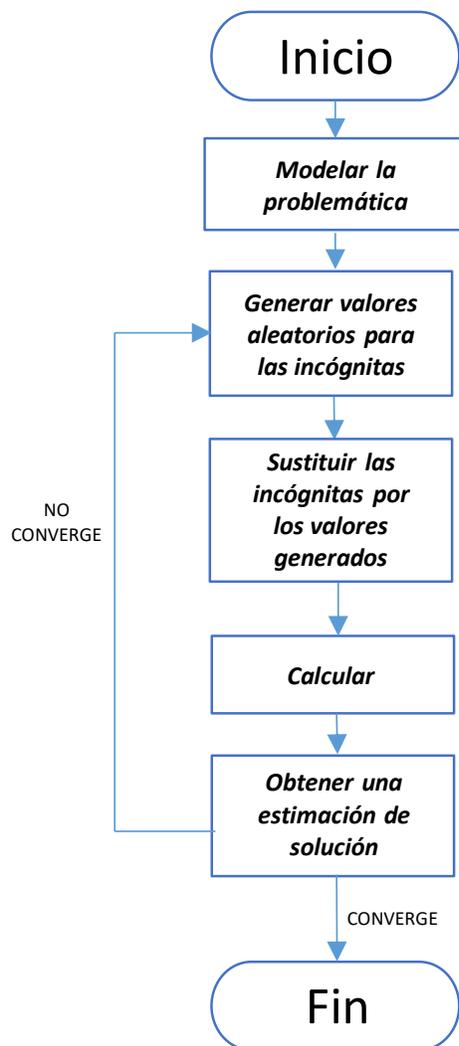


Figura 7. Flujograma característico de los procedimientos típicos en simulaciones con Montecarlo.

Se inicia con obtener o elaborar un modelo de la problemática tratada, que se ajuste en lo máximo posible al fenómeno real, pero sin tener demasiadas variables, de modo que se evite que el modelo se haga inviable. Posteriormente se generan valores aleatorios para asignárselos a cada una de las incógnitas que forman parte del problema. Luego de tener los valores de las incógnitas se procede a sustituir las mismas por los valores generados para calcular el resultado, este proceso se repite el número de veces que sea necesario hasta llegar a una convergencia deseada, mientras no se llega a dicha convergencia se continúa ejecutando el bucle, es decir, se continúan realizando simulaciones. Finalmente se obtiene una estimación para la solución de la problemática.

En resumen, los métodos de diseño de RDI presentados tienen una cierta simultaneidad asociada, esto queda en evidencia al calcular y representar gráficamente sus respectivos coeficientes de simultaneidad (figuras 2, 3, 4 y 6). Lo que si es cierto es que no tenemos un parámetro homogéneo para compararlos entre sí, ello da mucha intriga a la hora de utilizar uno u otro método. Precisamente para poder realizar análisis comparativos de los distintos métodos, es interesante conocerlos en función de sus probabilidades de no excedencia según cada caso, y de esta manera llegar a establecer una cierta fiabilidad para cada caso.

### 3 Metodología

Se desea obtener, para distintos escenarios, la fiabilidad que brinda la aplicación de los principales métodos de diseño de RDI al estimar las demandas de caudales. Los caudales de diseño obtenidos por dichos métodos, finalmente se asocian a una probabilidad de no excedencia.

Para llegar a este resultado se emplea un modelo estocástico, el cual toma como entrada los datos del escenario a evaluar (tales como tipos y cantidades de aparatos sanitarios), los parámetros de intensidad, duración y frecuencia; así como una cierta probabilidad de ocurrencia asociada. Tras esto se realizan unas simulaciones del uso de los aparatos sanitarios y se obtiene como resultado un caudal de demanda para dicho escenario y dicha probabilidad. Posteriormente se realizan cuantas simulaciones sean necesarias, con el objetivo de tener datos discretos de caudal y probabilidad, suficientes para calcular las probabilidades de éxito de las demandas obtenidas por cada método de diseño de RDI.

#### 3.1 Modelo estocástico

El método desarrollado toma como punto de partida el modelo de uso último, que determina el caudal máximo simultáneo de consumo de una vivienda o grupo de viviendas, en base a los aparatos instalados y una serie de datos estadísticos de los usuarios. Los datos principales para modelación del fenómeno son intensidad, duración y frecuencia.

El modelo es de naturaleza estocástica debido a que cada simulación del mismo puede arrojar un resultado distinto, ya que se trabaja con variables aleatorias. Por ello se utiliza un método de Montecarlo, donde se realizan gran cantidad de simulaciones, de manera que los resultados finales obtenidos sean representativos.

## 3.2 Parámetros de entrada del modelo

### 3.2.1 Intensidad

Se refiere al caudal trasegado al entrar en servicio un aparato sanitario, por tanto, depende de la marca y modelo del aparato que se utilice (por ejemplo, en una ducha depende del tipo de cabeza de salida que esta tenga), aunque suelen existir unos valores típicos para cada aparato (regularmente basados en el caudal promedio trasegado, ya que el caudal varía a lo largo del tiempo durante un uso del aparato, incluso en el mismo modelo de aparato).

Para el modelo desarrollado aquí, se emplean los caudales recomendados en el Documento Básico de Salubridad, específicamente en la parte de suministro de agua (DB-HS 4). En la Tabla 3 se muestran los valores de caudales instantáneos asociados a cada tipo de aparato sanitario, para los aparatos que interesan en este caso (los presentes en viviendas). La tabla 3 es más reducida que la presentada en el DB-HS 4, porque para fines de este trabajo no se toma en cuenta el suministro de agua caliente. De modo que se presentan aquí solamente los valores típicos de caudales que se emplean más adelante en el modelo de predicción de caudal punta.

*Tabla 3. Caudal instantáneo mínimo para cada tipo de aparato. Fuente: Ministerio de Fomento (2017).*

Tipo de aparato	Caudal instantáneo mínimo de agua fría (L/s)
Lavabo	0.1
Ducha	0.2
Inodoro (cisterna)	0.1
Fregadero doméstico	0.2
Lavadero	0.2
Lavavajillas doméstico	0.15
Lavadora doméstica	0.2

### 3.2.2 Frecuencia

La frecuencia de uso se refiere a la cantidad de veces que entra en servicio un aparato sanitario al día, depende mayormente del comportamiento de los usuarios, así como también de la disponibilidad y precio del agua potable. La frecuencia es uno de los parámetros más complicados de estimar, ya que cada usuario es prácticamente autónomo a la hora de hacer uso de sus instalaciones, siempre que tenga servicio de agua permanente. Aunque es cierto que las personas se acostumbran a tener una rutina, y seguir ciertos patrones, por ello es posible estimar dichas frecuencias de uso basándose en los hábitos de las personas que utilizan los aparatos sanitarios.

Se utilizan para el modelo desarrollado las frecuencias medidas en usos por habitantes por día, presentadas por Blokker (2010). Es importante tener en cuenta que estas no varían significativamente entre zonas geográficas. Finalmente se toman valores levantados en Holanda.

Cada tipo de aparato sanitario tiene una curva de frecuencia que lo representa, dada por una función de distribución de probabilidad característica que se ajusta a los datos obtenidos para este tipo de aparatos. Las funciones de distribución de probabilidad empleadas en este trabajo para modelar las frecuencias son la función de Poisson y la función binomial negativa. La función de distribución de probabilidad de Poisson se emplea para modelar casi la totalidad de aparatos sanitarios que se presentan en una vivienda, y tiene la siguiente forma:

$$P(x, \lambda) = \sum_{k=0}^x \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (11)$$

donde:

- $x$  es el número de ocurrencias del evento.
- $\lambda$  es la media.

La función de distribución de probabilidad binomial negativa es utilizada para modelar la frecuencia de uso del fregadero doméstico, y se corresponde con la siguiente expresión:

$$BN(x, r, p) = \binom{x+r-1}{r-1} p^r (1-p)^x \quad (12)$$

donde:

- $x$  es número de fracasos.
- $r$  es número límite de éxitos.
- $p$  es la probabilidad de obtener un éxito.

Se representa de manera gráfica (figura 8), a modo de ejemplo, la curva de frecuencia de uso que modela un tipo de aparato sanitario, en este caso un lavabo. Es menester aclarar que en el modelo de simulación cada aparato tendrá una frecuencia obtenida en función a la probabilidad de éxito de entrada del modelo.

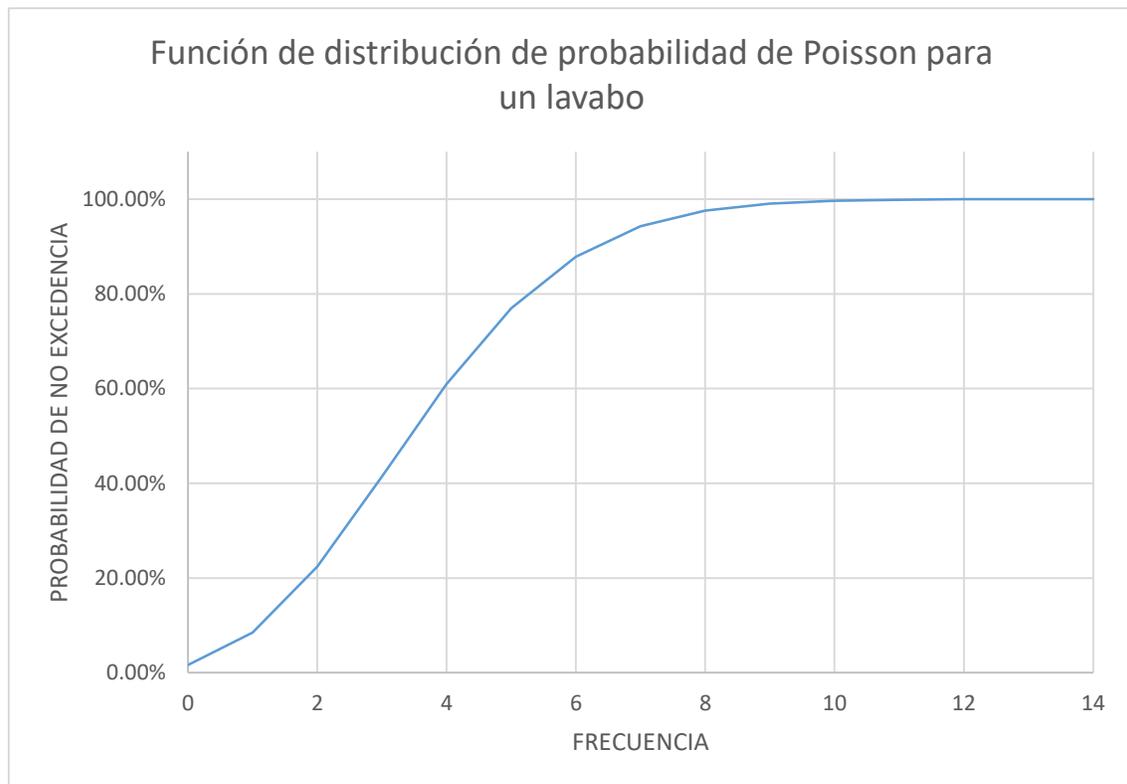


Figura 8. Función de distribución de probabilidad de Poisson para un lavabo.

