



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería
Hidráulica y Medio
Ambiente

Título del Trabajo Fin de Máster:

***MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA
DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES
PUNTA DE AGUAS RESIDUALES EN
EDIFICIOS DE VIVIENDAS***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

CAICEDO LONDOÑO, MARIA ALEJANDRA

Director/es:

DR. ARREGUI DE LA CRUZ, FRANCISCO

Fecha: **05 SEPTIEMBRE, 2011**



Título del Trabajo Fin de Máster:

MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES PUNTA DE AGUAS RESIDUALES EN EDIFICIOS DE VIVIENDAS

Autor: **CAICEDO LONDOÑO, MARIA ALEJANDRA**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	FRANCISCO ARREGUI DE LA CRUZ	Fecha de Lectura	SEP, 2011
Codirector1			
Codirector2			
Tutor	<NOMBRE Y APELLIDOS>		

Resumen:

El diseño eficaz de un sistema de saneamiento se debe realizar en base a un modelo matemático capaz de predecir con alta precisión, la carga máxima que deben soportar estos sistemas. En general, el comportamiento hidráulico de una red de saneamiento, puede ser bien caracterizado si se cuenta con mediciones directas de los caudales circulantes por la red. Sin embargo, de momento existe una inviabilidad técnica de medir dichos caudales con una suficiente exactitud y frecuencia de muestreo, haciéndose imprescindible buscar alternativas que permitan aproximarse a las condiciones reales de operación de los sistemas de saneamiento.

Tradicionalmente, los parámetros de diseño se basan en recomendaciones técnicas y especificaciones estipuladas en las normas básicas y códigos técnicos para las instalaciones interiores de evacuación de agua, basados en métodos empíricos, y que utilizan principalmente el criterio y experiencia de los diseñadores. Si bien estos planteamientos han resultado adecuados para evitar que las redes colapsen por sobrepasar su capacidad hidráulica, es incorrecto pensar que están funcionando de manera adecuada. En muchos casos estos sistemas están claramente sobredimensionados y resulta conveniente buscar alternativas, como la que se presenta en este trabajo de investigación, que permitan optimizar el diseño de estos sistemas.

La metodología propuesta en esta tesina parte de la caracterización individual del consumo doméstico en edificios de viviendas. Pautada inicialmente por una serie de mediciones con escala temporal de un segundo realizadas para un estudio previo desarrollado en el ITA, dichas mediciones fueron posteriormente discriminadas en pulsos de consumo, utilizando una herramienta informática específica, la cual facilitó la identificación de las variables que definían cada tipo de consumo. Subsiguientemente, utilizando una serie de procesos aleatorios y empleando técnicas estadísticas, se han generado series sintéticas de consumo mediante la identificación de las funciones de distribución de probabilidad que mejor reproducen en el tiempo las variables anteriormente mencionadas y que en la mayor parte se han supuesto como independientes entre sí.

Las series sintéticas de consumo se convierten posteriormente en series de descargas a la red de saneamiento de los aparatos domésticos, logrando de esta manera obtener una función de distribución de probabilidad que reproduce fidedignamente los caudales circulantes por las tuberías de desagüe en función del número de viviendas



ABSTRACT

The successful design of a sewer system must be based in a mathematical model able to predict, with high accuracy, the maximum flow that is conveyed by these systems. In general, the hydraulic behaviour of a sewer system, can be well characterised if there are direct measurements of the flows in the system. Nevertheless, actually there are technical constraints to measure this discharges with enough precision and frequency, leading to alternatives that can approximate the real operational conditions of sewer systems.

Traditionally, the design parameters are based in technical recommendations and specifications, stipulated in the basic rules and technical guides and codes for indoor installations of water disposal systems, based in empirical methods, which mostly uses as a resource the experience and criteria from designers. Considering that so far, this statements have been enough to prevent surcharges, is incorrect to think that are properly operated. In most of cases, these systems are over designed and it is convenient to search alternatives, such as the one presented in this research project, that allow to optimise the design of these systems.

The methodology proposed in this thesis starts in the individual characterisation of the residential consumption in households buildings. This characterisation were done the continuous measurement of water consumption, achieved in another study conducted in the ITA, these measurements were discriminated in consumption pulses, using an specific computational tool, which enable the identification of the variables that generate the consumption itself. Afterwards, using series of random processes and statistical tools, there were generated synthetic series of consumption by the identification of the probability distribution functions that were more suitable for modelling the previously described variables, considering that each variable has no correlation with the others in the process.

The consumption synthetic series are processed and converted in the sanitation discharge series of the different uses, achieving in this way, to obtain a probability distribution function that accurately reproduces the waste water flow, depending on the number of households



RESUM

El disseny eficaç d'un sistema de sanejament s'ha de realitzar sobre la base d'un model matemàtic capaç de predir amb alta precisió, la càrrega màxima que han de suportar aquests sistemes. En general, el comportament hidràulic d'una xarxa de sanejament, pot ser ben caracteritzat si es conta amb mesuraments directes dels cabals que circulen per la xarxa. No obstant això, de moment existeix una inviabilitat tècnica d'amidar aquests cabals amb una suficient exactitud i freqüència de mostreig, fent-se imprescindible cercar alternatives que permeten aproximar-se a les condicions reals d'operació dels sistemes de sanejament.

Tradicionalment, els paràmetres de disseny es basen en recomanacions tècniques i especificacions estipulades en les normes bàsiques i codis tècnics per a les instal·lacions interiors d'evacuació d'aigua, basats en mètodes empírics, i que utilitzen principalment el criteri i experiència dels dissenyadors. Si bé aquests plantejaments han resultat adequats per a evitar que les xarxes col·lapsen per sobrepassar la seua capacitat hidràulica, és incorrecte pensar que estan funcionant de manera adequada. En molts casos aquests sistemes estan clarament sobredimensionats i resulta convenient cercar alternatives, com la qual es presenta en aquest treball d'investigació, que permeten optimitzar el disseny d'aquests sistemes.

La metodologia proposada en aquesta tesina parteix de la caracterització individual del consum domèstic en edificis d'habitatges. Començant inicialment per una sèrie de mesuraments amb escala temporal d'un segon realitzades per a un estudi previ desenvolupat en el ITA, aquests mesuraments van ser posteriorment discriminades en polsos de consum, utilitzant una eina informàtica específica, la qual va facilitar la identificació de les variables que definien cada tipus de consum. A continuació, utilitzant una sèrie de processos aleatoris i emprant tècniques estadístiques, s'han generat sèries sintètiques de consum mitjançant la identificació de les funcions de distribució de probabilitat que millor reproduïxen en el temps les variables anteriorment esmentades i que en la major part s'han suposat com independents entre sí.

Les sèries sintètiques de consum es converteixen posteriorment en sèries de descàrregues a la xarxa de sanejament dels aparells domèstics, assolint d'aquesta manera obtindre una funció de distribució de probabilitat que reproduïx fidedignament els cabals que circulen per les canonades de desguàs en funció del nombre d'habitatges.

Palabras clave:

Caracterización de la demanda de agua, usos finales del consumo, procesos estocásticos, series sintéticas de descargas, funciones de probabilidad y caudales punta de saneamiento.

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	6
1.1	Objetivos.....	8
1.2	Motivación.....	9
2	Antecedentes y marco de referencia	10
3	Metodología para la determinación de los caudales punta de aguas residuales en edificios de vivienda	15
3.1	Introducción.....	15
3.2	Fase I: Recolección de datos y determinación de los usos finales de agua.	20
3.3	Medición y análisis de los datos de consumo.....	20
3.4	Caracterización de la demanda en pulsos de consumo.....	26
3.4.1	Descripción del software empleado para la caracterización de la demanda.....	28
3.4.2	Conclusiones de la caracterización de la demanda	29
3.5	Fase II: Generación de un modelo estocástico para la determinación de las descargas de aguas negras a la red de evacuación de aguas domiciliari..	35
3.6	Introducción.....	35
3.7	Determinación del volumen total de una vivienda y día.....	36
3.8	Distribución del volumen total entre cada uno de los usos.....	39
3.8.1	Porcentaje de consumo asignado a cisternas.....	39
3.8.2	Porcentaje de volumen asignado a grifos.....	41
3.8.3	Porcentaje de volumen asignado a duchas.....	42
3.8.4	Porcentaje de volumen asignado a lavadoras.....	44
3.8.5	Porcentaje de volumen asignado a lavavajillas.....	45
3.8.6	Determinación del volumen aleatorio asignado a cada uso final....	48
3.9	Generación de pulsos de descarga para cada uso final.....	49
3.9.1	Descargas generadas por el uso de cisternas.....	49
3.9.2	Descargas generadas por grifos.....	55
3.9.3	Caudal de descargas generadas por las duchas.....	60
3.9.4	Descargas generadas por las lavadoras.....	65
3.9.5	Descargas generadas por lavavajillas.....	69
3.9.6	Caudal punta de diseño y probabilidad de no superarlo.....	71



4 Análisis de los caudales de descarga para el diseño de los sistemas Sanitarios	72
4.1 Introducción.....	72
4.2 Análisis de los resultados: Validación de la metodología propuesta.....	75
4.2.1 Comparación de la curva de modulación del volumen total real y Modelado.....	75
4.2.2 Patrón de comportamiento de las descargas de los grifos.....	79
4.2.3 Patrón de comportamiento de las duchas.....	81
4.2.4 Análisis del patrón de comportamiento de las cisternas.....	82
4.2.5 Patrón de comportamiento de las lavadoras.....	83
4.2.6 Patrón de comportamiento de los lavavajillas.....	84
4.3 Caudal punta de aguas residuales en edificios de vivienda, para un periodo de retorno de un año.....	85
4.3.1 Caudales máximos laminados en intervalos de 10 segundos.....	85
4.3.2 Caudales máximos laminados cada 30 segundos.....	87
4.3.3 Caudales máximos laminados cada 60 segundos.....	89
4.3.4 Caudales máximos laminados cada hora.....	90
4.4 Función de distribución de probabilidad de los caudales punta para un periodo de retorno de hasta 100 años.....	94
4.5 Coeficientes de escala temporal de los caudales punta.....	98
5 Comparativa con otros criterios de dimensionado	103
5.1 Introducción.....	103
5.2 Contraste de los resultados con la normativa española para la evacuación de aguas residuales.....	103
5.2.1 Dimensionado del colector para un edificio de 20 viviendas.....	109
5.2.2 Dimensionado del colector para un edificio de 10 y 40 viviendas.....	111
5.3 Comparativa del caudal simultaneo con la norma afnor (francesa).....	113
6 Conclusiones	117
7 Desarrollos futuros	121
8 Referencias bibliográficas	123



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Localización de las fincas monitorizadas en el estudio	21
Figura 3-2: Instalación típica de un contador.....	22
Figura 3-3: Pantalla del contador	22
Figura 3-4: Conexión de los equipos con el sistema de transmisión de datos ...	23
Figura 3-5: Instantes de consumo en una vivienda para una hora suministro....	25
Figura 3-6: Pulsos rectangulares de consumo	26
Figura 3-7: Forma que representa una cisterna típica.....	27
Figura 3-8: Forma que representa una ducha típica	28
Figura 3-9: Forma que representa una lavadora y un lavavajilla.....	28
Figura 3-10: Interfaz gráfica del software utilizado en la caracterización de la demanda	29
Figura 3-11: resultado de la caracterización de la demanda	31
Figura 3-12: Curva de modulación promedio de las viviendas monitorizadas ...	32
Figura 3-13: Curva de modulación para el uso de cisternas	32
Figura 3-15: Curva de modulación para el uso de grifos.....	33
Figura 3-17: Curva de modulación para el uso de lavavajillas	33
Figura 3-18: histograma del Volumen Total diario.....	37
Figura 3-19: Función de distribución del Volumen Total diario	37
Figura 3-20: histograma de frecuencias (% $V_{cisternas}$).....	40
Figura 3-21: Función de distribución GAMMA (% $V_{cisternas}$).....	41
Figura 3-22: histograma de frecuencias (% V_{Grifos}).	41
Figura 3-23: Función de distribución Weibull (% V_{grifos})	42
Figura 3-24: histograma de frecuencias (% V_{duchas}).....	43
Figura 3-26: histograma de frecuencias (% $V_{lavadora}$)	44
Figura 3-27: Función de distribución Gamma (% $V_{lavadora}$).....	45
Figura 3-29: Función de distribución Lognormal (% $V_{lavavajilla}$)	46
Figura 3-30: Histograma de frecuencia ($V_{cisternas}$)	52
Figura 3-31: Función de distribución Lognormal ($V_{cisternas}$)	52
Figura 3-32: Diagrama de flujo para encontrar el caudal de aguas residuales de cisternas	54
Figura 3-33: Histograma de frecuencias (V_{grifos})	56
Figura 3-35: Histograma de frecuencias (Q_{grifos}).....	57
Figura 3-36: Función de distribución weibull (Q_{grifos}).....	58
Figura 3-37: Diagrama de flujo para encontrar el caudal de aguas residuales de grifos.....	59
Figura 3-38: Histograma de frecuencias (V_{duchas})	60
Figura 3-39: Función de distribución gamma (V_{Duchas}).	61
Figura 3-40: Histograma de frecuencias (Q_{duchas}).	62
Figura 3-42: Curva de modulación del uso de duchas en una vivienda/día.....	63



Figura 3-43: Diagrama de flujo para encontrar el caudal de aguas residuales de duchas.....	64
Figura 3-44: Duración de cada ciclo en función del programa seleccionado. FAGOR.....	66
Figura 3-45: Diagrama de flujo para encontrar el caudal de saneamiento de lavadoras.....	68
Figura 3-46: Diagrama de flujo para encontrar el caudal de saneamiento de lavavajillas	70
Figura 4-1: Curva de modulación real y simulada para 5000 viviendas.....	77
Figura 4-2: Coeficientes de modulación del comportamiento de consumo los coeficientes de modulación del comportamiento de las descargas	78
Figura 4-3: Curva de modulación de grifos (real y simulada)	80
Figura 4-4: Curva de modulación de las duchas (real y simulada).....	81
Figura 4-5: Curva de modulación de cisternas (real y simulada).....	82
Figura 4-6: Curva de modulación de lavadoras (real y simulada)	83
Figura 4-7: Curva de modulación de lavavajillas (real y simulada).....	84
Figura 4-8: Probabilidad de ocurrencia de los caudales punta, laminados 10 segundos	86
Figura 4-9: Probabilidad de ocurrencia de los caudales punta, laminados 30 segundos.....	88
Figura 4-10: Probabilidad de ocurrencia de los caudales punta, laminados 60 segundos.....	90
Figura 4-11: Probabilidad de ocurrencia de los caudales punta, laminados 3600 segundos.....	91
Figura 4-12: Porcentaje de inactividad del sistema en función del número de viviendas considerando todos los intervalos de tiempo.	93
Figura 4-13: Histograma de frecuencia de los caudales punta de aguas residuales	94
Figura 4-14: Función de distribución de los caudales punta de aguas residuales para 20 viviendas.....	95
Figura 4-15: Caudales punta con un periodo de retorno de 100 años, en función del número de viviendas.....	97
Figura 4-16: Comportamiento de la desviación estándar de los caudales punta.....	98
Figura 4-17: Variación de los caudales punta, en función del intervalo de tiempo	100
Figura 4-18: Ajuste de los parámetros A y B para calcular los coeficientes de escala temporal de caudales punta.....	101
Figura 5-1: Curva de simultaneidad modelizada a partir de las tablas de dimensionamiento del CTE (Romero y Arrué (2008)).....	104
Figura 5-2: Caudales de diseño encontrados mediante el CTE y (Romero y Arrué (2008)).....	108



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Coeficientes de simulación de las viviendas monitorizadas.....	76
Tabla 4-2: Coeficientes de simulación de las viviendas simuladas	76
Tabla 4-3: Caudales punta en función del número de viviendas y la probabilidad de ocurrencia de un caudal inferior en un intervalo de tiempo de 10 segundos.....	86
Tabla 4-4: Caudales punta en función del número de viviendas y la probabilidad de ocurrencia de un caudal inferior en un intervalo de tiempo de 30 segundos	88
Tabla 4-6: Caudales punta en función del número de viviendas y la probabilidad de ocurrencia Laminado 3600 segundos.....	91
Tabla 4-7: Parámetros de ajuste a la función Lognormal de los caudales punta de aguas residuales a una función de distribución y probabilidad de no excedencia a 95% y 99% de confiabilidad.	96
Tabla 4-8: Caudales punta para una simulacion y un periodo de retorno de un año.....	99
Tabla 4-9: Coeficientes de escala temporal de los caudales punta	102
Tabla 5-1: UD correspondientes a los distintos aparatos sanitarios (CTE)	105
Tabla 5-2: Diámetro de colectores horizontales en función del número	106
Tabla 5-3: Caudales en función del diámetro y las unidades de descarga propuestos por el CTE, para un colector trabajando a ½ del diámetro nominal.....	107
Tabla 5-4: Caudales en función del diámetro y las unidades de descarga propuestos por el CTE, para un colector trabajando a ¾ del diámetro nominal.....	107
Tabla 5-5: Caudales en función del diámetro y las unidades de descarga propuestos por Romero y Arrué (2008) para edificios con más de 3 plantas.....	108
Tabla 5-6: UD correspondientes a los distintos aparatos sanitarios, vivienda tipo D	109
Tabla 5-7: Diseño de un colector de 20 viviendas).....	110
Tabla 5-8: Diseño de un colector de 10 viviendas (Romero y Arrué (2008)).	111
Tabla 5-9: Diseño de un colector de 10 viviendas trabajando a ½ del diámetro	111
Tabla 5-10: Diseño de un colector de 40 viviendas (Romero y Arrué (2008)).	111
Tabla 5-11: Diseño de un colector de 40 viviendas (método propio)	112
Tabla 5-12: Caudales de saneamiento para aparatos de viviendas tipo D.....	115
Tabla 5-13: Diseño del colector para 20 viviendas (Método de los caudales)..	115
Tabla 5-14: Comparativa de métodos para el diseño de un colector trabajando a media sección en edificios de vivienda.....	116



1 INTRODUCCIÓN

Los modelos para el dimensionado de los sistemas hidráulicos, tanto de distribución como de evacuación de agua, deben tener como principal objetivo proporcionar soluciones que respondan de forma adecuada y eficiente a las situaciones reales y operativas, garantizando una adecuada prestación del servicio. Es por tal motivo que actualmente crece el interés en realizar un preciso ajuste de dichos modelos, con el fin de alcanzar un mayor nivel de detalle de las condiciones reales de consumo; a través del uso de técnicas y recursos de modelado más ajustados a la realidad del proceso.

Bajo las anteriores premisas, es necesario establecer que existe una clara diferencia entre la modelación de la demanda del consumo de agua y la del saneamiento, en edificios residenciales. Dado que para el consumo, diversos autores han propuesto metodologías que utilizan procesos estocásticos para reproducir dicho consumo, en variables aleatorias que se desarrollan a lo largo del tiempo; mientras que para la modelación de caudales de saneamiento, actualmente la bibliografía no hace referencia a ningún modelo que utilice procesos probabilísticos, para determinar con un alto grado de detalle, el comportamiento de estos caudales punta en el tiempo.

Una vez identificada la necesidad de un modelo probabilístico para la simulación de los caudales punta de saneamiento, se propone en el presente trabajo de investigación, reproducir una serie de eventos aleatorios que generan los caudales punta de aguas residuales, los que a su vez serán modelados como procesos estocásticos. Para ello, se hace imprescindible conocer de antemano el comportamiento de los eventos que inducen a las descargas de saneamiento, basado en la estimación probabilística del consumo demandado, el cual no sería



posible si no se cuenta con un programa de mediciones suficientemente amplio para obtener muestras verdaderamente representativas.

Con la información obtenida de las mediciones es posible caracterizar la demanda entre los diferentes usos, a partir de la creación de series sintéticas que reproducen en el tiempo, las variables más significativas de dicho consumo. Siendo este uno de los grandes aportes del presente trabajo; puesto que para este tipo de investigación, se requiere de herramientas altamente especializadas, que difícilmente se obtiene si no se cuenta con una amplia trayectoria en temas relacionados con hidráulica urbana y el uso eficiente del agua.



1.1 OBJETIVOS

Partiendo del hecho que los modelos hidráulicos con naturaleza estocástica se valen de las leyes del azar o la probabilidad para representar eventos aleatorios, se propone una metodología que permite establecer la función de distribución de probabilidad que mejor reproduce los caudales máximos circulantes por el sistema de drenaje. El fin último es obtener una herramienta que permite entre otros estudios, optimizar el diseño hidráulico de los sistemas de saneamiento en edificios de viviendas.

Para ello, se determinarán las funciones de distribución de probabilidad que describen el consumo doméstico. Encontrando los parámetros de ajuste tanto para el volumen total consumido en una vivienda y día, como el porcentaje de volumen asignado entre los diferentes aparatos (cisternas, grifos, duchas, lavadora y lavavajilla). Además, se establecerá la función de distribución de probabilidad que mejor reproduzca el volumen de las cisternas, los grifos y las duchas; así como el caudal consumido por los grifos y las duchas, al ser el consumo de estos aparatos completamente aleatorio.

Con los resultados del modelo estocástico relativos al caudal punta, se realizará una comparación con los métodos de diseño propuestos por la normativa española (Código Técnico de la Edificación, apartado HS-5; Evacuación de aguas) y la normativa Francesa (AFNOR). Esta comparación permite determinar la calidad del dimensionado de los sistemas de evacuación de agua en los edificios de viviendas diseñados según los métodos vigentes actualmente.



1.2 MOTIVACIÓN

Existe un interés creciente en desarrollar modelos hidráulicos que permitan conocer en detalle el comportamiento de las redes de distribución. De esta manera se pueden llevar a cabo planes de gestión (por parte de las empresa de abastecimiento de agua), puesto que al conocer con un alto grado de precisión cómo se consume el agua por parte de cada abonado, es posible detectar el volumen fugado (perdidas físicas y aparentes), minimizar el error de medición, buscando siempre dimensionar adecuadamente los contadores, así como poner en marcha planes y medidas de uso eficiente de agua. Siendo este un tema de gran auge, debido que no solo se busca modificar los hábitos de los consumidores, sino también desarrollar nuevas tecnologías, como es el caso de los dispositivos de bajo consumo.

Hasta la fecha se han realizado notables esfuerzos en cuanto a distribución de agua se refiere, encontrándose en la literatura numerosas referencias bibliográficas que soporten este hecho. Sin embargo, son deficientes las referencias que hacen alusión a modelos ó metodologías que permitan una estimación aproximada de asignación de cargas, para el dimensionado de las redes de saneamiento en instalaciones interiores. Considerándose necesario elaborar un modelo, partiendo de datos de mediciones de consumo de agua y, tras el análisis de la distribución de este consumo, generar una serie de simulaciones que permiten estimar la distribución del caudal punta en el tiempo, para un determinado número de viviendas. Creando una herramienta que permite obtener entre otro estudios, un adecuado dimensionamiento de las instalaciones para la evacuación de agua en edificios de viviendas, así como optimizar las ya existentes.



2 ANTECEDENTES Y MARCO DE REFERENCIA

El consumo de agua realizado por usuarios individuales es esencialmente una combinación de procesos aleatorios, y por tanto no puede establecerse de manera fiable mediante métodos determinísticos, sino que está gobernado por funciones de distribución de probabilidad. Actualmente existen diversos modelos que se han propuesto por autores en todo el mundo, los cuales han recurrido principalmente a la naturaleza estocástica del consumo de agua para simular y representar el comportamiento de la demanda en pequeñas redes de distribución, como las instalaciones interiores en edificios de viviendas.

Entre los trabajos más representativos se puede nombrar a *Butler y Graham (1995)*, quienes definieron la probabilidad de uso de un aparato (cisternas, grifos, lavadoras, etc.) relacionándola con el tiempo que dichos consumos están activos. A partir de este planteamiento asumen una distribución binomial para definir el número de aparatos activos simultáneamente y calcularon la probabilidad de que un número determinado de aparatos (n) estén funcionando simultáneamente en un número determinado de viviendas (N). Finalmente, los autores asumieron que el comportamiento de todos los aparatos sigue un patrón similar, representados por una misma función de probabilidad (distribución binomial). Por tanto, el caudal de diseño, será el caudal medio de los N aparatos conectados al sistema.

Por otro lado *Jankovic-Nisic et al. (2001)* realizaron un aporte a este trabajo, midiendo los consumos domésticos de la misma red de estudio. De esta manera, en lugar de asumir que todos los aparatos consumen un único caudal, encontraron una función de distribución que representará el consumo y su probabilidad de ocurrencia.



Con respecto a la modelación de cargas de saneamiento, *Kiya y Murakawa (1989)* distinguieron claramente dos métodos para la determinación de la carga de diseño en edificios, el método de simulación y el método de probabilidad. Ambos métodos están basados en la hipótesis de que las tasas de llegada, es decir, la frecuencia a la cual los usuarios demandan agua, sigue una distribución de Poisson. Posteriormente, estos autores corroboraron esta hipótesis mediante la recolección de una cantidad significativa de datos sobre consumo de agua en diferentes edificios.

Buchberger y Wells (1996), monitorizaron la demanda de agua en cuatro viviendas unifamiliares durante un período igual a 365 días. Posteriormente modelaron este proceso mediante una función discreta de Poisson, y la convirtieron en pulsos rectangulares. Sin embargo, encontraron diferencias significativas entre las medias y varianzas del número de pulsos, mucho mayores de lo que esperaban obtener en un procesos de este tipo.

Alternativamente, para la simulación del caudal suministrado existen métodos basados en mediciones reales, cuyo principal objetivo es considerar todas las variables que permiten caracterizar el uso final de la demanda. Estos métodos han sido definidos por *Herrington (1995)* como los *Microcomponentes de la demanda*, el cual se refiere a identificar los diferentes eventos en el que es distribuida el agua que registran los contadores. En este tema, otros autores como *Mayer y DeOreo (1999)* también han publicado metodologías que permiten identificar la manera en la que es consumida el agua por parte de los usuarios.

En estos métodos, la demanda de uso doméstico se puede definir como la combinación resultante de una serie de eventos individuales, que son productos de las necesidades que tienen los usuarios de utilizar el agua. Por tanto, se hace imprescindible un elevado número de mediciones en continuo para diferentes tipos de vivienda, en distintas épocas del año y conociendo a priori la rutina diaria de los consumidores, con el fin de estimar acertadamente los usos finales del agua demanda.



Por otra parte, Gascón, L (2003), propone una metodología para llevar a cabo la medición del consumo de agua e identificar los microcomponentes de la demanda. Así como el grupo de investigación *Ingeniería y Tecnología del Agua de la Universidad Politécnica de Valencia (ITA)* cuenta con una amplia trayectoria de trabajo en este campo, tras haber realizado durante años estudios de este tipo. Dentro de los cuales se han desarrollado herramientas no comerciales que han sido financiadas por empresas como Aguas de Barcelona, Canal de Isabel II (Madrid), entre otras.

Precisamente, uno de los estudios realizados por el ITA con la cofinanciación de la empresa de abastecimiento Canal de Isabel II, fue el denominado "*Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid (2008)*". El objetivo de dicho estudio fue el de determinar el uso que le dan las familias madrileñas al agua que se les suministra y los factores que pueden alterar dicho uso.

En resumen, es claro que el conocimiento detallado de los microcomponentes de la demanda puede constituir una poderosa herramienta para establecer la manera en la que los usuarios consumen el agua en cada vivienda. Por esta razón, cada día son más las empresas que reconocen la necesidad de caracterizar la demanda en sus microcomponentes esenciales con fines de identificar los patrones de consumo, y mejorar con ellos la planificación de la distribución de agua, supliendo siempre las necesidades presentes y futuras de los consumidores.

Ahora bien, aunque los microcomponentes de la demanda es un término que se puede utilizar en múltiples áreas de la gestión y otras previsiones del consumo doméstico, no se ha utilizado hasta la fecha para estimar las descargas a la red de saneamiento de aguas residuales domésticas.

A manera de ejemplo, *Marshallsay (2004)* definió el potencial que tiene conocer las características de los usos finales del agua y sus componentes esenciales. En ellos resalta la utilidad de conocer el comportamiento de la demanda en las horas punta, permitiendo realizar mejores estimaciones de los caudales punta,



para con ello, mejorar significativamente el diseño de las redes domiciliarias tanto para abastecimiento como para saneamiento.

De igual manera, *Cobacho R (2000)* afirma que con un estudio de microcomponentes, es posible determinar la cantidad de agua que es evacuada, así como su variación en diferentes momentos de tiempo.

Expuesto lo anterior, el gran interrogante que surge es: ¿cómo se puede transformar el consumo de agua a descargas a la red de saneamiento?. De momento se han presentado diversas técnicas, propuestas por algunos autores para modelar el consumo de agua en las viviendas, e incluso las técnicas que se están desarrollando para llegar a conocer detalladamente la manera en las que los usuarios utilizan el agua, pero de cara al saneamiento, se presenta un panorama completamente diferente. Esta situación se da debido a que actualmente las técnicas clásicas para diseñar las redes de evacuación de agua en el interior de edificios, se basan en recomendaciones técnicas y especificaciones estipuladas en las normas básicas y códigos técnicos para las instalaciones interiores de evacuación de agua (en España el código técnico de la edificación en su apartado HS 5 - Evacuación de aguas).