Puede observarse que, a medida que la probabilidad de no excedencia aumenta, también lo hace la frecuencia de uso asignada al aparato en cuestión. Esto por el motivo de que, mientras más veces se utilice el aparato en el modelo (mayor sea su frecuencia de uso), mayor será el caudal de demanda arrojado por el mismo, en consecuencia, menos veces tendrá la posibilidad de ser excedido en la práctica.

En la tabla 4 se presentan los datos de frecuencia empleados para ejecutar las simulaciones que se realizan en el modelo desarrollado.

*Tabla 4. Frecuencia para cada tipo de aparato. Fuente: Blokker (2010).*

Tipo de aparato	Frecuencia promedio (uso/usuario/día)	Función de distribución de probabilidad
Lavabo	4.1	Poisson
Ducha	0.7	Poisson
Inodoro (cisterna)	6	Poisson
Fregadero doméstico	12.6*	Binomial negativa (r=3, p=0.192)
Lavadero	0.44	Poisson
Lavavajillas doméstico	0.3	Poisson
Lavadora doméstica	0.3	Poisson

En esta tabla llama la atención el valor tan alto de la frecuencia del fregadero doméstico, esto sucede porque el mismo se representa en unidades de *uso/día*, por tanto, el valor promedio de frecuencia de uso del mismo en una vivienda, se toma como 12.6 independientemente del número de habitantes que tenga la misma. En este sentido es importante comentar que los demás aparatos sanitarios tienen frecuencias que han de ser multiplicadas por el número de personas que los utilizan normalmente. Por ejemplo, si tomamos un inodoro como referencia tendríamos una frecuencia promedio de uso de 6 veces al día, en caso que lo utilice habitualmente una sola persona, pero si lo utilizaran dos personas su número de usos promedio al día se duplicaría. Debido a esto resulta tan importante caracterizar cada aparato por individual en términos de los parámetros IDF.

### 3.2.3 Duración

Se refiere al tiempo de uso de cada aparato durante un evento, se determina a partir de las características de uso del agua por parte de los usuarios (el comportamiento que define la duración al tomar un baño, el tiempo que se tarda en cepillarse los dientes, la duración estimada al lavar los platos o la ropa manualmente), o bien a partir de información técnica de algunos aparatos (el tiempo que tarda en llenarse la cisterna del inodoro, los ciclos de la lavadora de ropa o de la máquina lavaplatos). Por esa propia naturaleza de conseguir las duraciones reales, sus modelos se dividen precisamente en dos: uno que estima con una función de distribución de probabilidad el comportamiento de los usuarios, y el otro que, independientemente del deseo y las costumbres del usuario tiene una duración fija determinada por el aparato que consume agua.

Consecuentemente con lo dicho, se utilizan las duraciones representadas por funciones de distribución de probabilidad para algunos tipos de aparatos, mientras para otros aparatos sanitarios se utilizan duraciones fijas (inodoro, lavadora de ropa y máquina lavaplatos). La función de distribución de probabilidad empleada para modelar las duraciones de los aparatos sanitarios que dependen de los hábitos de los usuarios es la denominada función Log-normal, cuya expresión es:

$$LGN(x, S, M) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - M)^2}{2S^2}} \quad (13)$$

donde:

- $x$  es el valor en el que desea evaluar la función.
- $S$  es la desviación estándar.
- $M$  es la media.

En la tabla 5 se presentan los datos de duraciones empleados como parámetros de entrada del modelo estocástico desarrollado, esta se adapta de las presentadas por Blokker, aunque

como en las anteriores, se toman solamente los aparatos sanitarios de interés para este trabajo.

*Tabla 5. Duración para cada tipo de aparato. Fuente: Blokker (2010).*

Tipo de aparato	Duración promedio (segundos)	Función de distribución de probabilidad
Lavabo	40	Log-Normal
Ducha	510	Log-Normal
Inodoro (cisterna)	144	Valor constante
Fregadero doméstico	48	Log-Normal
Lavadero	15	Log-Normal
Lavavajillas doméstico	84	Valor constante
Lavadora doméstica	300	Valor constante

Para todas las funciones de distribución de probabilidad Log-Normal se ha utilizado una varianza de 1.3 y una media igual a la indicada en la tabla anterior; esto siguiendo las recomendaciones de Blokker (2010), que toma esa decisión luego de modelar los datos reales levantados en Holanda.

### 3.2.4 Patrones de comportamiento diario de los usuarios

Otros de los factores que ocasionan variaciones en la demanda de agua de las viviendas, son los hábitos horarios de las personas que allí residen. Patrones como el tiempo que pasan dormidos los habitantes, o el tiempo que pasan fuera de la vivienda, se vuelven de vital importancia para caracterizar las demandas de agua en la RDI. En el modelo de estudio estos datos son esenciales para delimitar unos intervalos de tiempo a lo largo del día, en los que podrán funcionar los aparatos sanitarios, según los patrones de sueño de los usuarios.

Existen demasiadas tipologías de edificaciones, y a su vez demasiadas formas de comportarse por parte de los usuarios. Por ello no se pretende definir un patrón para cada caso, sino buscar unos patrones de comportamiento comunes que definan los grupos de usuarios, y estudiar, en los casos adelante planteados, algunas hipótesis de comportamiento que resulten lógicas. Los patrones de comportamiento de los usuarios a lo largo del día se vuelven importantes a la hora de conocer los intervalos de tiempo en que

se utilizan con regularidad los aparatos sanitarios en una vivienda. En la tabla 6 se presentan los patrones de comportamiento de usuarios agrupados por edad y día de la semana.

Tabla 6. Patrones de comportamiento de los usuarios. Fuente: Blokker (2010).

Descripción	Tipo de dato	Día laborable					Fin de semana
		Niño	Adolescente	Adulto con trabajo fuera de casa	Adulto sin trabajo fuera de casa	Señor	Todos
Hora de despertar	Promedio	07:00	07:00	07:00	08:00	08:00	09:00
	Desviación estándar	01:00	01:00	01:00	01:00	01:00	01:30
Hora de salir de casa	Promedio	08:30	08:15	08:00	13:00	13:00	13:00
	Desviación estándar	00:30	00:30	00:45	03:00	03:00	03:00
Duración fuera de casa (horas)	Promedio	7.00	8.00	9.50	10.00	10.00	10.00
	Desviación estándar	2.00	2.00	3.25	4.50	4.50	4.50
Duración del sueño (horas)	Promedio	10.00	9.00	7.00	8.00	8.00	9.00
	Desviación estándar	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50

Con estos datos se intenta llegar a conclusiones acerca de los intervalos de tiempo en que podrían estar siendo utilizados los aparatos sanitarios, en función de las tipologías de viviendas estudiadas y sus diferentes usuarios estimados. Esto aporta un alto grado de especificidad al estudio realizado.

Un dato interesante señalado por Blokker (2006) es que, durante las horas de sueño de las personas, el volumen de agua consumido es aproximadamente el 1.5% del volumen total demandado durante el día. Por esta razón el modelo de simulación considerará que los aparatos sanitarios se encuentran sin posibilidad de uso durante los periodos de sueño de los usuarios estimados, lo cual simplificará los cálculos sin sacrificar significativamente exactitud en los resultados finales obtenidos. Consecuentemente, el 98.5% de la demanda de agua se produce en el día, y por tanto el modelo se enfoca en estimar de la mejor manera posible los consumos diurnos, ya que el caudal máximo probable en la gran mayoría de los

casos, se presenta en estos intervalos de tiempo. De hecho, resulta lógico pensar que a las 4 de la madrugada no es común encontrar un usuario lavando los platos, por ello se limita el intervalo de servicio de los aparatos a 15.5 horas de las 24 que tiene un día, esto de tomar como media las 8.5 horas que una familia promedio (una pareja con dos hijos) está dormida.

### 3.3 Modelo de simulación desarrollado

El modelo desarrollado se utiliza introduciendo los datos del escenario: número de aparatos sanitarios en la vivienda, número de viviendas y probabilidad de no excedencia deseada; luego se realizan las simulaciones y se obtiene un caudal máximo probable (caudal punta).

El modelo trabaja con funciones de distribución de probabilidad para calcular duración y frecuencia de uso, de manera tal que se debe introducir al inicio del mismo una probabilidad de no excedencia deseada (llamada también probabilidad de éxito), de modo que el algoritmo trabaja en base a ella para conseguir un caudal máximo simultáneo asociado a la misma. El resultado arrojado por el modelo es un caudal de demanda que tiene una probabilidad de ser excedido complementaria a la introducida en el modelo. Por ejemplo, si introducimos como entrada al modelo una probabilidad de no excedencia de 95%, el caudal resultante tendrá 5% de probabilidad de excederse (superarse) en un día; esto es, si hipotéticamente se midieran en un día (en la vivienda estudiada) 100 caudales distintos, probablemente solo 5 de ellos tendrían un valor numérico más alto que el caudal resultante de la simulación. El algoritmo desarrollado para modelar el fenómeno utilizando el método de Montecarlo, se detalla en el flujograma de la figura 9.