En estas normativas los parámetros de diseño se han dejado un poco al criterio y experiencia de los diseñadores, quienes se han basado en la teoría propuesta por *Hunter, R (1940)*, quien introdujo para el diseño de las instalaciones interiores el concepto de unidades de descarga, relacionando con el caudal medio que aporta un determinado aparato cuando está en operación. Desde entonces, este método y algunas variaciones al mismo, como las presentadas por *Romero y Arrué (2008)* quienes incorporan al método una ecuación que considera el evento de simultaneidad entre el uso de aparatos, se han convertido hasta el momento en el marco teórico y el sustento de la gran mayoría de normas y códigos existentes para el diseño de los sistemas de saneamiento. Razón por la cual surge la necesidad de verificar si los planteamientos anteriormente expuestos, dimensionan adecuadamente los sistemas de evacuación de aguas, o



por el contrario se hace necesaria una propuesta que optimice estos diseños, basada en datos reales de consumo de agua.



3 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES PUNTA DE AGUAS RESIDUALES EN EDIFICIOS DE VIVIENDA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se presenta el procedimiento seguido para la estimación de los caudales punta de aguas residuales en edificios de vivienda. Dicho procedimiento se ha estructurado en tres fases claramente diferenciadas. La primera de ellas corresponde a la recolección y medición de los consumos de agua en viviendas, así como la segunda, corresponde al almacenamiento y procesamiento de estos datos. En este estudio se ha optado, como punto de partida, por la medición de los caudales suministrados a las viviendas y no por la medición directa de los caudales circulantes por la red de saneamiento. Esta última opción no se ha planteado por dos motivos: el primero y principal tiene que ver con la inviabilidad técnica de medir dichos consumos con la suficiente exactitud y frecuencia de muestreo. El segundo está relacionado con la disponibilidad de información detallada sobre caudales suministrados a viviendas de un estudio anterior desarrollado en el ITA, lo cual reducía tanto el coste económico del trabajo como el tiempo requerido para llevarlo a cabo.

El procesado de las mediciones, realizado como se ha mencionado en un trabajo previo, comprendió una primera etapa de depuración de datos, donde se eliminaron posibles errores en la lectura de los contadores, y continuó con una segunda etapa en la que se analizó cada uso de agua y asignándose a aparatos concretos dentro de la viviendas. Esta discriminación de usos del agua entre los diferentes aparatos es la que se conoce en la bibliografía técnica como



discriminación de usos finales. En este punto conviene resaltar que la obtención de datos reales de consumo en continuo, con una resolución cercana a un segundo, no es una tarea fácil, y de hecho, hasta el momento, esta ha sido una de las limitaciones para llevar a cabo estudios como el que se presentan en este trabajo de investigación.

Esta primera fase en la que se discrimino la demanda de agua en el ámbito residencial en sus componentes esenciales, se ejecutó entre el año 2001 y el 2003, en la cual el ITA, en cooperación con la empresa de abastecimiento Canal Isabel II de Madrid, realizó un estudio sobre *“Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico en la Comunidad de Madrid” (2008)*. Dicho estudio se inició con una valoración inicial de las variables explicativas del consumo mediante la realización de encuestas. Los resultados de estas encuestas permitieron seleccionar la muestra de las viviendas que se debían monitorizar, cómo centrar el análisis en las variables que, a priori, se mostraban más significativas. La monitorización en las viviendas seleccionadas se llevó a cabo mediante la instalación de contadores electrónicos y concentradores con una alta capacidad de almacenamiento. Los concentradores eran capaces de muestrear a los contadores con una frecuencia de un segundo, es decir, se obtuvo información del volumen totalizado por los mismos y del caudal circulante en cada instante en intervalos de un segundo.

La información almacenada sobre los consumos se analizó mediante un software específico no comercial, desarrollado en el ITA para llevar a cabo este trabajo. Dicho software permite asignar cada pulso de consumo a cada uno de los diferentes aparatos existentes en las viviendas. El resultado del análisis de cada vivienda se guardó en una base de datos individual que posteriormente se agregó a la base de datos definitiva, que incluía los resultados relevantes de todas las viviendas monitorizadas.

La información compilada fue sometida a un tratamiento estadístico con el fin de abordar la segunda fase del estudio. No obstante, recordando el objetivo del presente trabajo de investigación, es determinar las cargas hidráulicas del



sistema de saneamiento, se observa la necesidad de convertir los pulsos de consumo en descargas a la red de saneamiento. Esta transformación es diferente para cada uno de los aparatos de consumo. Para facilitar el análisis se crea una nueva base de datos que describe los caudales descargados a la red de saneamiento, con el mismo detalle que se tenía la base de datos original sobre consumos.

En este análisis tanto el consumo de agua como las descargas de cada aparato, se caracteriza por medio de un conjunto de variables aleatorias. En concreto, para el volumen de agua que se consume en una vivienda, se utilizan seis variables aleatorias: volumen total utilizado y distribución porcentual de este volumen, en el uso de cada aparato (5 aparatos). En cuanto al consumo de agua demandado por cada aparato, es caracterizado con cuatro variables aleatorias: caudal de descarga, duración, volumen descargado y distribución temporal a lo largo del día del consumo.

La caracterización del consumo mediante variables aleatorias, que en la mayor parte se han supuesto independientes, permite la generación de una serie sintética de descargas a la red de evacuación de aguas. Agrupando un número dado de series sintéticas, es posible determinar el caudal punta que se genera, como una determinada probabilidad de no ser superado en un periodo de retorno dado y un concreto número de viviendas.

Resumiendo, la metodología propuesta se estructura de la siguiente manera:

- Fase I: Medición de los consumos de agua en viviendas. Análisis y discriminación de los volúmenes de agua por aparatos (discriminación en microcomponentes).
- Fase II: Transformación de los caudales suministrados a las viviendas en caudales descargados a la red de evacuación de aguas residuales. Definición de una serie de variables aleatorias que permiten caracterizar dichas descargas. Ajuste de las funciones de probabilidad asociadas a cada variable aleatoria utilizando la serie de datos almacenada en la base de datos procedente de las mediciones.



- Fase III: Generación de series sintéticas de descargas a la red de saneamiento. La agrupación de dichas series sintéticas permite establecer los caudales punta de un número de viviendas.



Metodología para la determinación de los caudales punta de aguas residuales en edificios de vivienda

FASE 1

Objetivo: Medir la demanda y caracterizarla en pulsos de consumo

Medición del consumo de agua en viviendas
Análisis y discriminación de los volúmenes de agua por aparatos (discriminación en microcomponentes)



Caracterización de la demanda

Mediante una herramienta informática específica, se clasifica el consumo de agua entre los diferentes microcomponentes. De este modo se conoce qué uso ha generado cada pulso de consumo



Volumen, caudal y duración de cada pulso de consumo

Se encuentra el volumen, la duración y el caudal generado en cada pulso de consumo

FASE 2

Los consumos de agua se transforman en caudales descargados a la red de evacuación, cuya transformación difiere según el caso

3.2 FASE I: RECOLECCIÓN DE DATOS Y DETERMINACIÓN DE LOS USOS

FINALES DE AGUA

3.3 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CONSUMO

Distribuir la demanda en sus componentes esenciales y llegar hasta sus usos finales es una tarea ardua que requiere, no solo la instalación de un determinado número de contadores de tecnología y características metrológicas específicas, si no también poder relacionar las mediciones con las características más determinantes de los usuarios, sus instalaciones y hábitos de consumo. Partiendo de esta idea, en el caso de estudio de la comunidad de Madrid, se realizó en primera instancia una serie de encuestas en la que se determinaron las características más representativas de los usuarios, y se analizó el consumo de agua facturado en años anteriores respecto a diversas variables tales como: la antigüedad de los edificios, el tipo de instalaciones de fontanería, la superficie, el número de ocupantes, entre otros. Esta discriminación permitió cubrir el mayor espectro posible de las distintas tipologías de usuarios que se pueden encontrar en la Comunidad de Madrid.

Respecto a la descripción de la muestra, en total, se monitorizaron 292 viviendas repartidas entre 14 fincas en distintos puntos de la Comunidad de Madrid, teniendo en cuenta que la muestra fue seleccionada de forma que fuera estadísticamente representativa de las viviendas encuestadas, y que cubriese aquellas variables que fueron identificadas como esenciales a la hora de definir las pautas de consumo. También es importante resaltar que todas las viviendas pertenecientes a la muestra son de uso principal y ninguna de ellas corresponde a una segunda residencia, con ocupación estacional. En la figura 3-1 se presenta un mapa con la ubicación de cada una de los edificios considerados en el estudio.



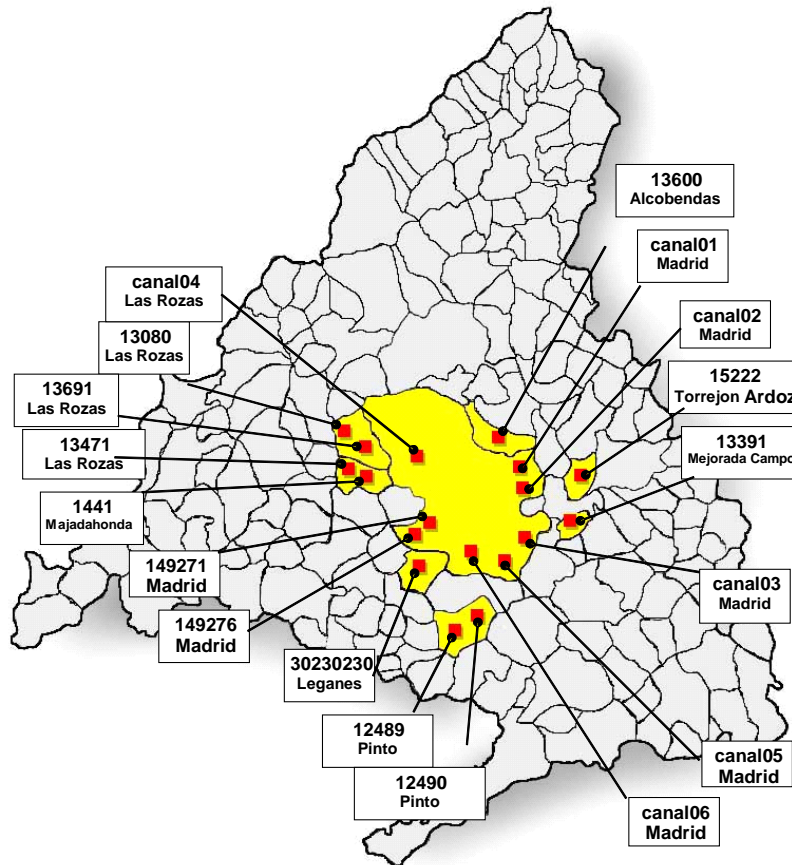
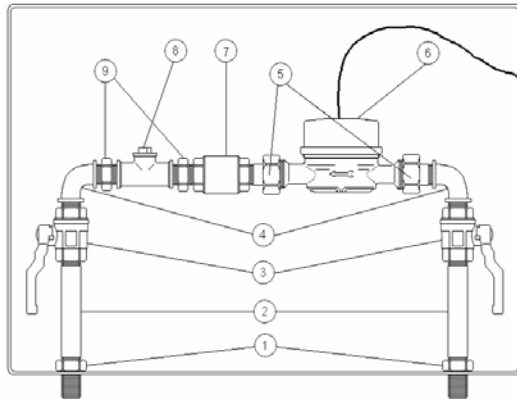


FIGURA 3-1: LOCALIZACIÓN DE LAS FINCAS MONITORIZADAS EN EL ESTUDIO

Para la medición de los consumos se emplearon contadores electrónicos de chorro único Clase C, denominados ETK – EAM y MTK – EAM de la marca Wehrle®. En cuanto a la comunicación entre los contadores y los equipos de almacenamiento (concentradores) se realizó gracias a una conexión mediante BUS de datos, utilizando el sistema METROCON. Otro aspecto importante en la descripción de los equipos está relacionado con su capacidad para obtener y almacenar información masivamente, de forma rápida, fiable y capaz de soportar la monitorización en continuo y simultánea de los consumos de agua en las diversas viviendas.

En cuanto a la instalación de los equipos, la figura 3-2 muestra el esquema típico de una instalación individual.





1. Tuercas de apriete
2. Bobinas roscadas
3. Llaves de corte
4. Codos macho-hembra
5. Recortes
6. Contador digital
7. Válvula de retención
8. Té de comprobación con tapón ciego
9. Machones

FIGURA 3-2: INSTALACIÓN TÍPICA DE UN CONTADOR

La conexión de los contadores al BUS se realizó sin polaridad, mediante cables de telefonía sin apantallar y conectores RJ11 sencillos, utilizando herramientas simples y fáciles de encontrar. En cuanto a la lectura de datos, en la figura 3-3 se representa la información que visualmente se podía obtener de cada uno de los contadores instalados.

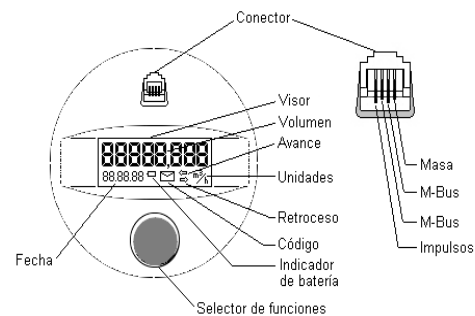


FIGURA 3-3: PANTALLA DEL CONTADOR

Para la transmisión de datos, los contadores se conectaban al controlador, el cual se trata de un MRC2000 M1, mediante un Bus de datos en paralelo, formado por un cable bifilar sin polaridad. El Bus de datos permite topología lineal, en estrella y ramificada, con una longitud total de más de 4.000 m lineales, de forma tal que el cableado sólo está condicionado por la estructura física de la instalación, simplificando enormemente la conexión de contadores distribuidos en diferentes puntos de la instalación o dentro de las viviendas. Cada controlador MCR2000 M1 está conectado con el Centro de Servicio mediante una línea RTB, GSM, Truncking, Radio, o cualquier otro sistema utilizado por un operador de telecomunicaciones, siempre optando por el sistema más apropiado.

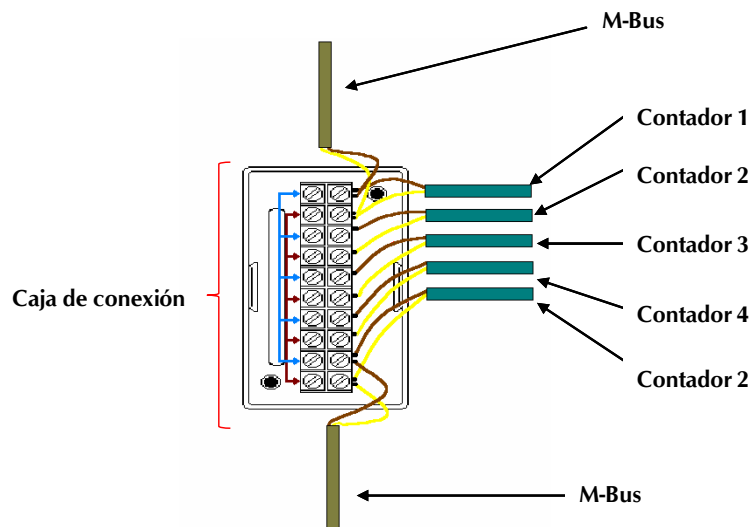


FIGURA 3-4: CONEXIÓN DE LOS EQUIPOS CON EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS

La técnica de monitorización una vez instalados los equipos consistió en medir simultáneamente en continuo, cada segundo, a dos contadores, rotándolos semanalmente entre las viviendas en estudio. De este modo, se obtenía una medida semanal del consumo de agua en cada una de estas viviendas para diferentes meses del año. Dicha medida permitió establecer los patrones que caracterizan los usos del agua y determinar las variables que podían alterar sus comportamientos, tales como: hábitos de los usuarios en función del día de la semana, la hora del día, la tipología de los aparatos, etc.

Es importante resaltar también que para evaluar el efecto de la estacionalidad, y de la influencia de los periodos vacacionales, se contó con medidas en diferentes periodos a lo largo del año, permitiendo evaluar el efecto de las variaciones climáticas.

Por otro lado, el análisis de los datos y la información recogida sobre el consumo de agua durante el estudio, se almacenó y organizó de una forma clara y estructurada en tres diferentes categorías. Estas categorías fueron definidas en: resultados de las encuestas, calibraciones y monitorizaciones. La necesidad y utilidad de cada una de ellas se expone a continuación:

- **ENCUESTAS:** Estas permitieron recopilar, en una fase inicial del proyecto, información que relaciona las características de las viviendas y los usuarios con



el consumo de agua. Del análisis de dichas encuestas, se llegó a la conclusión de que los siguientes parámetros podían afectar a la demanda de agua: tipo de vivienda, antigüedad de la misma, tamaño (en rangos de superficie), número de habitaciones, cuartos de baño, cuartos de aseo, lavabos y fregaderos, inodoros, bañeras, duchas, frecuencia con que se utilizan las lavadoras y los lavavajillas, presencia de terraza y jardín propio en la vivienda, tipo de riego instalado, superficie del jardín, disponibilidad de piscina propia y volumen aproximado de la misma, número de ocupantes y composición de la unidad familiar. Finalmente, toda esta información se analizó por un grupo de expertos y se almacenó en una base de datos que posteriormente fue cruzada con el resto de información.

- **CALIBRACIÓN:** Se empleó este término para denominar aquellos datos obtenidos al realizar una secuencia ordenada e individual de apertura y cierre de los diferentes aparatos disponibles en las viviendas monitorizadas. El principal objetivo de la calibración fue el de caracterizar el patrón de consumo de cada aparato de manera individual, buscando conocer los siguientes parámetros:

- El patrón caudal-tiempo de llenado de las cisternas, midiendo el volumen real de la descarga. En caso de tratarse de cisternas de descarga interrumpible o de doble descarga se debió realizar dos pruebas: la primera con descarga total y la segunda con media descarga
- El caudal saliente por la bañera/s y la ducha/s.
- El caudal saliente por los grifos. Tanto en agua fría como en agua caliente y mezcla.
- Las curvas de modulación de cada uno de los aparatos, el cual serán indispensables para ubicar temporalmente los pulsos tanto de consumo como de saneamiento.

Pese a las dificultades para la toma de datos, (dado que es necesario ingresar a las viviendas para instalar el equipo de medición, y probar que efectivamente se adquieren los datos de la manera correcta), en general, las calibraciones aportaron el “patrón” particular de cada uno de los aparatos en cada vivienda, por lo que fueron empleadas como herramienta de apoyo en la identificación de



usos. Precisamente, el análisis de la calibración es el primer paso para identificar los pulsos de consumo de cada aparato. La figura 3-5 representa un ejemplo de calibración de una vivienda:

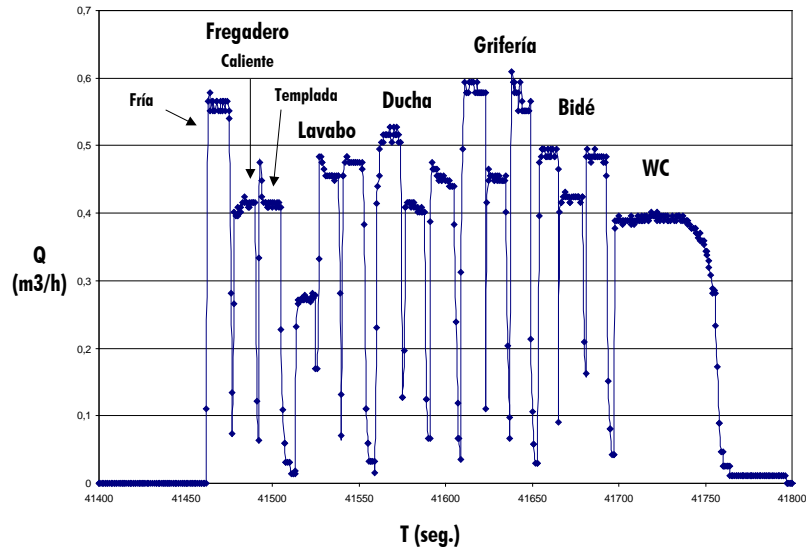


FIGURA 3-5: INSTANTES DE CONSUMO EN UNA VIVIENDA PARA UNA HORA DE SUMINISTRO

- **MONITORIZACIONES:** Estaban constituidas por las medidas reales del consumo de agua. Las más importantes son las que se denominaron “monitorizaciones en continuo”, compuestas por registros de lectura tomados cada segundo durante dos semanas en una misma vivienda. Este tipo de toma de datos se rotó dentro de un edificio, entre todas las viviendas que iban a ser monitorizadas, de tal manera que durante las dos primeras semanas se monitorizó una vivienda. Al cumplir este periodo, se rotaban las mediciones a otras viviendas y así sucesivamente hasta completar el periodo entero de medición. Además, es importante mencionar que estas mediciones se pudieron emplear para el análisis de los usos finales del consumo, gracias a la precisión de los datos que aportaron.

Con los datos almacenados en ficheros de un determinado formato, se procedió a identificar el tipo de uso final que generaba cada consumo en cada vivienda. Este trabajo se realizó siguiendo la hipótesis de que los consumos residenciales de agua pueden ser caracterizados como pulsos rectangulares (Wells, 1994).

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA EN PULSOS DE CONSUMO

Cuando un usuario abre un grifo genera automáticamente un consumo que puede ser representado como un pulso rectangular, caracterizado por un tiempo de inicio (t_0 , en segundos), un tiempo de finalización (t_f , en segundos), una duración que viene expresada por " $L = t_f - t_0$ " y una intensidad (caudal, en lps) " x ". La figura 3-6 representa cada pulso rectangular y lo que sucedería en caso de superponerse varios de estos pulsos.

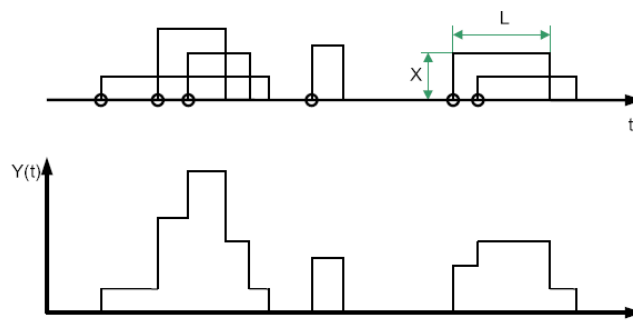


FIGURA 3-6: PULSOS RECTANGULARES DE CONSUMO

La caracterización de la demanda de agua como pulsos rectangulares tiene como objetivo modelar la demanda de agua y el reconocimiento de los aparatos empleados en el consumo. Mediante esta técnica la señal medida se suaviza y adopta formas más definidas que permiten identificar más fácilmente estructuras repetitivas que representan el empleo de aparatos como lavadoras y lavavajillas, cisternas, grifos y duchas. El proceso seguido para la caracterización de la demanda en pulsos requiere que se localicen los instantes inicial y final del consumo. Con estos dos valores se calcula la duración del pulso y los valores recogidos de caudal en dicho intervalo servirán para calcular el caudal promedio del mismo. No obstante, un hecho habitual es la existencia de variaciones de caudal dentro de un mismo consumo, o la aparición de solapamientos entre consumos, los cuales generan los caudales máximos que deben soportar las redes de saneamiento. A continuación, se presenta la manera en la que se identificó el consumo de cada uno de los aparatos analizados en el estudio.

- **Cisternas:** Su aparición comienza con un aumento instantáneo del caudal que alcanza un máximo que permanece constante durante un intervalo de tiempo, para luego iniciar un descenso paulatino del caudal, originado por el cierre progresivo de la válvula de llenado de la cisterna. Dicha pendiente o especie de “cola” que presenta la descarga, es la que representa el tipo de consumo. La figura 3-7 muestra un ejemplo de la forma que presenta una cisterna típica. Iniciando con el vaciado de la cisterna que continúa con su llenado continuo hasta el momento en que la válvula de llenado comienza a cerrar produciendo el descenso de caudal.

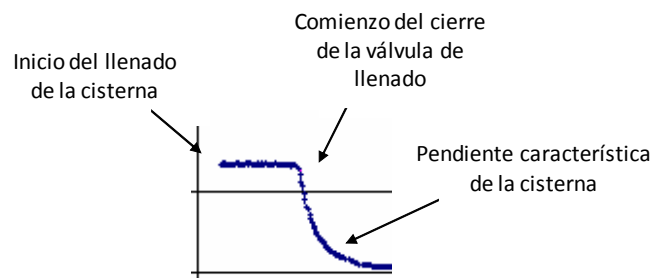


FIGURA 3-7: FORMA QUE REPRESENTA UNA CISTERNA TÍPICA

- **Grifos:** Son usos de caudal y duración variada, los cuales son considerados como una variable completamente aleatoria. Para estos usos no existe una característica concreta que permita su identificación.
- **Duchas:** Se trata de consumos que se producen normalmente a caudal elevado y durante un intervalo de tiempo considerable. En ocasiones, este consumo se ve interrumpido durante unos minutos debido al enjabonado. Un factor que ayuda a la identificación de las duchas es la hora en que tiene lugar el consumo puesto que se trata de una actividad que habitualmente se realiza a primera hora de la mañana o a última hora del día. En la figura 3-8 se muestra un ejemplo de una ducha sin interrupción donde la duración y volumen aproximados son 16 minutos y 60 litros.



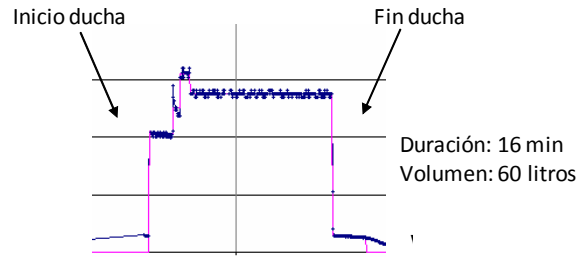


FIGURA 3-8: FORMA QUE REPRESENTA UNA DUCHA TÍPICA

- Lavadoras y lavavajillas:** Estos dos aparatos presentan patrones similares, por lo que se puede emplear una misma descripción para ambos. Su comportamiento característico consiste en la aparición de ciclos repetitivos con un mismo caudal, inferior para el caso de lavavajillas. El volumen de estos ciclos puede variar en función del programa seleccionado, no obstante, no dejan de ser estructuras que aparecen de forma cíclica durante un determinado intervalo de tiempo. A pesar de las variaciones de volumen, el caudal se mantiene constante, lo que ayuda en su identificación. En la siguiente figura, se representa un ejemplo donde ha coincidido simultáneamente un ciclo de lavadora con uno de lavavajillas.

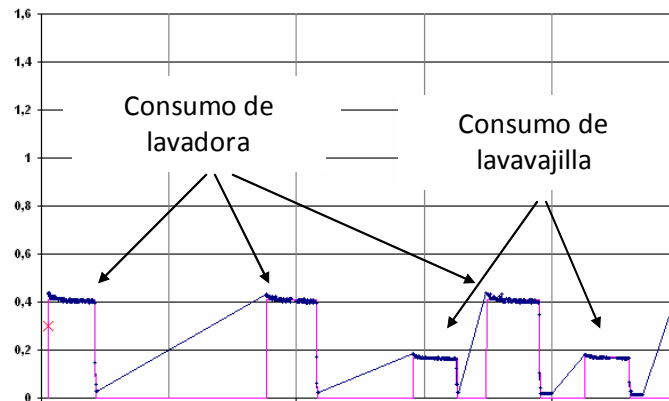


FIGURA 3-9: FORMA QUE REPRESENTA UNA LAVADORA Y UN LAVAVAJILLA

3.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE EMPLEADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA

Con el fin de procesar los datos fue necesario desarrollar un software específico para lograr la caracterización del consumo de agua entre los diferentes pulsos,



suavizando la señal de caudal y reduciendo de esta manera las posibles oscilaciones de la misma. Para ello, este software dispone de una serie de módulos programados en Access que generan los pulsos rectangulares de consumo bajo unas condiciones impuestas. Esta herramienta se encarga de realizar una primera asignación de usos en función de parámetros característicos del empleo de cada aparato como la duración, caudal o la forma del consumo. Después se representan gráficamente los resultados y se muestran datos como la hora del día, la duración, volumen, caudal de los pulsos y el tipo de uso asignado al mismo.

Antes de procesar los datos mediante el software se debe proceder a realizar una revisión exhaustiva de la integridad del fichero, debido a que un posible error en el formato, o valor de la fecha o lectura del contador, generará errores en el momento de ejecutar los módulos y realizar los cálculos de consumo. Tras esta revisión se ejecutan los módulos de creación de pulsos y de asignación de usos, caracterizando finalmente la demanda en sus usos finales.