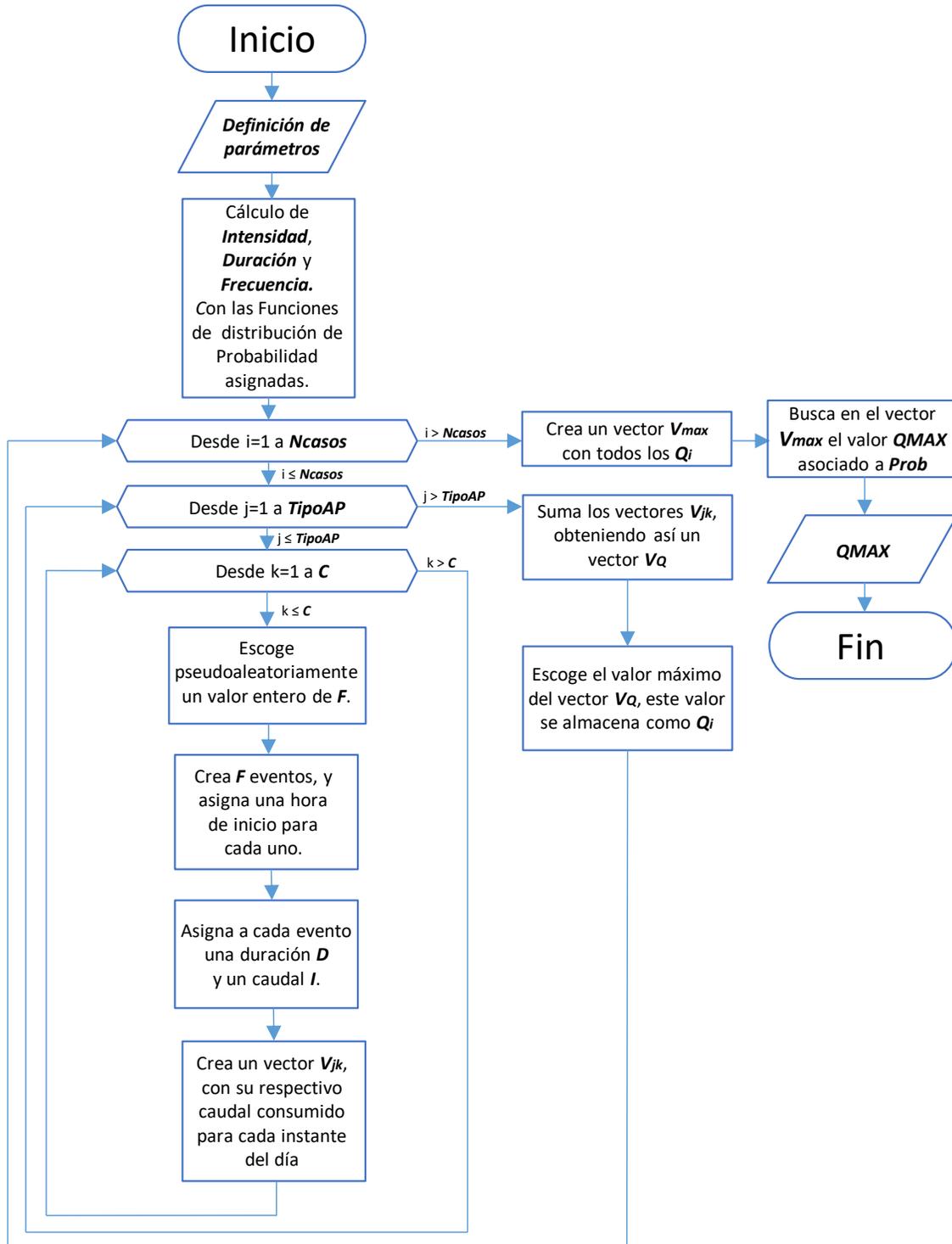


Figura 9. Diagrama de flujo del modelo de predicción del caudal máximo demandado.

Lo primero que se debe entender del flujograma es la caja 2, que se refiere a la definición de los parámetros, para ello se presentan las variables que se toman como datos de entrada:

- **C** es la cantidad de aparatos sanitarios.
- **Prob** es la probabilidad de no excedencia asociada a la simulación.
- **Ncasos** es el número de simulaciones a realizar para cada caso.
- **Hfunc** es el rango de horas en que pueden funcionar los aparatos sanitarios.
- **I** es el caudal promedio de uso de cada aparato sanitario (intensidad).
- **D** es la duración en cada uso de cada aparato sanitario.
- **F** es la frecuencia de uso de cada aparato sanitario.
- **TipoAP** es el número de aparatos sanitarios distintos en el escenario simulado.

Para realizar una simulación en el algoritmo desarrollado, primero se introducen los datos de la vivienda (o del grupo de viviendas), tales como tipo de aparatos, número de aparatos de cada tipo y número de habitantes por vivienda. Se introduce también la probabilidad de no excedencia con la que se trabajará en dicha simulación, así como el número de veces que se correrá la simulación (esto por ser utilizado un método de Montecarlo, que consiste en calcular muchas veces y buscar resultados convergentes). Se introduce también el intervalo de tiempo en que podrían utilizarse los aparatos sanitarios (que ya se estimó en 15.5 horas al día para un caso de estudio), para tomar en cuenta que los usuarios duermen y salen de casa, así como para tomar en cuenta el perfil de los usuarios según la tipología de viviendas y ubicaciones estudiadas.

Luego de introducidos estos datos el algoritmo es capaz de calcular (caja 3 del flujograma de la figura 9) para cada aparato de manera individual su intensidad (caudal), su duración en cada uso y su frecuencia de uso. Se recuerda que el caudal de cada aparato está dado de manera explícita, y que se toma constante para simplificar los cálculos. Las duraciones bien

se toman constantes (para algunos aparatos sanitarios, por sus propias características) o se calculan (para los otros aparatos) empleando su función de distribución probabilidad, y la probabilidad (**Prob**) dada como dato anteriormente. De manera similar a las duraciones calculadas, se calculan las frecuencias con los parámetros establecidos a la entrada.

Cada tipo de aparato tiene hasta ese momento asignados sus parámetros **I**, **D** y **F**. Por ejemplo, si se toma una probabilidad de 95% como dato de entrada, la frecuencia obtenida para los lavabos es 7.22 usos por día por usuario (ver figura 8).

Se toma el primer aparato de un tipo determinado de ellos, por ejemplo, el primer lavabo; y se genera un número eventos (por evento se entiende entrada en funcionamiento del aparato sanitario en cuestión) asociados a este sólo aparato, este número de eventos depende de la frecuencia de uso ya calculada, y es un número entero que representa las veces que se utilizará este aparato en esta simulación (teniendo presente que una simulación equivale a un día efectivo de 15.5 horas en nuestro caso). Este número se toma aleatoriamente entre los dos enteros próximos al valor calculado de frecuencia para ese tipo de aparato, en nuestro ejemplo del primer lavabo, el número de eventos será 7 u 8, con más probabilidad de ser 7 que 8; para el ejemplo se tomarán 8 eventos, porque por el hecho de ser más probable, no implica que siempre suceda un hecho. El valor escogido de **F** se denomina pseudoaleatorio porque es un número aleatorio que debe estar dentro de un determinado rango de números, por ello este valor no es completamente aleatorio (lo fuera si el número no tuviera que estar entre 7 y 8, en el caso del ejemplo planteado).

Seguido de esto el modelo genera un evento pseudoaleatorio (una hora de inicio del uso del aparato sanitario, mediante un generador de números aleatorios) para cada uno de los eventos asociados a este aparato en esta simulación. En nuestro ejemplo del primer lavabo, se generarían 8 horas distintas, que representarían el inicio de un consumo en este aparato, al que se le sumaría la duración de uso de ese tipo de aparato, dando por resultado la hora de finalización del evento. La Tabla 7 presenta tabuladas estas horas, para el ejemplo

estudiado. No se presenta en la tabla la duración, ya que se ha calculado como 49.6 segundos para cada uso del aparato en cuestión.

Tabla 7. Datos de los eventos de uso para el ejemplo de simulación.

Inicio del evento	Fin del evento
09:48:48	09:49:38
12:50:07	12:50:56
20:50:56	20:51:45
15:19:27	15:20:16
12:02:04	12:02:54
13:20:11	13:21:00
19:34:00	19:34:50
16:06:25	16:07:15

Llegados hasta aquí el modelo genera un vector de caudales demandados por el aparato para cada instante de tiempo, denominado  $V_{jk}$ . Este vector contiene un valor de caudal consumido para cada instante de tiempo a lo largo del día, en el aparato sanitario representado. Para nuestro ejemplo del primer lavabo, sería un vector con consumos de 0.1 L/s en los intervalos desde el inicio hasta el fin de cada uno de los 8 eventos, el resto del tiempo el caudal demandado en este aparato es nulo (cero para el algoritmo).

Se sigue este procedimiento con todos y cada uno de los  $C$  aparatos que componen el conjunto de viviendas, sumando posteriormente los  $C$  vectores de caudales de aparatos ( $V_{jk}$ ), y buscando en ese vector resultante ( $V_Q$ ) el valor máximo. Este valor máximo representa el caudal máximo demandado en esa simulación, denominado  $Q_i$ , donde el subíndice  $i$  representa el número de simulación en que se obtuvo ese valor, es de precisar que  $Q_i$  es un escalar. Para iniciar la siguiente simulación se agota nuevamente el proceso iniciando desde la creación de los eventos.

Hecho esto se prosigue con la siguiente simulación, y así hasta llegar a las  $N_{casos}$  simulaciones. Cuando se termina la última simulación, se crea un vector ( $V_{max}$ ) compuesto por todos los escalares  $Q_i$  (existirán igual número de escalares de este tipo que número de simulaciones se realicen). Desde el vector  $V_{max}$  se busca el valor asociado la probabilidad

**(Prob)** dada como dato al inicio del programa. Se tiene entonces el resultado deseado, un caudal máximo demandado asociado a una probabilidad de no excedencia determinada.

Es importante comentar que el modelo de simulación se programó en Visual Basic para Aplicaciones (VBA), sobre Microsoft Excel 2016. Este programa basado en el modelo estudiado tiene tiempos de cálculo que superan las 24 horas. Para escenarios de grupos de 90 viviendas del tipo C, donde se realizan los cálculos en lotes de 20 valores, estos se obtienen en tiempos de entre 24 y 30 horas, en un ordenador con procesador i7 de tercera generación.

La forma de los resultados permite representar gráficamente valores de caudal punta asociados de manera discreta a determinada probabilidad de éxito, esto sirve para luego interpolar linealmente, y obtener, con cada caudal obtenido por alguno de los métodos a evaluar, su respectiva fiabilidad. La precisión de los resultados depende de lo fina que sea esa curva, en este caso se tomaron valores de paso de 1 para las probabilidades. Podría mejorarse la precisión obtenida tomando el paso de 0.1 en vez de 1.

Para escoger el número mínimo de simulaciones que se deben realizar para obtener cada valor de caudal punta empleando el modelo desarrollado, se realiza un estudio estadístico de convergencia. Se toma un caso de estudio y se realizan cálculos con grandes cantidades de simulaciones, por ejemplo 10,000; luego se realizan para ese mismo caso 5,000 simulaciones, si los resultados finales son los mismos, se vuelven a ejecutar los cálculos con menor número de simulaciones. Se continúa este proceso hasta llegar al punto en el cual, con menos simulaciones, aparentemente se tendrá el mismo resultado que con las 10,000 simulaciones que se empezó la prueba. En ese momento, se realizan varias veces más los cálculos para ese número mínimo de simulaciones, y deben obtenerse resultados similares. En el caso de estudio en número mínimo de simulaciones que garantiza la convergencia es mil.

## 4 Casos de estudio

La normativa (Ministerio de Industria, 1975) llamada *Normas Básicas para las instalaciones interiores de suministro de agua* (ya sustituida por el mencionado DB-HS4 del CTE) clasifica los suministros de agua en cinco tipos, que van desde el tipo A hasta el E, tal como se vio en la tabla 2. Dado que es conveniente parametrizar los casos de estudio, se utilizan estos tipos de viviendas (con algunas modificaciones menores) para evaluar los métodos de diseño de RDI, es importante recordar que como este trabajo no se enfoca en locales comerciales, no se evalúa el grupo de suministro tipo A de la mencionada normativa (NIA).

Se presentan en la tabla 8 las características más importantes desde el punto de vista de este trabajo, de los tipos de viviendas que en lo adelante se estudian. Primero se presenta el número de aparatos sanitarios que componen cada vivienda, así como el caudal instalado de la misma, el cual podría considerarse el caudal asociado a la probabilidad de éxito de 100%. Por otro lado, se realizan los cálculos de coeficiente de simultaneidad y caudal punta, empleando los métodos de la norma francesa, el racional español (que da la misma respuesta que el de la norma francesa, por tratarse de una sola vivienda), el método de la UNE 149201, y los resultados de simular esta vivienda en el modelo de predicción desarrollado, para las probabilidades de éxito de 99%, 95% y 90%.

Tabla 8. Coeficientes de simultaneidad y caudales para una vivienda de cada tipología estudiada

Tipo de vivienda	no. de aparatos sanitarios	$Q_{inst}$ (L/s)	$k_1$	$Q_p$ (L/S)	$k_3$	$Q_p$ (L/S)	$k_{p99\%}$	$Q_{p99\%}$ (L/S)	$k_{p95\%}$	$Q_{p95\%}$ (L/S)	$k_{p90\%}$	$Q_{p90\%}$ (L/S)
B	5	0.80	0.50	0.38	0.60	0.47	0.75	0.60	0.63	0.50	0.58	0.47
C	8	1.20	0.38	0.44	0.50	0.59	0.56	0.67	0.47	0.57	0.42	0.50
D	10	1.60	0.33	0.51	0.44	0.69	0.50	0.80	0.38	0.60	0.38	0.60
E	12	1.80	0.30	0.52	0.42	0.73	0.48	0.87	0.37	0.67	0.33	0.60

Esta tabla arroja resultados interesantes, a partir de los cuales se pueden empezar a hacer algunas conjeturas. Pero resulta más interesante realizar comparaciones con un mayor número de aparatos, que es en la zona que se tiene mayor incertidumbre del comportamiento de los métodos de diseño de las RDI.

Cada escenario de evaluación consta de un grupo de viviendas del mismo tipo. Por ejemplo, para las viviendas del tipo D se evalúan grupos de 5, 10, 15, 20, 28, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 viviendas. Es de interés ligar estos números de grupos de viviendas con la realidad, por ejemplo, se toman 28 viviendas ya que una de las edificaciones más comunes en Valencia son los edificios de 7 niveles con 4 viviendas por nivel, para un total de 28 viviendas, que precisamente suelen ser de tipo D.

Para las viviendas del tipo B y tipo C, se evalúan grupos de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 viviendas. Mientras que, para las viviendas tipo E se evalúan grupos de 5, 10, 15, 20, 30 y 35 viviendas, esto último por ser viviendas con gran número de aparatos sanitarios.

## 5 Resultados

Tras simular los distintos escenarios en el modelo de predicción de caudal máximo demandado, se presentan de manera gráfica algunos resultados obtenidos. Se representan curvas que relacionan los caudales máximos demandados con la cantidad de viviendas estudiadas, organizadas según la probabilidad de no excedencia asociada a cada caudal. Se grafican las curvas para las probabilidades de 90%, 95% y 99%. Se presentan primero las curvas para grupos de viviendas tipo B, y luego se presentan las demás según el orden alfabético, todo ello se presenta en las figuras 10, 11, 12, y 13.

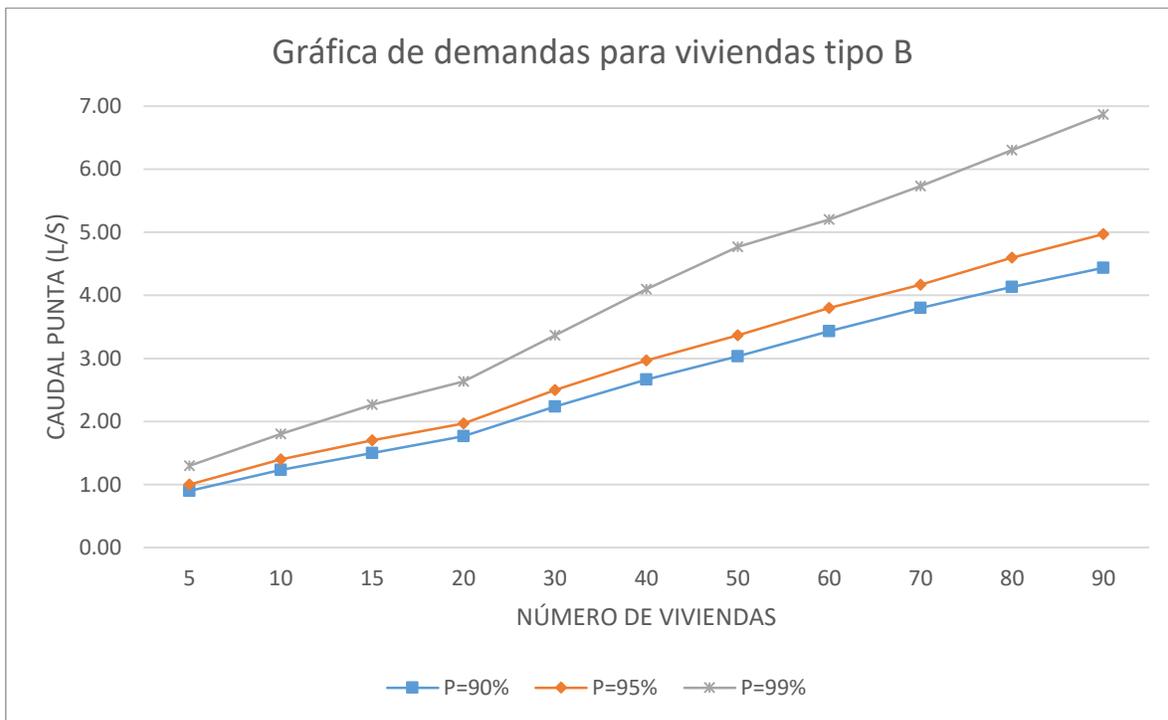


Figura 10. Resultados de demandas para grupos de viviendas tipo B (para probabilidades de 90, 95 y 99%).

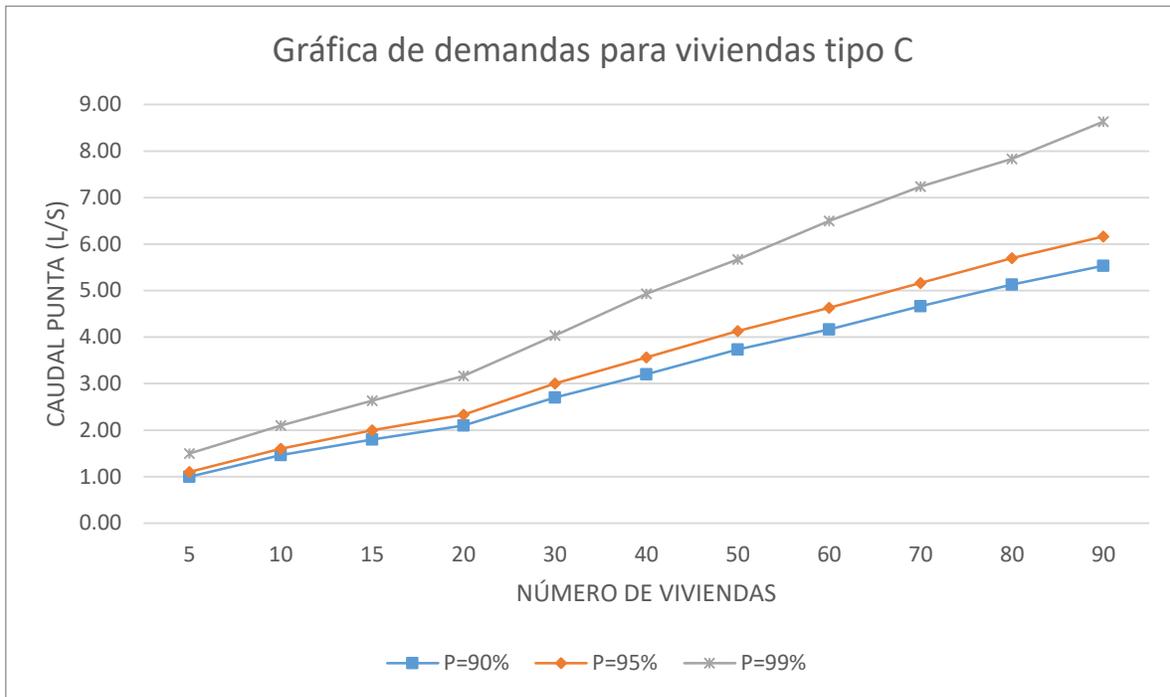


Figura 11. Resultados de demandas para grupos de viviendas tipo C (para probabilidades de 90, 95 y 99%).

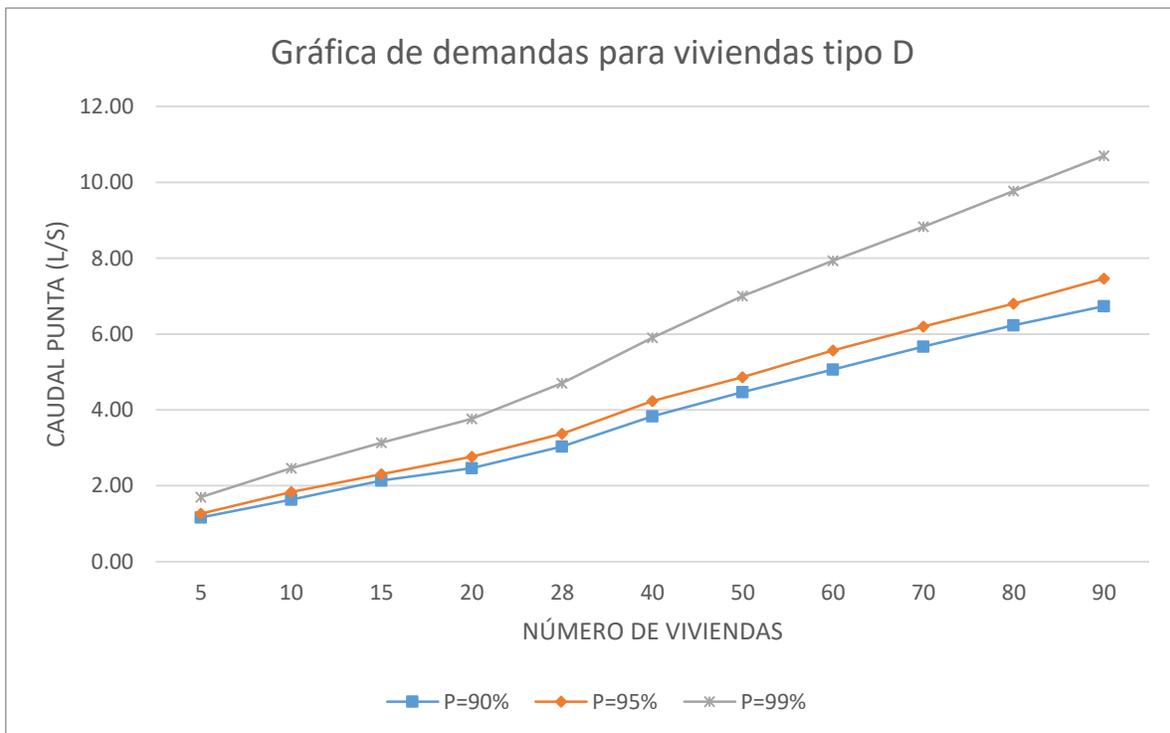


Figura 12. Resultados de demandas para grupos de viviendas tipo D (para probabilidades de 90, 95 y 99%).