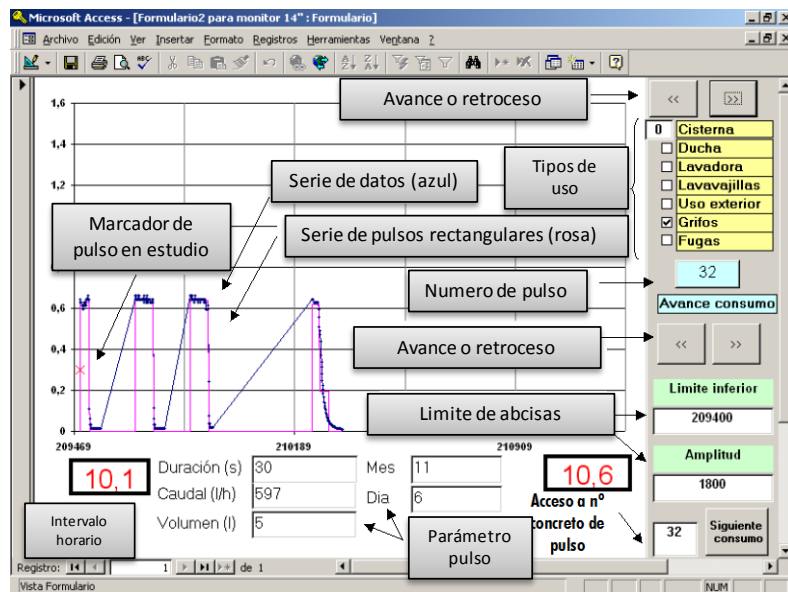


FIGURA 3-10: INTERFAZ GRÁFICA DEL SOFTWARE UTILIZADO EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA

3.4.2 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA

Las conclusiones más importantes obtenidas de este estudio sobre los factores explicativos del consumo de agua doméstico se describen a continuación. Hay

que tener en cuenta que dichas conclusiones son también relevantes para el trabajo presentado sobre los caudales descargados al sistema de saneamiento debido que ambos estudios comparten los mismos datos de partida y los caudales circulantes por el sistema de saneamiento tienen su origen, salvo por las aguas pluviales, en los consumos de agua dentro de las viviendas.

- La identificación de los usos no es un proceso sencillo. Los problemas en el reconocimiento de los usos comienzan debido a que los consumos domésticos de agua no siempre ocurren de manera aislada, y es relativamente común encontrar una serie de consumos simultáneos en un intervalo de tiempo. Evidentemente, estos solapamientos dificultan el reconocimiento de los usos a la vez que obligan a generar algoritmos adicionales que permitan repartir el consumo de agua entre los diferentes usos solapados. Es por esto, que descomponer la demanda en sus microcomponentes esenciales, no es simplemente un trabajo de asignación de datos a una herramienta de software, si no que requiere de años de investigación y experiencia.
- Tanto la tipología de las viviendas, como la antigüedad de las mismas, no afectan de manera considerable a la distribución de usos.
- La influencia que puede tener la superficie de los hogares con en el consumo, esta positivamente correlacionado, mostrando un mayor nivel de consumo en todos los usos, en viviendas con mayor área superficial.
- Por orden de importancia los aparatos que más gasto de agua generan en el interior de las viviendas son: grifos (37.2%), duchas (26.5%), cisternas (20.9%), lavadoras (10.4%), fugas (3.2%), lavavajillas (1.0%) y consumos no intencionados (0.8%) como se muestra en la figura 3-11.
- El consumo interior promedio medido durante el estudio es de 368 l/viv/día.



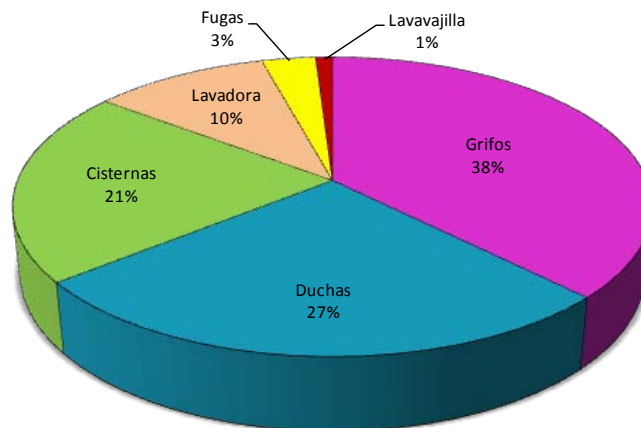


FIGURA 3-11: RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA

- Los caudales suministrados por los grifos y duchas no es excesivamente alto, con un valor promedio de caudal para grifos de 5 lpm y para duchas de 9 lpm. Esto origina que la sustitución de la grifería por una nueva de bajo consumo 6 lpm en grifos y 10 lpm en duchas – pueda no conducir a grandes ahorros.
- Las cisternas empleadas en el área de estudio no descargan grandes volúmenes, salvo casos excepcionales. Adicionalmente, algunas viviendas disponen a día de hoy, cisternas de doble descarga o de descarga interrumpible. Del presente estudio se ha obtenido que el 24% de las viviendas pertenecientes a la muestra disponen de estos elementos. El volumen promedio descargado se sitúa en 7,1 litros.
- La curva de modulación horaria de las viviendas muestra que el consumo promedio obtenido durante las horas de menor consumo, de 4 a 5 de la mañana, es de 7.0 litros por vivienda y hora. Figura 3-12.

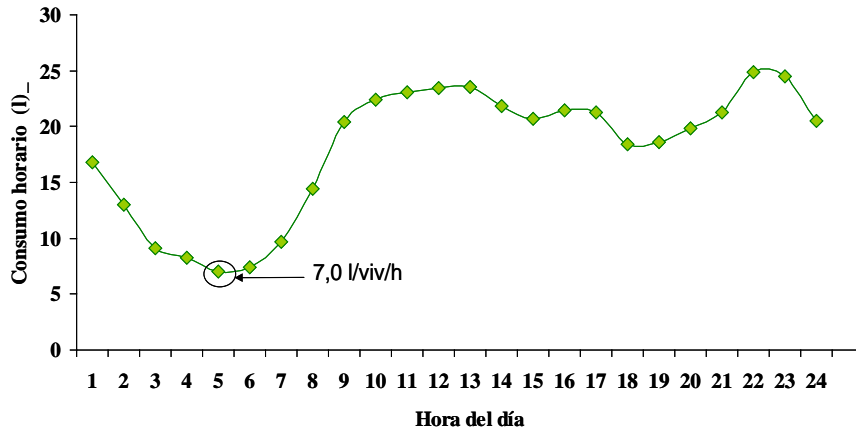


FIGURA 3-12: CURVA DE MODULACIÓN PROMEDIO DE LAS VIVIENDAS MONITORIZADAS

- Se han obtenido curvas de modulación en el uso de los diferentes aparatos que integran las viviendas. Las figuras 3-13; 3-14; 3-15; 3-16; 3-17 representan las curvas de cada uno de los aparatos.

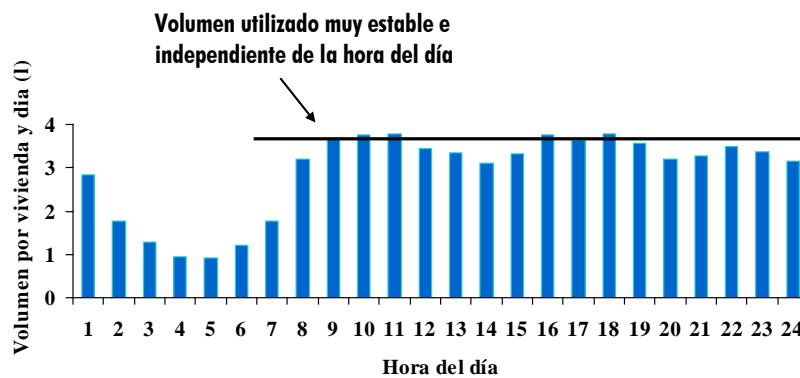


FIGURA 3-13: CURVA DE MODULACIÓN PARA EL USO DE CISTERNAS

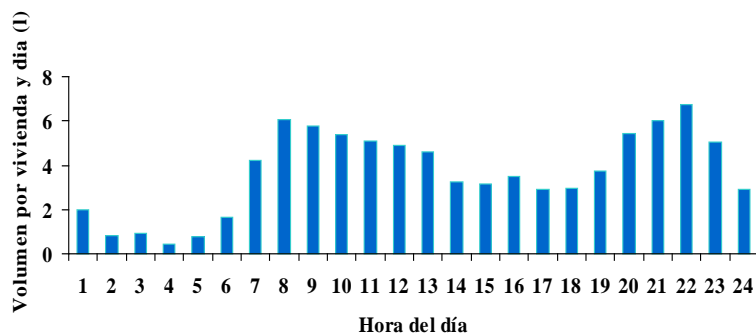


FIGURA 3-14: CURVA DE MODULACIÓN PARA EL USO DE DUCHAS

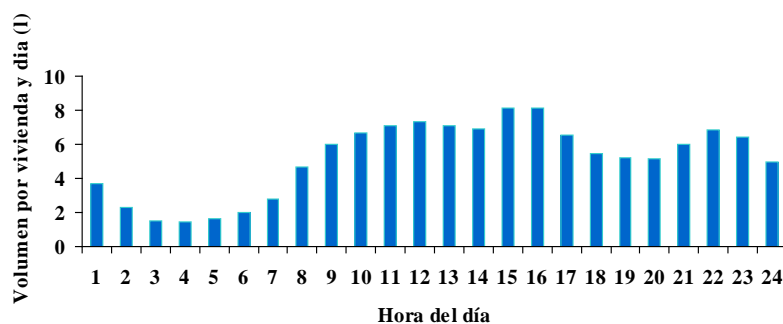


FIGURA 3-15: CURVA DE MODULACIÓN PARA EL USO DE GRIFOS

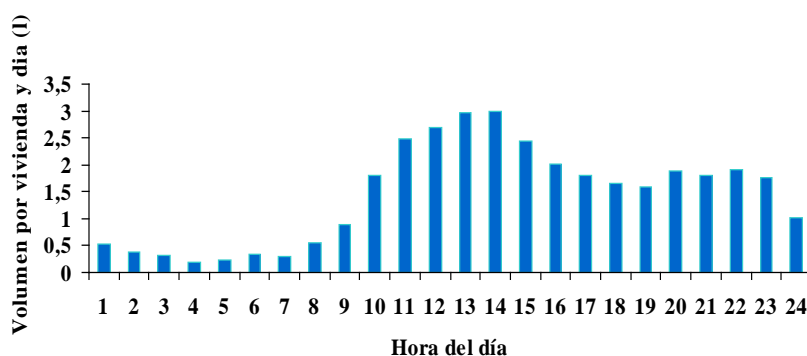


FIGURA 3-16: CURVA DE MODULACIÓN PARA EL USO DE LAVADORAS

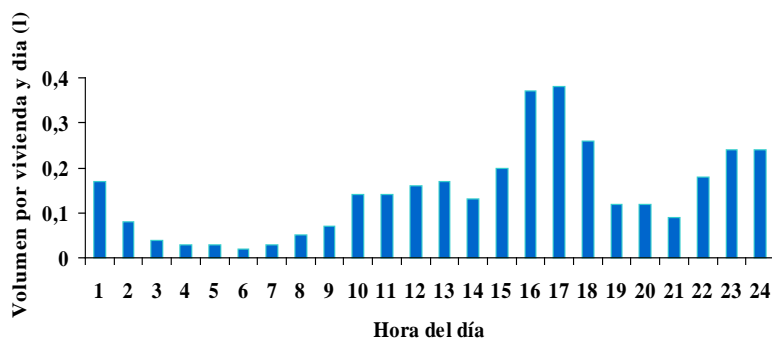


FIGURA 3-17: CURVA DE MODULACIÓN PARA EL USO DE LAVAVAJILLAS

Una vez se ha expuesto la metodología utilizada para la obtención de los datos, se concluye la fase I y se procede con la descripción del modelo estocástico para la determinación de las cargas de aguas negras a la red de saneamiento (Fase II).



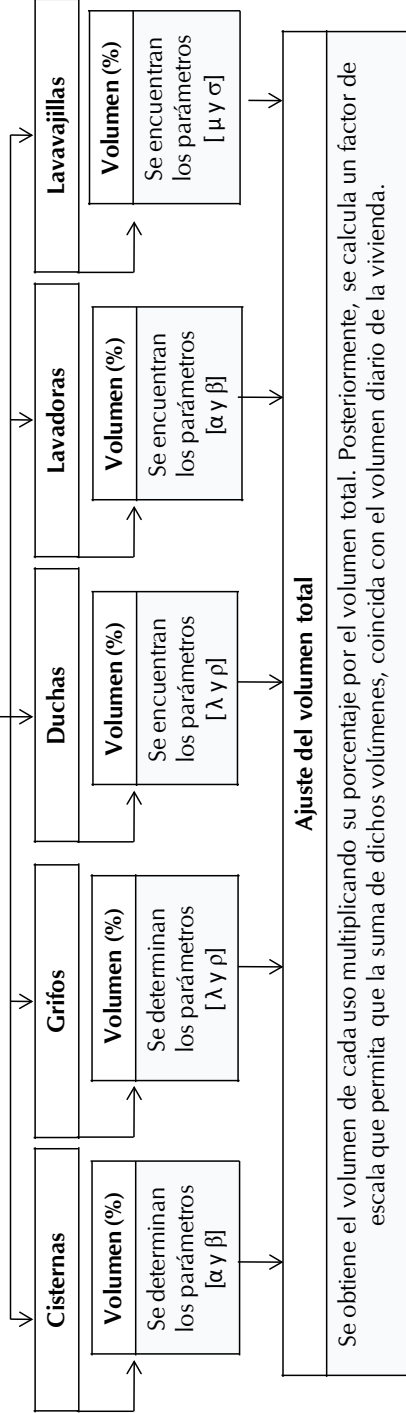
Generación de un modelo estocástico para la determinación de las descargas de aguas negras a la red de evacuación de las aguas domiciliarias

FASE 2

Objetivo: Obtener los parámetros de ajuste del consumo a una función de distribución de probabilidad y distribuir aleatoriamente el volumen total de una vivienda y día, entre cada uno de los usos

Volumen total de una vivienda/día
 Se establece una función de distribución de probabilidad para el volumen total diario. Se obtienen los parámetros $[\alpha$ y $\beta]$ que proporcionan el mejor ajuste a las observaciones y se calcula para cada día, un valor que represente el volumen total.

Reparto del volumen total entre cada uno de los uso
 Con los datos caracterizados de consumo, se determina el porcentaje diario asignado a cada uno de los usos y se ajusta cada porcentaje a una función de distribución de probabilidad



FASE 3

Identificado el volumen de cada uno de los usos, se procede a convertir los pulsos de consumo, en pulsos de saneamiento y encontrar los caudales punta con la respectiva probabilidad de ocurrencia.

3.5 FASE II: GENERACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DESCARGAS DE AGUAS NEGRAS A LA RED DE EVACUACIÓN DE AGUAS DOMICILIARIAS

3.6 INTRODUCCIÓN

Partiendo de la base de datos de caudales descargados a la red de evacuación de aguas, obtenida tras transformar la base de datos creada en el estudio sobre las pautas de consumo en la Comunidad de Madrid. Se ha desarrollado un modelo capaz de reproducir lo más fidedignamente posible el comportamiento aleatorio de dicho fenómeno. El modelo presentado se basa en la generación y agregación de pulsos de consumo independientes, de determinadas intensidades y duraciones, que se distribuyen según diferentes parametrizaciones a lo largo del día.

Para implementar el modelo se ha definido como variables aleatorias tanto el consumo total de agua en una vivienda como la distribución por usos en la misma. Además, para cada uso se han definido hasta cuatro variables aleatorias adicionales que permiten definir la intensidad (caudal) del consumo, su duración, volumen y localización temporal a lo largo del día. Disponer de datos reales sobre el consumo ha permitido estimar las funciones de probabilidad que mejor se ajustan al fenómeno, así como los parámetros que las caracterizan.



3.7 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE UNA VIVIENDA Y DÍA

El primer paso es determinar la función de distribución de probabilidad que mejor caracteriza el volumen total diario consumido por una vivienda. Para ello, se realizó una consulta a la base de datos, con el fin de calcular el consumo total registrado en cada uno de los días de medición, considerando en total 4986 días (13,6 años) de mediciones.

El histograma de frecuencias obtenido a partir de dichos datos (Figura 3-18) presenta una forma sesgada positivamente que muestra que en un elevado número de días, el volumen total consumido se encuentra repartido entre 50 y 600 litros/día.

Como se mostró anteriormente en las conclusiones del estudio sobre los *factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid (2008)*, en el que se obtuvo como resultado un consumo medio de 368 l/vivienda/día, se puede comprobar que efectivamente dicho dato coincide aproximadamente con la información suministrada en la figura 3-18.

Estudiando detenidamente el histograma de frecuencias se encuentra que la función que mejor reproduce el comportamiento de la variable aleatoria del volumen total, es una función de probabilidad *Gamma* con parámetros de forma, $\alpha = 1,46$, y escala, $\beta = 0,004$.



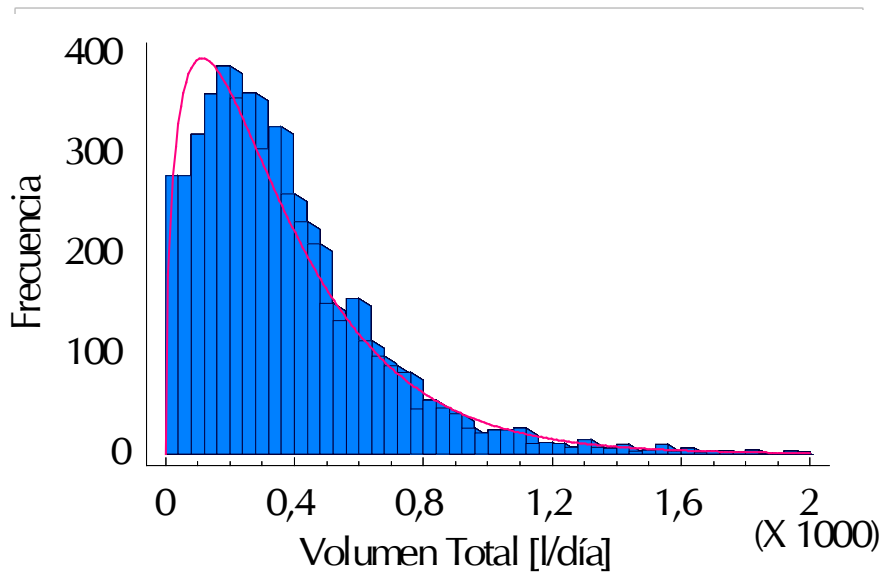


FIGURA 3-18: HISTOGRAMA DEL VOLUMEN TOTAL DIARIO

Para comprobar la bondad del ajuste se recurre al gráfico cuantíl – cuantíl (figura 3-19), donde se comparan las observaciones de volumen total (eje de ordenadas) con la predicción obtenida a partir de la función de probabilidad definida por los parámetros de forma y escala anteriormente mencionados (eje de abscisas). En este caso se observa un ajuste satisfactorio, salvo en aquellas observaciones (días) de mayor consumo en las que la función de probabilidad tiende a sobreestimar ligeramente el volumen total.

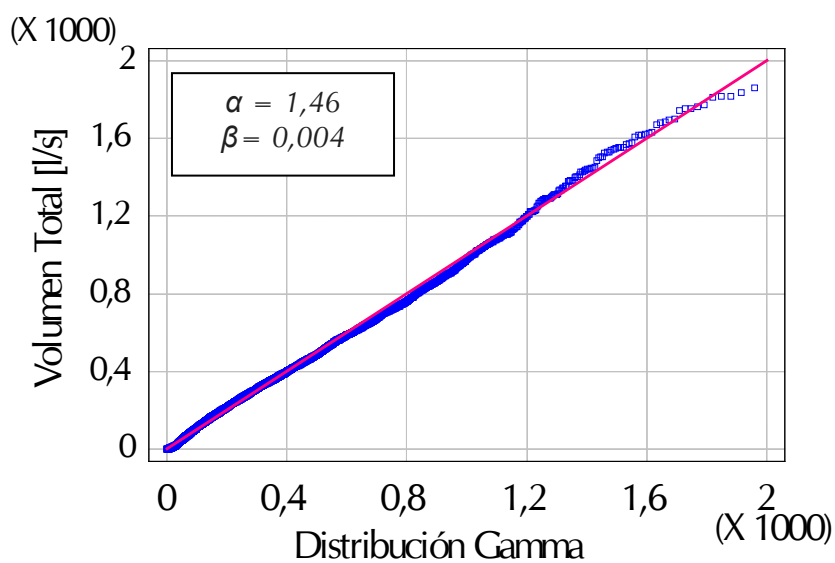


FIGURA 3-19: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DIARIO

Con el fin de generar consumos aleatorios que se distribuyan según la función de probabilidad del ajuste, se ha programado un módulo específico empleando las herramientas de programación de VBA® (*Visual Basic for Applications*) para Microsoft Excel®. Dicha función de generación de números aleatorios, utiliza como parámetros de entrada los parámetros de ajuste *forma* y *escala* [α y β] de la función de distribución *Gamma*, y un número aleatorio según una función de distribución uniforme, comprendido entre cero y uno. Dicho módulo se comprobó, generando una serie de números aleatorios y verificando el ajuste de los mismos mediante el programa StatGraphics®. Los parámetros resultantes del ajuste en dicho programa coincidieron con los parámetros de forma y escala utilizados para generar la serie de números aleatorios.



3.8 DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN TOTAL ENTRE CADA UNO DE LOS USOS

El volumen total consumido en una vivienda es la suma de los volúmenes consumidos en cada uno de los aparatos presentes en las misma, tal y como se define en la ecuación 1.

$$V_{Total_i} = \sum_{i=1}^5 V_{K_i} \quad \text{Ecuación. 1}$$

Siendo K , el subíndice que representa cada uno de los usos finales que integran el volumen total; es decir, el volumen consumido por las cisternas, las duchas, los grifos, las lavadoras y los lavavajillas. En términos porcentuales cada uso quedará definido según la siguiente ecuación:

$$\%V_{K_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{K_i}}{V_{Total_i}} \quad \text{Ecuación. 2}$$

Siendo: n , el número de aparatos utilizados en el uso k para una vivienda i y día

La proporción en que se distribuyen los usos puede considerarse una variable aleatoria cuyo valor depende no solo de la vivienda, sino también del día concreto en el que se analicen los datos que están a su vez condicionados por la ocupación, hábitos, etc. En consecuencia, una vez establecido el volumen total que se puede consumir en una vivienda es necesario distribuir dicho consumo entre los diferentes usos. Para ello, se analiza tomando como datos de partida los 4986 días de mediciones y las funciones de probabilidad que mejor caracterizan el porcentaje de consumo de cada uso.

3.8.1 PORCENTAJE DE CONSUMO ASIGNADO A CISTERNAS

El histograma de frecuencias del porcentaje de volumen consumido por las cisternas (figura 3,20) muestra una distribución asimétrica positiva. La mayor parte de los datos (80%) se concentra entre valores del 10 y el 40%. La función



de distribución de probabilidad que mejor ajusta los datos es una *Gamma* con parámetros de forma y escala iguales a $\alpha=2,19$ y $\beta=8,66$ respectivamente.

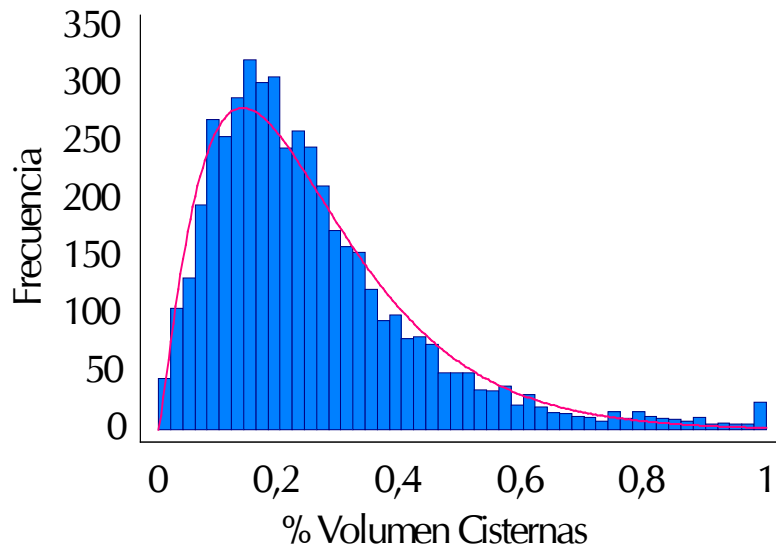


FIGURA 3-20: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (% $V_{\text{CISTERNAS}}$)

El gráfico cuantíl - cuantíl (figura 3-21) muestra que los datos inferiores a 0,6, equivalentes en porcentaje al 60%, se ajustan de manera adecuada a la función de distribución *Gamma*. Sin embargo, este ajuste es de menor calidad para los días con consumo en cisternas superiores a dicho porcentaje. No obstante, se comprueba en el histograma de frecuencias, que existe un cierto número de observaciones (días de medición) en el que el 100% del consumo corresponde a cisternas. En dichos días, el consumo total no es muy elevado, por lo que el hecho de que la función de ajuste *Gamma* infravalore dicha circunstancia, no supone un sesgo importante en los resultados. No debe olvidarse que en este apartado simplemente se está obteniendo una función de probabilidad que permita determinar el porcentaje de consumo utilizado en cisternas, por tal motivo, se acepta como apropiada dicha función de probabilidad con los parámetros de ajuste mencionados anteriormente ($\alpha=2,19$ y $\beta=8,66$)

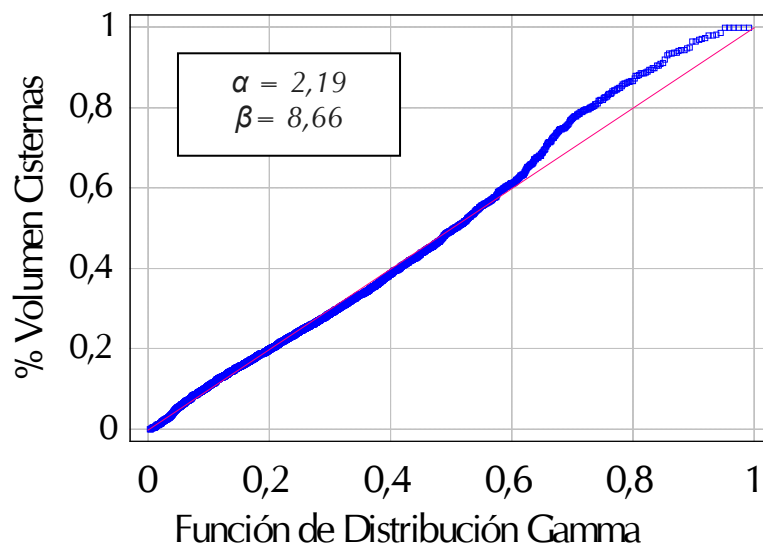


FIGURA 3-21: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAMMA (%V_{CISTERNAS})

3.8.2 PORCENTAJE DE VOLUMEN ASIGNADO A GRIFOS

El histograma de frecuencias (figura 3-22) respecto el peso de los grifos en el consumo se ha ajustado a una función de distribución *Weibull* definida por los parámetros de localización o escala $\rho = 0,43$ y el parámetro de dispersión $\lambda = 2,06$.

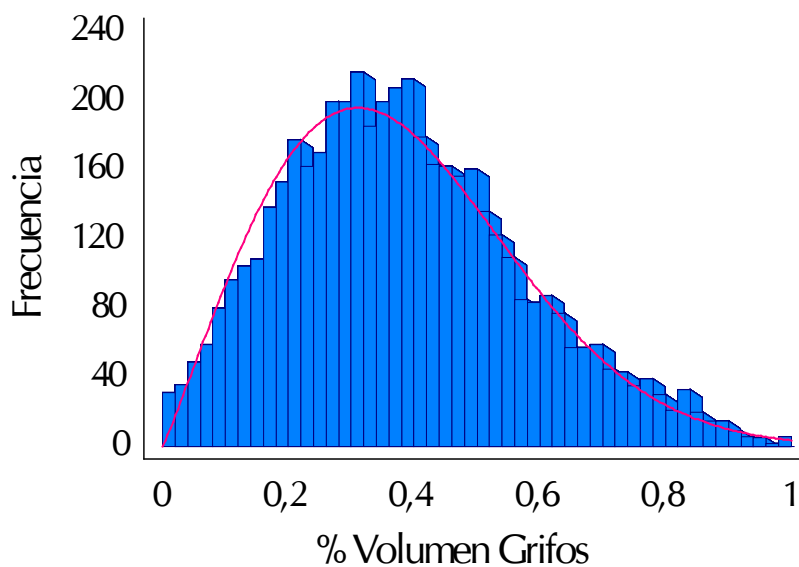


FIGURA 3-22: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (%V_{GRIFOS}).

El gráfico cuantíl – cuantíl, que define la bondad del ajuste muestra como los datos se ajustan razonablemente bien a dicha función de probabilidad sobreestimando ligeramente los días con mayor porcentaje en uso de grifos.