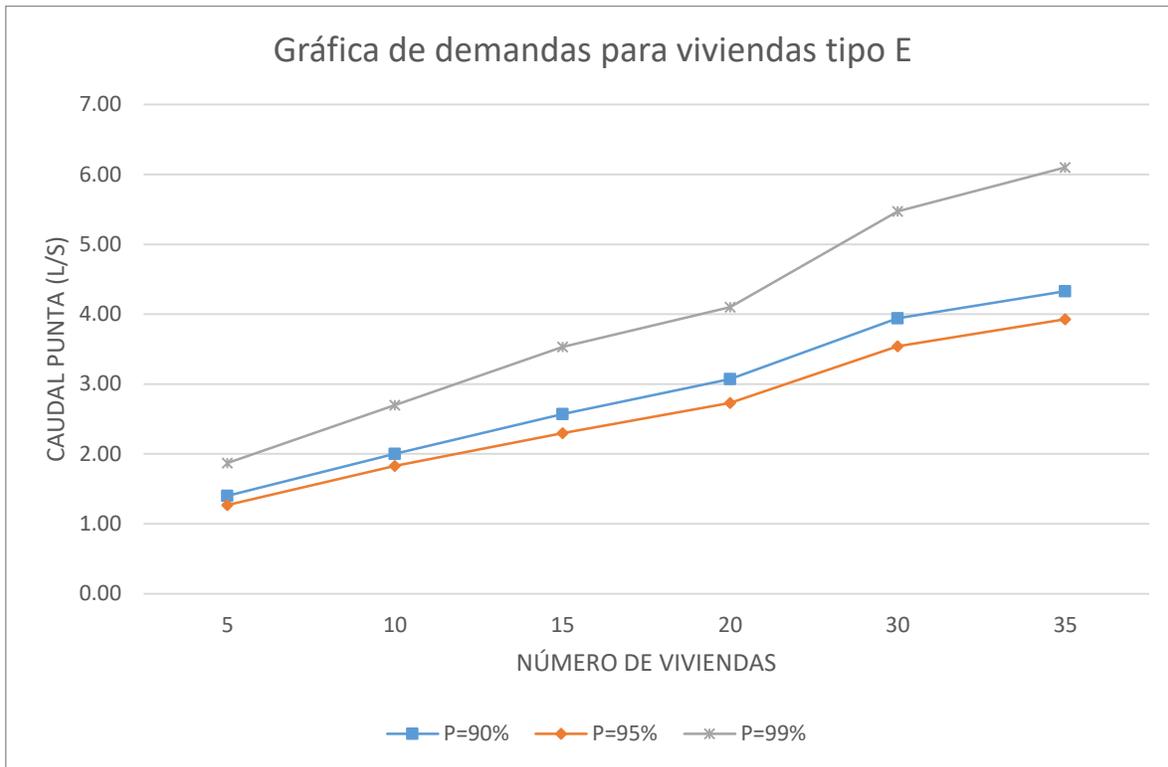


Figura 13. Resultados de demandas para grupos de viviendas tipo E (para probabilidades de 90, 95 y 99%).

Para cada escenario se utilizaron distintos métodos de diseño para calcular los caudales de demanda, con el fin de obtener la fiabilidad de cada uno de ellos. Se presenta en las tablas 9, 10, 11 y 12, los resultados obtenidos para los escenarios estudiados, además del caudal de demanda obtenido por cada método, se presenta también la probabilidad de no excedencia que brinda cada caudal; todo ello en una tabla para cada grupo de viviendas según la tipología estudiada, ordenadas alfabéticamente según la mencionada tipología.

Tabla 9. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo B).

Número de Viviendas Tipo B por escenario	Método racional español		Método francés		Método UNE 149201 Modificado		Método UNE 149201		Método Hunter
	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)
5	0.77	84.0%	0.78	84.5%	1.11	96.7%	1.11	96.7%	1.92
10	1.01	84.1%	1.10	84.6%	1.57	96.8%	1.57	96.8%	2.88
15	1.22	83.3%	1.34	84.4%	1.91	96.7%	1.91	96.7%	3.65
20	1.42	82.4%	1.54	84.3%	2.19	96.5%	2.19	96.5%	4.35
30	1.82	84.1%	1.89	84.3%	2.66	96.2%	2.58	96.0%	5.46
40	2.21	84.3%	2.17	84.2%	3.04	96.0%	2.79	91.9%	7.05
50	2.59	84.4%	2.43	84.1%	3.38	95.1%	2.96	87.7%	8.40
60	2.98	84.6%	2.66	82.8%	3.68	94.1%	3.10	84.8%	9.71
70	3.37	84.6%	2.87	81.2%	3.95	92.2%	3.22	84.4%	10.94
80	3.75	84.8%	3.07	79.1%	4.21	91.1%	3.34	84.2%	12.02
90	4.13	84.9%	3.26	76.6%	4.45	88.8%	3.44	82.7%	12.99

Tabla 10. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo C).

Número de Viviendas Tipo C por escenario	Método racional español		Método francés		Método UNE 149201 Modificado		Método UNE 149201		Método Hunter
	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)
5	0.88	84.2%	0.93	84.7%	1.37	97.5%	1.37	97.5%	2.58
10	1.16	82.9%	1.31	84.7%	1.92	97.4%	1.92	97.4%	3.84
15	1.41	82.2%	1.60	84.6%	2.33	96.8%	2.33	96.8%	4.98
20	1.64	83.9%	1.85	84.6%	2.67	96.6%	2.59	96.4%	6.06
30	2.09	81.7%	2.26	84.3%	3.24	96.3%	2.89	93.6%	7.85
40	2.54	84.1%	2.61	84.2%	3.70	96.0%	3.11	87.1%	10.41
50	2.98	84.1%	2.92	83.6%	4.11	94.8%	3.29	84.6%	12.20
60	3.43	84.3%	3.20	80.0%	4.47	93.1%	3.45	84.3%	13.77
70	3.87	84.3%	3.46	77.6%	4.81	91.6%	3.59	82.8%	15.17
80	4.31	84.4%	3.69	76.4%	5.11	89.7%	3.71	76.6%	16.55
90	4.75	84.5%	3.92	74.5%	5.40	88.0%	3.82	72.5%	17.91

Tabla 11. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo D).

Número de Viviendas Tipo D por escenario	Método racional español		Método francés		Método UNE 149201 Modificado		Método UNE 149201		Método Hunter
	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)
5	1.02	84.4%	1.10	87.0%	1.57	97.5%	1.57	97.5%	2.88
10	1.35	83.4%	1.54	84.9%	2.19	96.9%	2.19	96.9%	4.35
15	1.63	81.9%	1.89	84.7%	2.66	96.7%	2.58	96.5%	5.72
20	1.90	80.9%	2.17	84.5%	3.04	96.4%	2.79	95.7%	7.05
28	2.32	79.6%	2.57	84.3%	3.56	96.2%	3.04	90.2%	9.19
40	2.94	82.3%	3.07	84.1%	4.21	94.6%	3.34	84.5%	12.02
50	3.46	84.0%	3.43	82.0%	4.67	92.0%	3.53	84.1%	13.93
60	3.97	84.1%	3.76	77.8%	5.08	90.3%	3.69	76.4%	15.63
70	4.49	84.1%	4.06	74.9%	5.45	86.6%	3.84	70.1%	17.31
80	5.00	84.2%	4.34	74.2%	5.80	84.9%	3.97	60.5%	18.94
90	5.51	84.2%	4.60	70.4%	6.12	84.7%	4.08	51.5%	20.53

Tabla 12. Caudal y probabilidad éxito, para cada método de diseño estudiado (grupos de viviendas tipo E).

Número de Viviendas Tipo E por escenario	Método racional español		Método francés		Método UNE 149201 Modificado		Método UNE 149201		Método Hunter
	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)	P	Q (L/s)
5	1.05	82.4%	1.13	84.5%	1.66	96.8%	1.66	96.8%	3.21
10	1.38	74.3%	1.59	84.4%	2.32	96.6%	2.32	96.6%	4.86
15	1.67	72.0%	1.94	84.2%	2.82	96.4%	2.67	96.1%	6.42
20	1.94	66.2%	2.24	84.0%	3.22	96.1%	2.88	92.2%	8.04
30	2.48	62.3%	2.75	76.7%	3.90	94.4%	3.20	84.6%	10.49
35	2.74	62.3%	2.96	75.0%	4.19	93.3%	3.33	84.3%	13.42

En estos resultados los caudales de demanda calculados por el método de Hunter no presentan probabilidades de no excedencia asociadas, ya que al calcular los caudales de demanda utilizando dicho método se obtienen valores muy altos, siempre por encima del valor de 99% de probabilidad de no excedencia. Regularmente valores que duplican el caudal con 99% de probabilidad de no excedencia que arrojaba el modelo de simulación creado. Por ejemplo, en el caso de estudio de grupos con 20 viviendas del tipo D, se tiene un caudal punta de 7.05 L/s con el método de Hunter, mientras al simular en el modelo

estocástico desarrollado, se obtiene una demanda de 3.77 L/s para el 99% de probabilidad de no excedencia. Considerando que el caudal instantáneo calculado corresponde al 100% de probabilidad de no excedencia, se tiene entonces que el método de Hunter tendría para este caso, una probabilidad de éxito 99.1%. Visto esto resulta evidente que las probabilidades de éxito de las demás demandas obtenidas empleando la metodología de Hunter tendrán valores de fiabilidad entre 99% y 100%, lo cual es de esperar, ya que su autor elaboró el método para diseñar los elementos para el 99% de probabilidad de éxito.

## 5.1 Gráficas de fiabilidad de los métodos evaluados

Finalmente se representan de manera gráfica, los distintos resultados obtenidos en cada uno de los escenarios de estudio, presentado anteriormente tabulados.

### 5.1.1 Resultados de grupos de viviendas tipo B

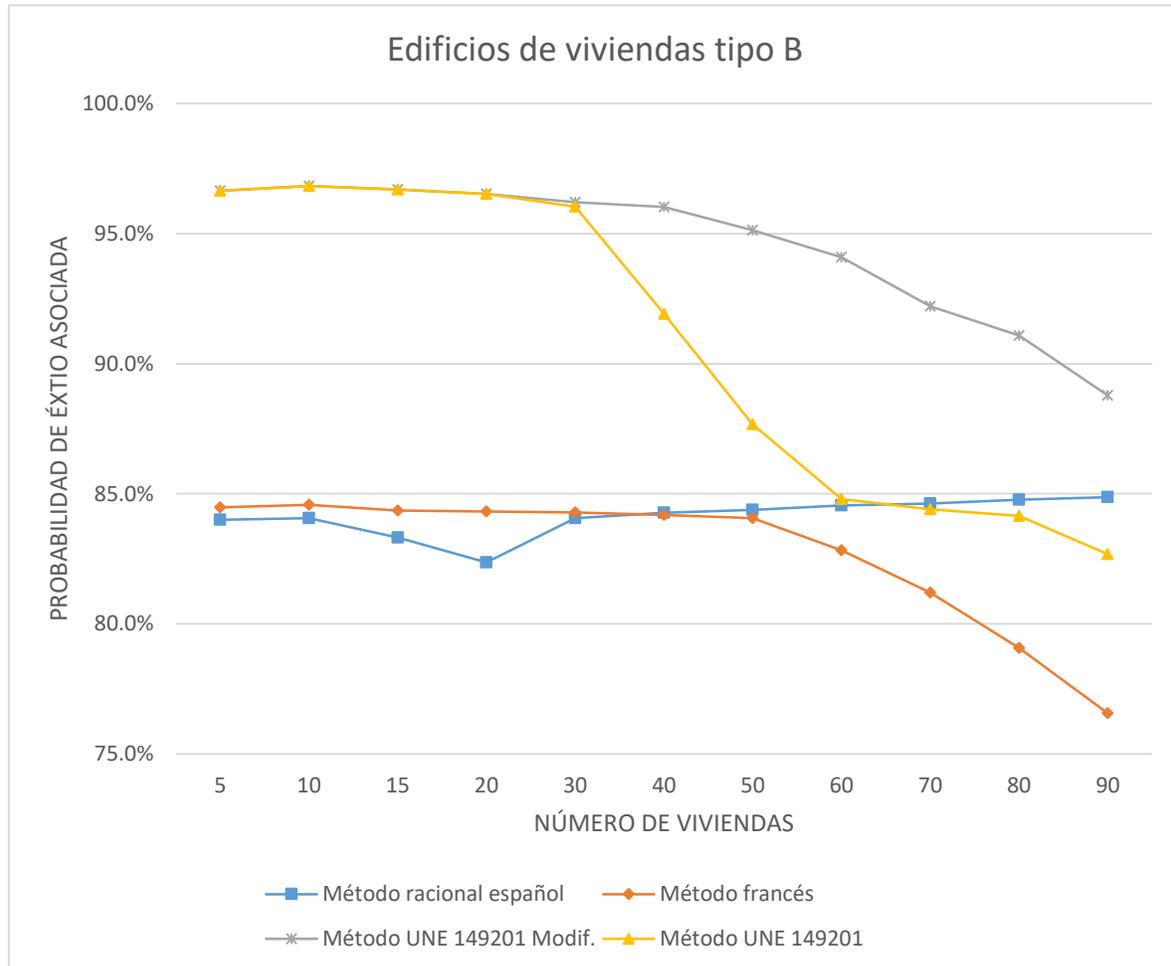


Figura 14. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo B.

En estos escenarios de estudio se muestran los comportamientos de los tres métodos de diseño de RDI más utilizados en España. Se evidencia que el *método racional español* es el que tiene probabilidades de no excedencia (probabilidad de éxito) más constantes a lo largo de la variación del número de viviendas que forman un grupo, en estos casos sus probabilidades rondan cerca de 85% independientemente del número de viviendas (la

probabilidad más baja que presenta es para el caso de 20 viviendas con 82.4%). El *método francés* tiene probabilidades de éxito similares (un poco más altas) al racional español para grupos con pocas viviendas, pero luego de emplearse en grupos de más de 50 viviendas inicia a disminuir su probabilidad de éxito, llegando a tener 76.6% para grupos de 90 viviendas. Es de importancia mencionar que, al emplear el método francés, no se ha truncado el valor del coeficiente de simultaneidad ( $k_1$ ) en ningún valor mínimo. Más adelante se trata de manera detallada este problema.

El método presentado en la *UNE 149201* brinda unas probabilidades de éxito muy altas al ser empleado (en torno al 97%) para grupos de pocas viviendas, pero luego de utilizarlo en grupos de más de 30 viviendas las probabilidades resultantes caen en picada, llegando a resultar hasta 82.7% para el caso de grupos de 90 viviendas.

El método aquí llamado *UNE 149201 Modificado* es una variante del método recomendado en la norma *UNE 149201*, pero utilizando como única expresión para el cálculo del caudal simultáneo máximo  $Q_p = 0.682 * Q_i^{0.45} - 0.14$ ; indistintamente se tenga o no un caudal instantáneo que supere los 20 L/s, este método se implementa para los análisis luego de notar que la probabilidad de no excedencia que se obtiene con su uso es bastante alta (pero sin superar el 99%), por ello no se tendría un sobredimensionamiento excesivo de los componentes con el uso de ella. Al emplear este método se observa que los resultados del estudio de los grupos de más de 30 viviendas no decaen tan significativamente como al emplear el método *UNE* original (hablando en términos de probabilidad de no excedencia), llegando a presentarse como valor mínimo de probabilidad de éxito un 88.8% para el caso de grupos de 90 viviendas, siendo por tanto la metodología que más fiabilidad brindaría en este tipo de viviendas.

Es importante destacar que no se muestran resultados gráficos del *método de Hunter*, ya que al calcular los caudales de demanda para cada escenario utilizando ese método se obtenían caudales muy altos, siempre por encima del valor de 99% de probabilidad de no

excedencia (regularmente valores que duplicaban el caudal con 99% de probabilidad de no excedencia que arrojaba el modelo de simulación creado).

### 5.1.2 Resultados de grupos de viviendas tipo C

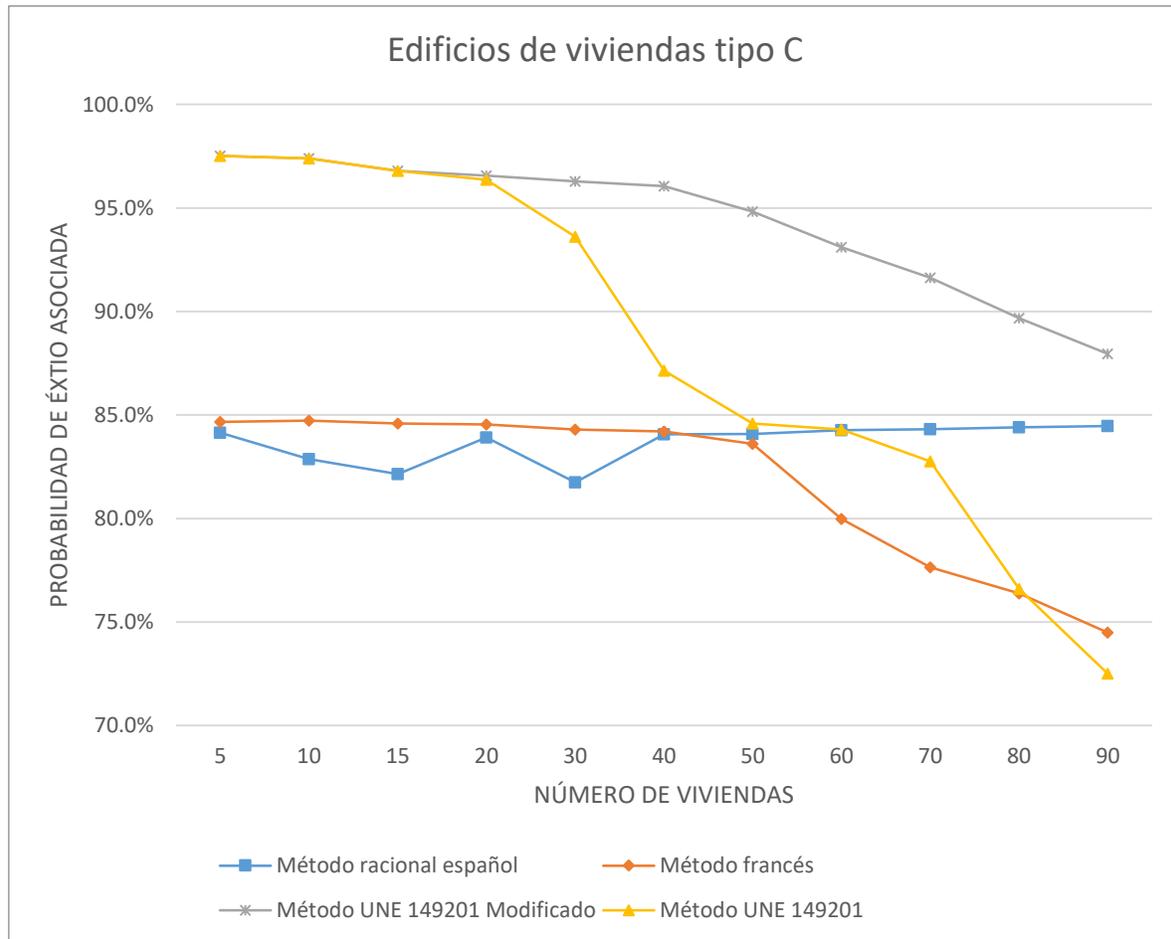


Figura 15. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo C.

El *método racional español* continúa mostrando probabilidades de éxito más constantes a lo largo de la variación del número de viviendas que forman un grupo, en estos casos sus probabilidades rondan nuevamente cerca de 85% independientemente del número de viviendas (la probabilidad más baja que presenta es para el caso de 30 viviendas con 81.7%). El *método francés* tiene probabilidades de éxito similares (un poco más altas) al racional español para grupos con pocas viviendas, pero luego de emplearse en grupos de más de 50 viviendas inicia a disminuir su probabilidad de éxito, llegando a tener 74.5% para grupos de

90 viviendas. Es de importancia recordar que, al emplear el método francés, no se ha truncado el valor del coeficiente de simultaneidad ( $k_1$ ) en ningún valor mínimo.

El método presentado en la *UNE 149201* brinda unas probabilidades de éxito muy altas al ser empleado (en torno al 97%) para grupos de pocas viviendas, pero luego de utilizarlo en grupos de más de 20 viviendas las probabilidades resultantes caen en picada, llegando a resultar hasta 72.5% para el caso de grupos de 90 viviendas. Es necesario mencionar que para grupos de 50 a 70 viviendas este método brinda resultados similares al método racional, rondando el 85% de probabilidad de éxito.