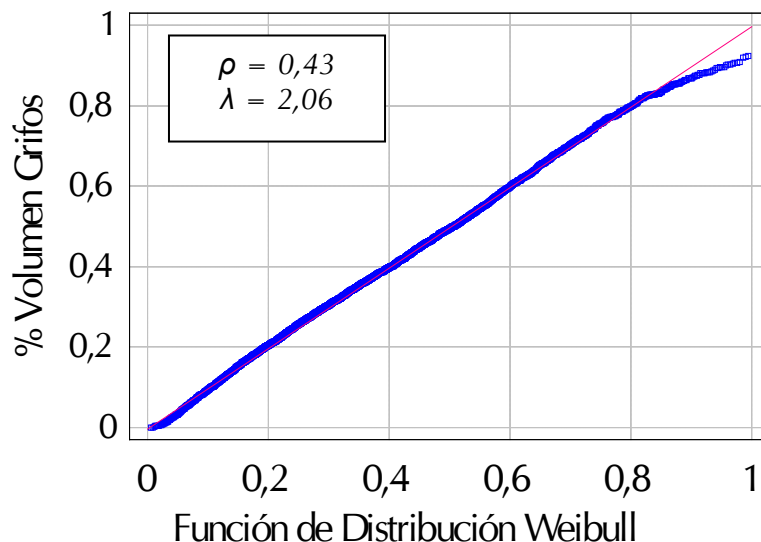


FIGURA 3-23: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL (%VGRIFOS)

3.8.3 PORCENTAJE DE VOLUMEN ASIGNADO A DUCHAS

La función de distribución *Weibull* también ajusta bastante bien, el porcentaje de volumen consumido por las duchas. El histograma de frecuencias (figura 3-24) muestra una asimetría negativa. Como se puede evidenciar, aunque no exista un máximo absoluto, se muestra que el consumo medio de este uso final es relativamente uniforme en todo el rango. Retomando las conclusiones del estudio sobre los factores explicativos de la demanda de agua, donde se afirma que el porcentaje asignado para este uso es del 27%, se comprueba que existe consistencia entre ambos resultados.

Los valores de los parámetros de escala y dispersión de la función de distribución *Weibull* que mejor ajustan a la serie son: $\rho = 1.81$ y $\lambda = 0.37$



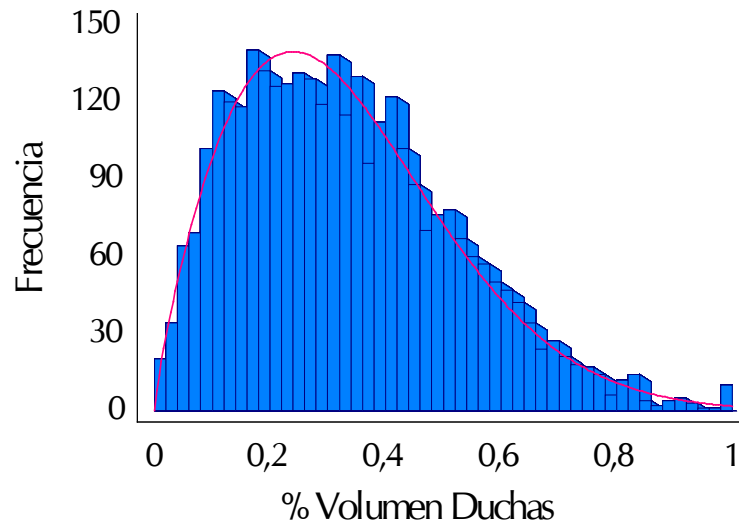


FIGURA 3-24: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (%VDUCHAS)

Por otro lado, en el gráfico cuantíl – cuantíl (figura 3-25), se establece que el porcentaje de volumen consumido por las duchas puede ser modelado satisfactoriamente usando una función de distribución *Weibull*.

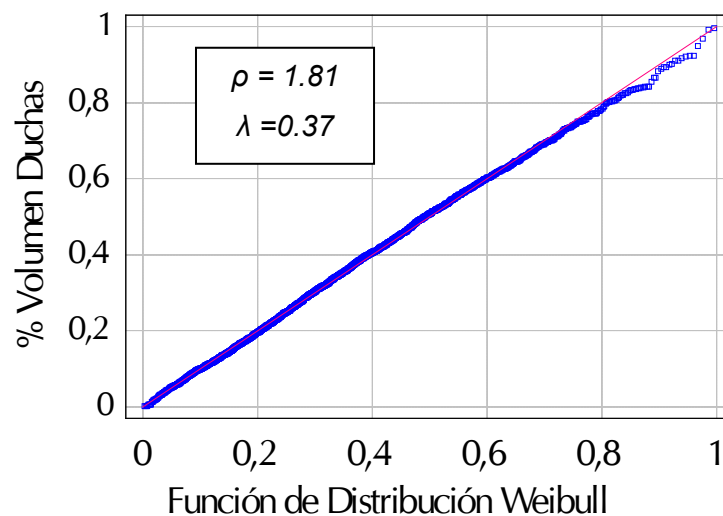


FIGURA 3-25: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL (%VDUCHAS)

Un comentario que debe hacerse, es la similitud existente entre el comportamiento encontrado para los grifos y las duchas. En ambos casos, y al contrario de lo que sucede con las cisternas, el volumen utilizado en cada evento es diferente.

3.8.4 PORCENTAJE DE VOLUMEN ASIGNADO A LAVADORAS

El porcentaje de volumen utilizado por las lavadoras se ajusta a una función de distribución de probabilidad *Gamma*. Como es de esperar, los datos más recurrentes de esta serie adoptan valores de porcentajes bajos, comprendidos entre el 5 y el 40% debido a que no es muy usual que en una vivienda el consumo principal sea debido a este uso. Ocasionalmente, algún día concreto en el que se ponen dos o más lavadoras, y el consumo en otros usos no es muy alto, dicho porcentaje toma valores más elevados.

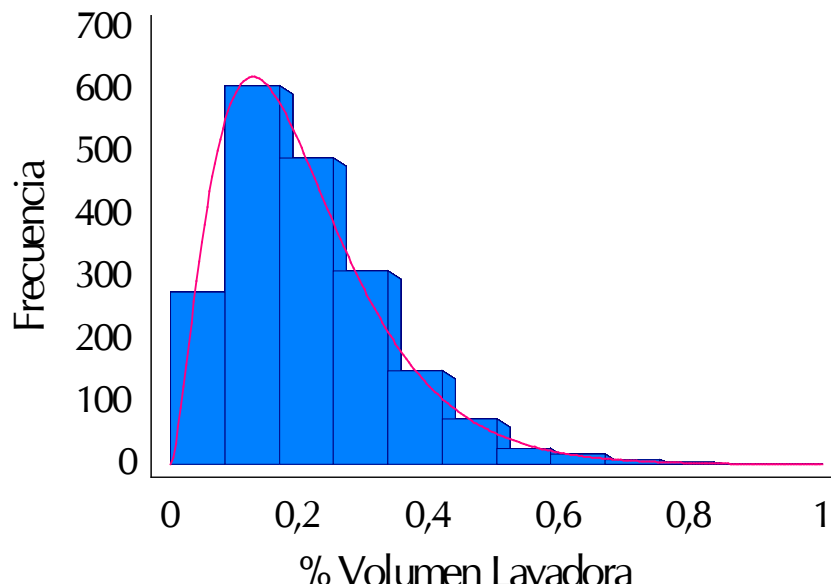


FIGURA 3-26: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (%V_{LAVADORA})

El gráfico cuantíl - cuantíl (figura 3-27) muestra de nuevo el buen ajuste de los datos a la función de distribución *Gamma*. Como es de esperar, evidenciándose en el histograma de frecuencias, los porcentajes menos recurrentes (porcentajes superiores al 80%), presentan una ligera dispersión que no altera de manera significativa el comportamiento estadístico de la serie observada. Los parámetros de forma y escala que proporcionan el mejor ajuste a las observaciones son $\alpha = 2,61$ y $\beta = 12,69$.

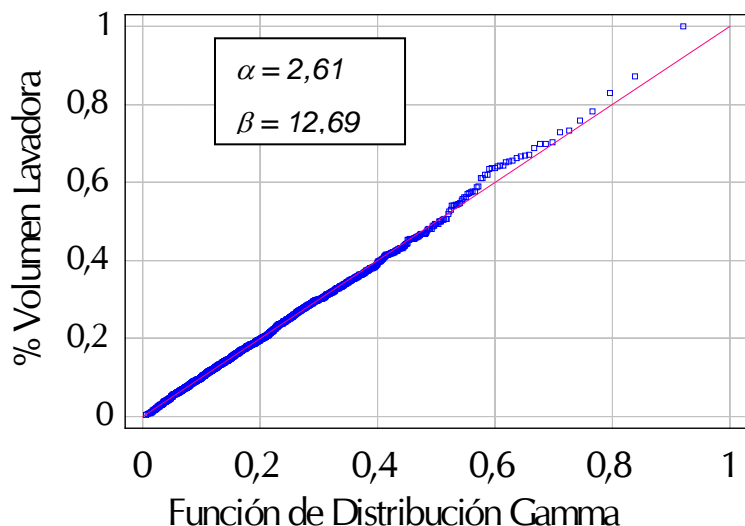


FIGURA 3-27: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAMMA (%VLAVADORA)

3.8.5 PORCENTAJE DE VOLUMEN ASIGNADO A LAVAVAJILLAS

El porcentaje de uso de los lavavajillas, al igual que las lavadoras, es un porcentaje con una media bastante baja, tal y como se puede apreciar en el gráfico del histograma de frecuencias (figura 3-28). Esto se debe en gran parte a los hábitos diarios de los usuarios, puesto que el uso de lavavajillas en una vivienda de edificios no es considerado esencial como si lo son el uso de las cisternas, e incluso de las lavadoras.

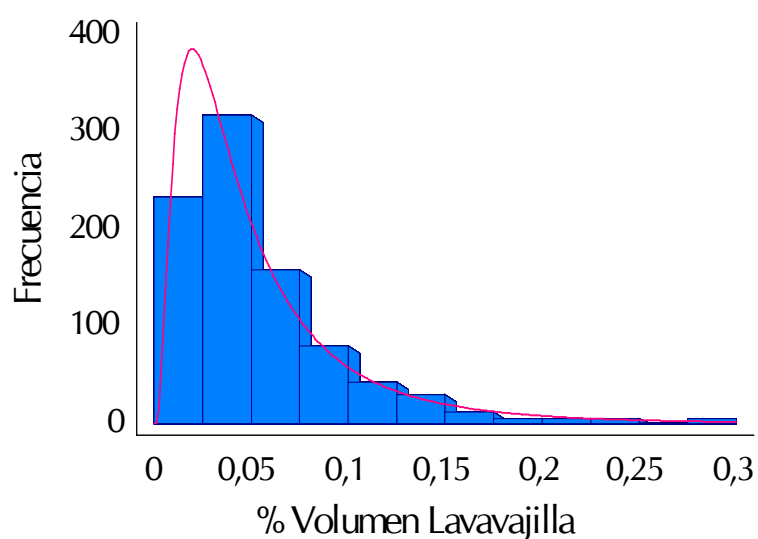


FIGURA 3-28: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (%VLAVAVAJILLAS)

El gráfico cuantíl- cuantíl, muestra de nuevo el buen ajuste de la función *Lognormal* con parámetros media $\mu=0.055$ y desviación típica $\sigma=0.054$ (figura 3.28).

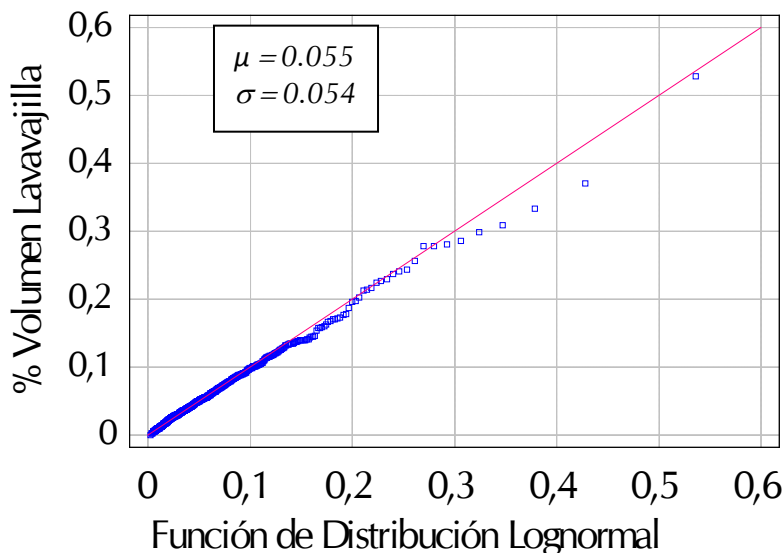


FIGURA 3-29: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL (%VLAVAVAJILLA)

La función que mejor reproduce el comportamiento de la serie observada es la *Lognormal*. En el ajuste de dicha función, al tener una media muy baja respecto a la desviación típica, es posible que se generen números aleatorios inferiores a cero, lo cual carece de cualquier sentido físico, dado que no existe el algoritmo de un número negativo. Es por este motivo que se decide truncar la función de probabilidad *Lognormal*, acotando el límite inferior y eliminando la posibilidad de obtener porcentajes de consumo negativos.

3.8.6 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ALEATORIO ASIGNADO A CADA USO FINAL

El porcentaje de consumo correspondiente a cada uno de los usos se calcula mediante la generación de números aleatorios, según las funciones de probabilidad descritas anteriormente con los respectivos parámetros que mejor se ajustan a las series de datos observadas.

Para calcular, en términos volumétricos, el peso de cada consumo basta con multiplicar el porcentaje de uso de cada aparato con el volumen total consumido en la vivienda (Ecuación 3). El problema surge al sumar los

porcentajes de todos los aparatos. La probabilidad de que dichos porcentajes sumen exactamente 100% es prácticamente nula. Esta situación obliga a realizar un prorrateo de dichos porcentajes de tal modo que la suma de los mismos sea exactamente el 100%. Solo de este modo la suma de los volúmenes utilizados en cada aparato coincidirá con el volumen total consumido en la vivienda. Además, mediante este procedimiento de ajuste se mantiene el peso relativo de cada uso dentro de la vivienda.

$$\bar{V}_{K_i} = \% \bar{V}_i \cdot \bar{V}_{Total_i} \cdot C \quad \text{Ecuación. 3}$$

Siendo:

\bar{V}_{K_i} : Volumen consumido por cada uso final (lts)

$\% \bar{V}_i$: Porcentaje de volumen simulado para cada uso final en una vivienda y día

\bar{V}_{TOTAL_i} : Volumen total simulado para una vivienda y día (lts)

C : Coeficiente de ajuste para asegurar que la suma de volúmenes asignados a cada aparato coincida con el volumen total en una vivienda y día.