Al aplicar el *método UNE 149201 Modificado* se observa que los resultados del estudio de los grupos de más de 20 viviendas no decaen tan significativamente como al emplear el método UNE original (hablando en términos de probabilidad de no excedencia), llegando a presentarse como valor mínimo de probabilidad de éxito un 88% para el caso de grupos de 90 viviendas, siendo por tanto la metodología que más fiabilidad brindaría en este tipo de viviendas.

### 5.1.3 Resultados de grupos de viviendas tipo D

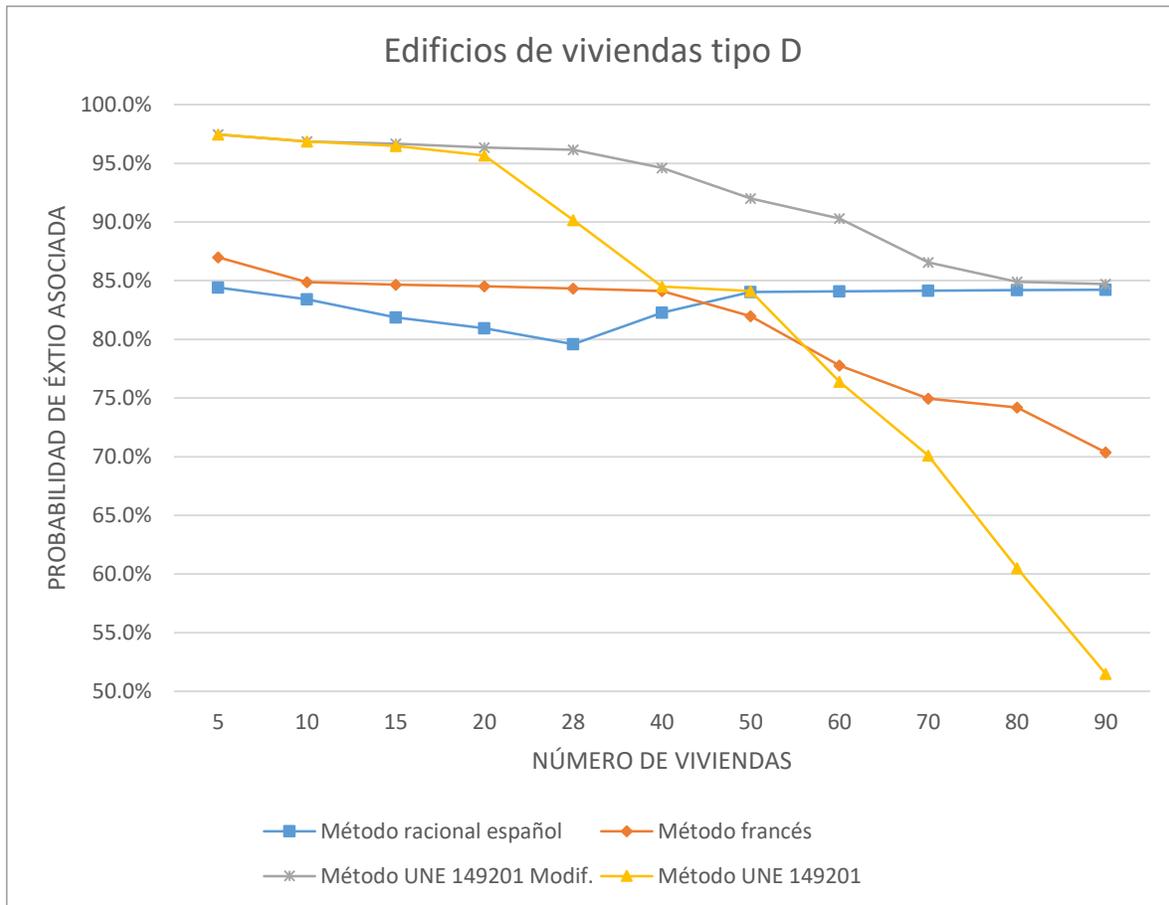


Figura 16. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo D.

El *método racional español* continúa mostrando las probabilidades de éxito más constantes a lo largo de la variación del número de viviendas que forman un grupo, en estos casos nuevamente sus probabilidades rondan el 85%, independientemente del número de viviendas estudiadas (la probabilidad más baja que presenta es para el caso de 28 viviendas con 79.6%). El *método francés* tiene probabilidades de éxito similares (un poco más altas) al racional español para grupos con pocas viviendas, pero luego de emplearse en grupos de más de 40 viviendas inicia a disminuir su probabilidad de éxito, llegando a tener 70.4% para grupos de 90 viviendas.

El método presentado en la *UNE 149201* brinda unas probabilidades de éxito muy altas al ser empleado (en torno al 97%) para grupos de pocas viviendas, pero luego de utilizarlo en grupos de más de 20 viviendas las probabilidades resultantes caen en picada, llegando a resultar hasta 51.5% para el caso de grupos de 90 viviendas. Es necesario mencionar que para grupos de 40 a 50 viviendas este método brinda resultados similares al método racional, rondando el 85% de probabilidad de éxito, pero luego de pasadas las 70 viviendas los resultados brindan probabilidades de no excedencia muy bajas.

Al aplicar el *método UNE 149201 Modificado* se observa que los resultados del estudio de los grupos de más de 20 viviendas no decaen tan significativamente como al emplear el método UNE original (hablando en términos de probabilidad de no excedencia), llegando a presentarse como valor mínimo de probabilidad de éxito un 84.7% para el caso de grupos de 90 viviendas, siendo por tanto la metodología que más fiabilidad brindaría en este tipo de viviendas.

#### 5.1.4 Resultados de grupos de viviendas tipo E

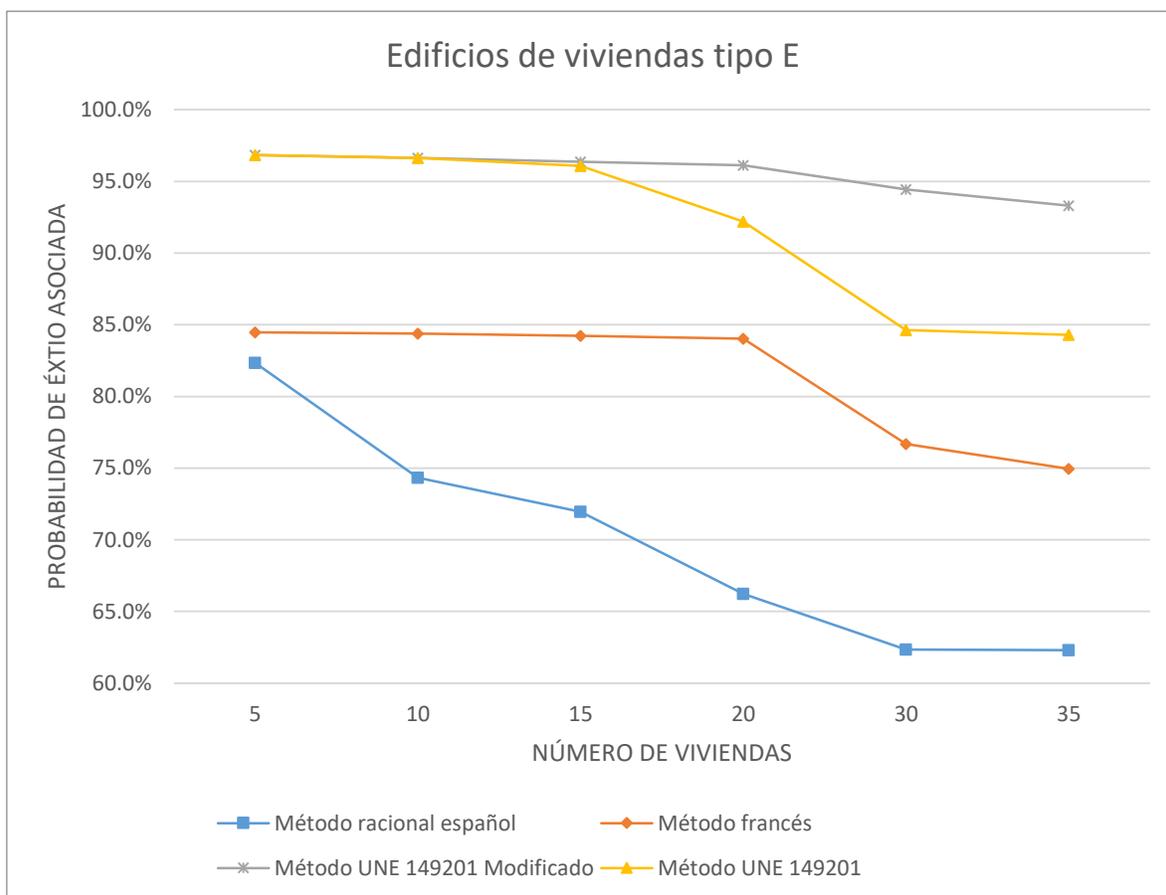


Figura 17. Gráfico de fiabilidad de los métodos estudiados para grupos de viviendas tipo E.

Las viviendas del tipo E son espaciosas, por ello es correcto no insistir en el estudio de grupos con gran número de las mismas, ya que escasamente podrían aparecer en la práctica profesional.

El *método racional español* es el que da como resultado las probabilidades de éxito más bajas, llegando sus probabilidades a rondar el 62.3% (para grupos de 35 viviendas), dichas probabilidades van decayendo según se aumenta el número de viviendas estudiadas (la probabilidad más alta que presenta es para el caso de 5 viviendas con 82.4%). El *método francés* tiene probabilidades de éxito casi constantes (cerca de 84%) al estudiar grupos de

5 a 20 viviendas, pero luego de emplearse en grupos de más de 20 viviendas inicia a disminuir su probabilidad de éxito, llegando a tener 75% para grupos de 35 viviendas.

El método presentado en la *UNE 149201* brinda unas probabilidades de éxito muy altas al ser empleado (en torno al 97%) para grupos de hasta 15 viviendas, pero luego de utilizarlo en grupos de más de 20 viviendas las probabilidades resultantes van disminuyendo lentamente, llegando a resultar hasta 84.3% para el caso de grupos de 35 viviendas.

Al aplicar el *método UNE 149201 Modificado*, los resultados del estudio de los grupos de más de 20 viviendas no decaen tanto como al emplear el método UNE original (hablando en términos de probabilidad de no excedencia), llegando a presentarse como valor mínimo de probabilidad de éxito un 93.3% para el caso de grupos de 35 viviendas, siendo por tanto la metodología que más fiabilidad brindaría en este tipo de viviendas.