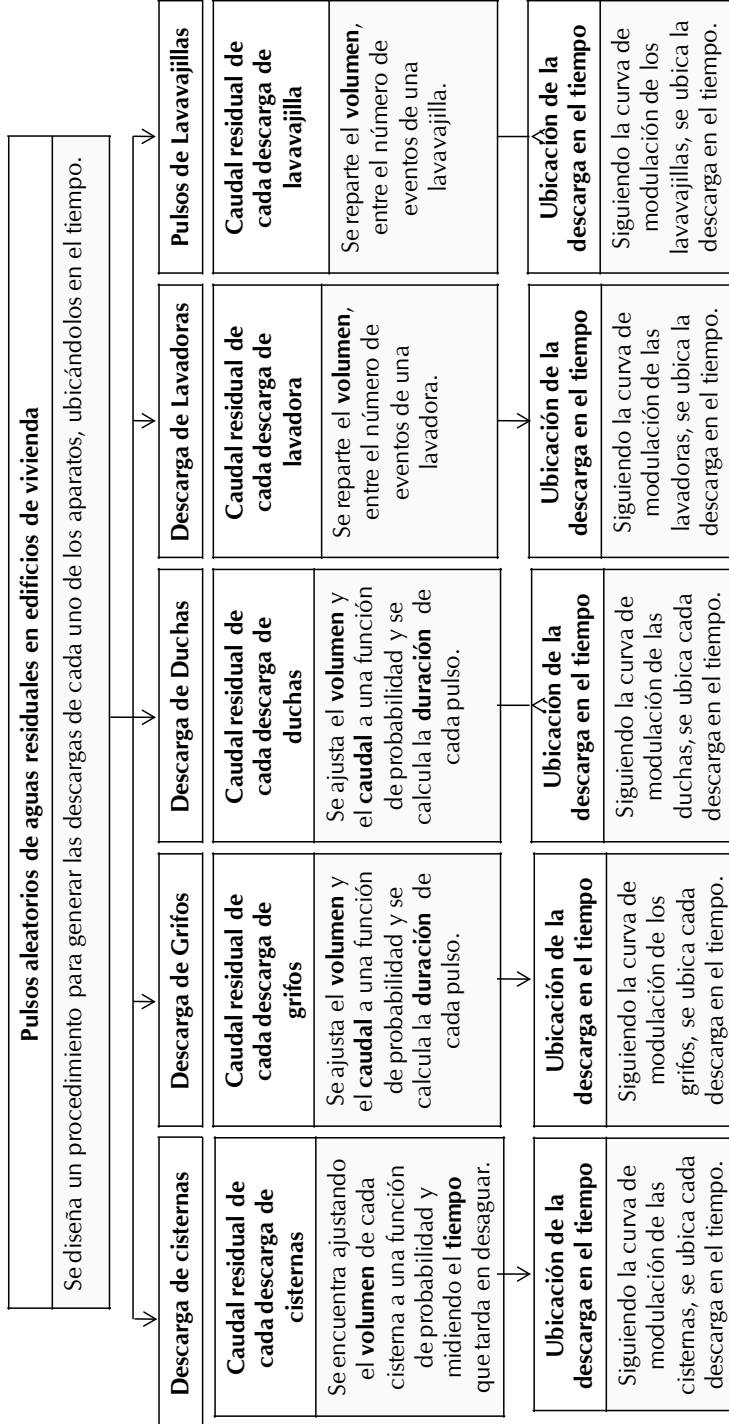
Hasta el momento, lo único que se ha hecho es trabajar con datos de consumo, total y por aparatos, ajustándolos a funciones de distribución de probabilidad y asignando aleatoriamente un valor, tanto para el volumen total como para el peso de volumen asignado a los respectivos usos. A continuación, se desarrolla la siguiente fase, en la que se convierten dichos volúmenes en los pulsos de caudal descargados a la red de saneamiento. Para ello, se procede a analizar el comportamiento encontrado para cada uno de los diferentes aparatos presentes en las viviendas. La modelación de dicho comportamiento debe incluir tanto su distribución a lo largo del día, mediante la definición de una curva de modulación apropiada, como funciones de probabilidad que definan su intensidad (caudal), duración y volumen.



Generación de un modelo estocástico para la determinación de las descargas de aguas negras a la red de evacuación de las aguas domiciliarias

FASE 3

Objetivo: Convertir pulsos de consumos en pulsos de saneamiento y calcular los caudales punta para el diseño de los sistemas de evacuación de aguas.



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.9 GENERACIÓN DE PULSOS DE DESCARGA PARA CADA USO FINAL

Una vez modelado el consumo en pulsos (esto se realizó en el estudio sobre factores explicativos de la demanda de agua), se procede a transformarlos en descargas al sistema de saneamiento. En este punto es necesario establecer que el principal supuesto de este modelo, es considerar los pulsos como eventos independientes entre sí, es decir, no se considera que la generación de un pulso pueda conducir a la aparición de otro o que impida la generación de un determinado uso durante cierto tiempo. Por ello, sería posible que en un mismo instante de tiempo se presentasen dos pulsos provenientes del mismo aparato (esto puede ocurrir teóricamente aunque la probabilidad de que ello ocurra es bastante reducida).

3.9.1 DESCARGAS GENERADAS POR EL USO DE CISTERNAS

Las descargas de las cisternas se definen como el caudal de aguas residuales, con una determinada duración, que se genera cada vez que un usuario utiliza dicho aparato. En este sentido es muy importante mencionar de nuevo que los pulsos generados al descargar una cisterna son independientes entre sí, e independientes a la ocurrencia de otros consumos.

Para comenzar, se debe encontrar el número de descargas independientes que han sido generadas en función del volumen total asignado al uso de cisternas. Para ello, se parte del hecho que las cisternas son aparatos cuyo volumen demandado es fijo en cada evento de uso, y que depende de las características del tanque de cada una de ellas. Ahora bien, como suponer que todas las viviendas de la muestra observada tienen instalado el mismo tipo de cisterna no es adecuado, se recurre de nuevo a la información de volúmenes medidos, y se procede a ajustarlos a una función de distribución de probabilidad. Con los parámetros obtenidos de dicho ajuste se procede a generar descargas sintéticas



de las cisternas, hasta que la sumatoria del volumen asignado a cada una de estas descargas sea igual al volumen total simulado para este uso.

$$\bar{V}_{K,C_i} = \sum_{i=1}^n \bar{V}_{C_i} \quad \text{Ecuación. 4}$$

Siendo:

\bar{V}_{C_i} : Volumen simulado para cada uso de cisterna (lts)

\bar{V}_{K_i} : Volumen aleatorio asignado al uso total de cisternas en una vivienda y día

n : Número de cisternas y/o pulsos de saneamiento generados por este uso.

Para conseguir que la sumatoria de los volúmenes de cada una de las descargas, correspondan exactamente con el volumen total asignado a este uso, es necesario multiplicar el volumen de cada descarga por un factor de corrección, encontrado como: el volumen asignado a cada uso, partido por la sumatoria del volumen de todas las descargas.

$$C_i = \frac{\bar{V}_{k_i}}{\sum_{j=1}^n \bar{V}_{C_j}} \quad \text{Ecuación 5}$$

siendo n , el número de descargas de cisternas.

Para la estimación del caudal de cada descarga, se calcula la razón entre el volumen de cada descarga de cisterna, ajustado mediante el factor de corrección, y la duración del mismo, que también es una variable aleatoria. Para evaluar la duración del pulso, se realizaron varias mediciones con el fin de estimar el tiempo que tarda una cisterna en desaguar todo su volumen. El resultado fue un valor mínimo de 4 segundos y uno máximo de 6.

Se asume, por tanto, que una función de distribución uniforme es una adecuada aproximación para determinar la duración de cada descarga.



$$\bar{Q}_{\kappa, C_i} = \frac{\bar{V}_{C_i}}{\bar{D}_{C_i}} \quad \text{Ecuación. 6}$$

Siendo:

\bar{Q}_{κ, C_i} : Caudal residual de descarga de la cisterna i (l/s)

\bar{V}_{C_i} : Volumen aleatorio de descarga de la cisterna i (l)

\bar{D}_{C_i} : Duración de la descarga de la cisterna i (s)

Finalmente, se relaciona el caudal encontrado cada segundo, con el instante en el que se produce durante el día y se almacena en una matriz dimensionada para almacenar cada descarga en los 86400 segundos de un día.

Volumen aleatorio del uso de cada cisterna

Una vez se ha establecido la metodología para encontrar los parámetros hidráulicos de cada una de las descargas, se procede a presentar el ajuste a la función de distribución de probabilidad para el volumen de las cisternas. Para ello, se recurre de nuevo a la información obtenida tras la caracterización de la demanda en la Comunidad de Madrid, donde se observa que la función de distribución de probabilidad *Lognormal* es la que presenta el mejor ajuste y la cual será usada para generar los volúmenes aleatorios para este uso.

El histograma de frecuencias (figura 3-30) muestra que la mayor parte de valores de la serie de datos se encuentran entre 6 y 8,5 litros. Se debe comentar que en este modelo no se consideraron descargas de cisternas inferiores a los 6 litros (se ha truncado la serie de observaciones), dado que se asumen como medias descargas y/o descargas interrumpidas y por tanto fueron excluidas del análisis.

El gráfico cuantíl- cuantíl (figura 3-31) indica que para cada uno de los volúmenes considerados en la muestra observada existe un volumen aleatorio que es ajustado a la función de distribución *Lognormal* truncada; así los valores de $\mu = 7,86$ y $\sigma = 1,30$ corresponden a los parámetros media y desviación típica de la función *Lognormal* para la serie de datos observada.

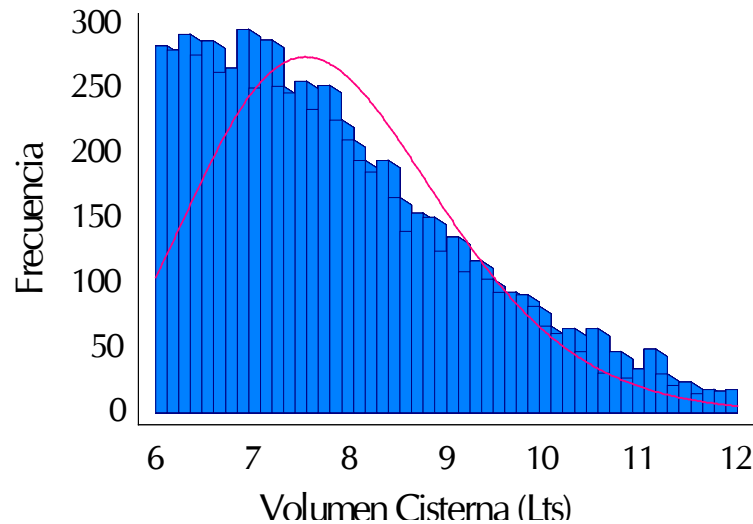


FIGURA 3-30: HISTOGRAMA DE FRECUENCIA (VCISTERNAS)

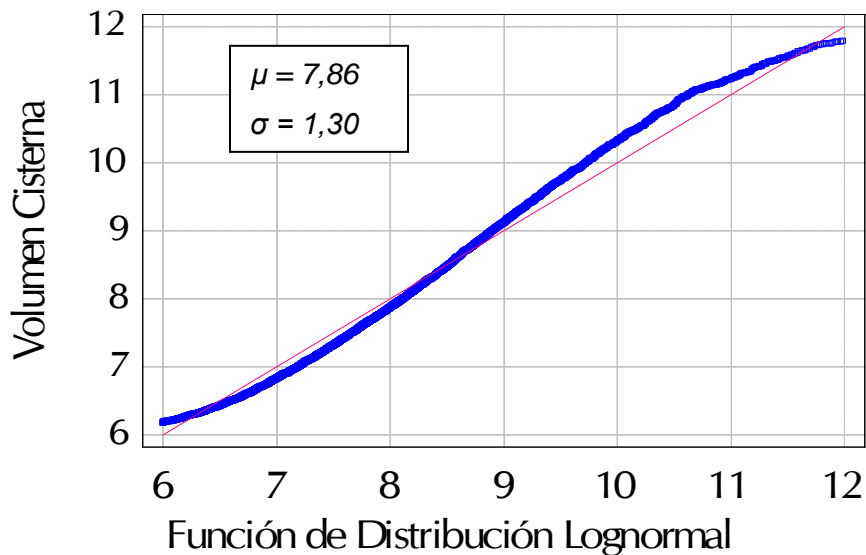


FIGURA 3-31: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL (VCISTERNAS)

Ubicación de cada descarga en el tiempo

Una vez obtenido el número de descargas que se producen en el día con su respectivo volumen y caudal, se hace necesario ubicar estas a lo largo del día. El procedimiento para ubicar cada descarga, se basa en la información aportada por la curva de modulación de consumo, asumiendo que para cada hora del día existe la probabilidad que se presente un consumo. Es decir, entre las 20:00 y las 21:00 horas, existe una probabilidad de consumo que es distribuida



uniformemente en toda la hora, entre las 21:00 y las 22:00, existirá otra probabilidad de consumo que también se distribuye uniformemente, y así sucesivamente hasta completar las 24 horas del día.

Partiendo de lo anterior, se ubican las descargas en cada hora del día, generando un número aleatorio entre 0 y 1 (siguiendo una función de distribución uniforme) que posteriormente se compara con las probabilidades de consumo agregadas, provenientes de los diferentes usos, pudiéndose calcular con una resolución de segundos, el momento al que corresponde dicho valor aleatorio.

Para clarificar este cálculo, se supone que 0,5 es el valor aleatorio generado para ubicar la descarga de la cisterna X, se compara este valor con las probabilidades acumuladas de ocurrencia de consumo y resulta que corresponde a las 17:30; esto quiere decir que la descarga X se produce a los 63000 segundos del inicio del día. Para convertir de horas (resolución temporal de la curva de modulación de consumo) a segundos, se recurre a técnicas de interpolación lineal, mediante la ecuación 7.

$$y_t = \left(\frac{\bar{P} - P_t}{P_{t+1} - P_t} \right) \cdot (P_{t+1} - P_t) + P_t \quad \text{Ecuación. 7}$$

Siendo:

\bar{P} : Número aleatorio

P_t : La probabilidad de la hora t

P_{t+1} : La probabilidad de la hora $t + 1$

y_t : Segundos en el que se produce el consumo en el día

La figura 3-32 resume la metodología utilizada para convertir pulsos de consumo de cisternas en las descargas de las mismas. También es importante mencionar que muchos de los pasos aquí presentados se repiten para los posteriores usos, por tanto de aquí en adelante serán solo mencionados.