## 5.2 Factor de simultaneidad del método francés

El factor  $k_1$  del método francés suele truncarse en la práctica profesional en torno a 0.20, según recomendaciones de diversos autores. Los resultados mostrados anteriormente no toman en cuenta este valor mínimo de  $k_1$ , puesto que se desea evaluar el método sin restringirlo a limitaciones de algunos autores. En los casos evaluados el valor mínimo obtenido de  $k_1$  es de 0.03, y se presenta cuando se tiene un grupo de 90 viviendas tipo D, para ese caso el método francés presenta probabilidad de no excedencia asociada de 70.4%.

Se buscan los valores de  $k_1$  asociados a la probabilidad de no excedencia de 99% para los casos estudiados, de esta forma se tiene una referencia del valor mínimo de  $k_1$  enlazado a una fiabilidad determinada, esto se presenta en las tablas 13, 14 y 15.

Tabla 13. Valores mínimos de  $k_1$  recomendados para grupos de viviendas tipo B y C.

Valores de $k_1$ para $P_{99\%}$		
no. de viviendas	$k_1$ Viv. tipo B	$k_1$ Viv. tipo C
5	0.34	0.26
10	0.23	0.18
15	0.20	0.15
20	0.17	0.14
30	0.15	0.12
40	0.13	0.11
50	0.12	0.10
60	0.11	0.09
70	0.11	0.09
80	0.10	0.08
90	0.10	0.08

Tabla 14. Valores mínimos de  $k_1$  recomendados para grupos de viviendas tipo D.

Valores de $k_1$ para $P_{99\%}$	
no. de viviendas	$k_1$ Viv. tipo D
5	0.22
10	0.16
15	0.14
20	0.12
28	0.11
40	0.10
50	0.09
60	0.09
70	0.08
80	0.08
90	0.08

Tabla 15. Valores mínimos de  $k_1$  recomendados para grupos de viviendas tipo E.

Valores de $k_1$ para $P_{99\%}$	
no. de viviendas	$k_1$ Viv. tipo E
5	0.22
10	0.16
15	0.14
20	0.12
30	0.11
35	0.10

Resulta evidente que los valores mínimos de  $k_1$  obtenidos se encuentran en torno a 0.08, debe precisarse que dichos valores se refieren a un diseño asociado a 99% de probabilidad de no excedencia, pero podrían buscarse valores de  $k_1$  para probabilidades de porcentajes distintos empleando la metodología aquí desarrollada.

## 6 Conclusiones

Del desarrollo de la metodología presentada y su posterior aplicación a cada uno los casos de estudio, así como de los análisis realizados con los resultados de dicha aplicación, se llega a las siguientes conclusiones.

La elaboración de un modelo estadístico utilizando el método de Montecarlo, que simula el uso de los aparatos sanitarios dentro de una vivienda o de un grupo de viviendas ha representado el eje fundamental del trabajo realizado. Este modelo es lo que permite obtener los datos de demanda asociada a fiabilidad que dan paso a evaluar posteriormente los métodos de diseño de RDI en los escenarios de interés.

Obtener los parámetros de entrada del modelo estadístico desarrollado (intensidad, duración, frecuencia, patrones de horarios de los usuarios y demás) ha resultado de vital importancia para luego simular los escenarios de estudio en el mismo.

La parametrización de escenarios resulta clave para trabajar de manera clara y organizada, por ello la selección de los tipos y cantidades de viviendas a evaluar resulta de importancia en el estudio. De la misma manera ello nos permite notar que para ciertas condiciones algún método puede resultar más fiable que otro, y para otro escenario puede llegar a ser el método menos fiable.

La simulación de cada escenario de estudio utilizando modelo estadístico desarrollado ha sido la parte que más tiempo ha tomado, en parte por el lenguaje de programación seleccionado, y por la poca experiencia en esa área. Por ello ha resultado una labor ardua, que ha requerido sobre todo mucha paciencia y espera.

Finalmente, la obtención de la fiabilidad para cada método de diseño escogido se logra luego de realizar todo lo comentado anteriormente y su vital importancia radica en poder establecer puntos de comparación de los resultados de los diferentes métodos en los distintos escenarios analizados.

Los distintos métodos de diseño de RDI evaluados a lo largo de este trabajo brindan resultados distintos según qué escenario se estudie, aunque podemos distinguir algunos patrones de comportamiento observados en los mismos. Estos resultados permiten no solo analizar qué métodos son más o menos conservadores, sino también establecer una referencia numérica de la fiabilidad de cada uno de ellos.

El *método racional español* muestra probabilidades de éxito cuasi constantes a lo largo de su uso, rondando en la mayoría de los casos el rango de 80 a 85%; excepto en su aplicación a los grupos de viviendas del tipo E, las cuales son amplias y cuentan con gran número de aparatos sanitarios instalados, en estos escenarios este método disminuye su fiabilidad. En los tipos de viviendas B, C y D se recomienda el uso de este método si se desea tener fiabilidad constante, independientemente del número de viviendas que formen las edificaciones.

El *método francés* tiene probabilidades de éxito similares al racional español para grupos con pocas viviendas (un poco más altas de 85%), pero luego de emplearse en grupos de más de 50 viviendas empieza a disminuir considerablemente su probabilidad de éxito (llegando a tener 70.4% para grupos de 90 viviendas), este comportamiento se presenta en viviendas del tipo B, C y D. Para las viviendas tipo E este método resulta más conveniente que el racional, pero no más que el método de la UNE.

En el método francés se llega a la conclusión que, al emplear como valor mínimo del coeficiente de simultaneidad ( $k_1$ ) el valor de 0.08 se obtienen resultados asociados a 99% de probabilidad de no excedencia.

El *método de la UNE 149201* brinda unas probabilidades de éxito muy altas al ser empleado (en torno al 97%) para grupos de pocas viviendas (ya sean del tipo B, C o D), pero luego de utilizarlo en grupos de más de 20 viviendas las probabilidades resultantes caen en picada, llegando a resultar hasta 51.5% para el caso de grupos de 90 viviendas tipo D. Es importante mencionar que para grupos de alrededor de 50 viviendas este método brinda resultados

satisfactorios (similares en porcentajes de probabilidad de éxito al método racional), pero luego de pasadas las 60 viviendas los resultados brindan probabilidades de no excedencia muy bajas. En el caso de las viviendas tipo E se tienen resultados muy buenos a pesar de tener grupos de muchas viviendas, llegando a tener probabilidades de éxito entre 97 y 84.3% según se tengan menos o más viviendas en la edificación.

El método *UNE 149201 Modificado* resulta con las mayores probabilidades de no excedencia dentro de los métodos analizados en este trabajo, rondando valores desde 97 hasta 84.7%, se observa que los resultados de la aplicación de este método no decrecen tan significativamente como al emplear el método UNE original (hablando en términos de probabilidad de no excedencia).

Definitivamente la metodología desarrollada cumple con su propósito, y podría emplearse para comparar otros métodos de diseño además de los aquí estudiados, así como otros escenarios distintos. Podrían incluso evaluarse casos distintos a las viviendas, como oficinas, estaciones, aeropuertos, hoteles, discotecas, museos, centros comerciales y demás, siempre que se obtengan los parámetros de entrada del modelo desarrollado aquí, para esos tipos de obras civiles. Se podrían plantear también estudios de demandas en regiones particulares, obteniendo los parámetros de entrada del modelo específicos para dichas regiones y tomando como escenarios las edificaciones típicas de esas zonas. Una gran mejora que podría tener la aplicación de la metodología desarrollada, consiste en utilizar algún lenguaje de programación más complejo y veloz, así como emplear mejoras en los algoritmos para que se ejecuten las simulaciones en tiempos menores.



## 7 Referencias bibliográficas

AENOR (2008). Norma UNE 149201: 2008. Abastecimiento de agua. Dimensionado de instalaciones de agua para consumo humano dentro de los edificios.

AFNOR (1988). Règles de calcul des installations de plomberie sanitaire et des installations d'évacuation des eaux pluviales. Documents Techniques Unifiés sur les réseaux d'eaux immobilières.

Bereciartua, P. (2003). Vulnerabilidad de Aguas Subterráneas a la Contaminación. Gestión Ambiental de los Recursos Hídricos–Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. Argentina. [http://materias.fi.uba.ar/6911/vulnerabilidad\\_gw.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6911/vulnerabilidad_gw.pdf).

Blokker, E. J. M. (2006). Modelleren van afnamepatronen; beschrijving en evaluatie van simulatiemodel SIMDEUM. Kiwa NV, Nieuwegein.

Blokker, E. J. M. (2010). Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks.

Blokker, E. J. M., Vreeburg, J. H. G., & Vogelaar, A. J. (2008). Combining the probabilistic demand model SIMDEUM with a network model. In Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006 (pp. 1-11).

Buchberger, S. G., & Wells, G. J. (1996). Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 11-19.

Carmona, R. P. (2015). Instalaciones hidrosanitarias, de gas y de aprovechamiento de aguas lluvias en edificaciones. Ecoe Ediciones.

Garzón, A. J. (2014). Evaluación patrones de consumo y caudales máximos instantáneos de usuarios residenciales de la ciudad de Bogotá (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).

Gleick, P. H. (1996). Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. *Water international*, 21(2), 83-92.

Hunter, R. B. (1940). Methods of estimating loads in plumbing systems. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.

Lacasta, A., Morales, M., Tejero, M., Burguete, J., Brufau, P., & García, P. (2015). Calibración y simulación de un sistema regulado de suministro de agua a través de técnicas de Monte Carlo. *Ingeniería del agua*, 19(3), 117-133.

Ladino, N. Y. C., Garzón, J. E. G., & Mosquera, R. O. O. (2006). Aplicación de los métodos para el cálculo de caudales máximos probables instantáneos, en edificaciones de diferente tipo.

López, G. (2016). Análisis y caracterización de las instalaciones interiores de suministro de agua desde el punto de vista de ahorro (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia).

Ministerio de Fomento (2017). Código Técnico de la Edificación Documento Básico Suministro de Agua. Acciones de la Edificación. Gobierno de España.

Ministerio de Industria (1975). Normas Básicas para las instalaciones interiores de suministro de agua (NIA). Gobierno de España.

Moreno, L. F. T. (2008). El acceso al agua potable como derecho humano. Comisión Nacional de los Derechos Humanos.

Pardo, E., & Rodríguez, F. J. (2013). Análisis espectral de series temporales de variables geológicas con muestreo irregular. *Boletín Geológico y Minero*, 124(2), 319-333.

Peña, D. (2001). Deducción de distribuciones: el método de Monte Carlo. *Fundamentos de Estadística*. Alianza Editorial, Madrid. pp, 220-300.

Robayo, J. A. G. (1998). Hidráulica en edificaciones. Universidad Nacional de Colombia.

Roca, M. & Carratalá, J. (2002). Manual de Fontanería. Editorial CA. España.

Rodríguez, L. J. (2011). Simulación, método de Montecarlo.

Sanchez, C. (2018). Cuantificación de la incertidumbre en flujos geofísicos mediante el uso de esquemas de volúmenes finitos Monte Carlo multi-nivel.

Vázquez, R. F. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano.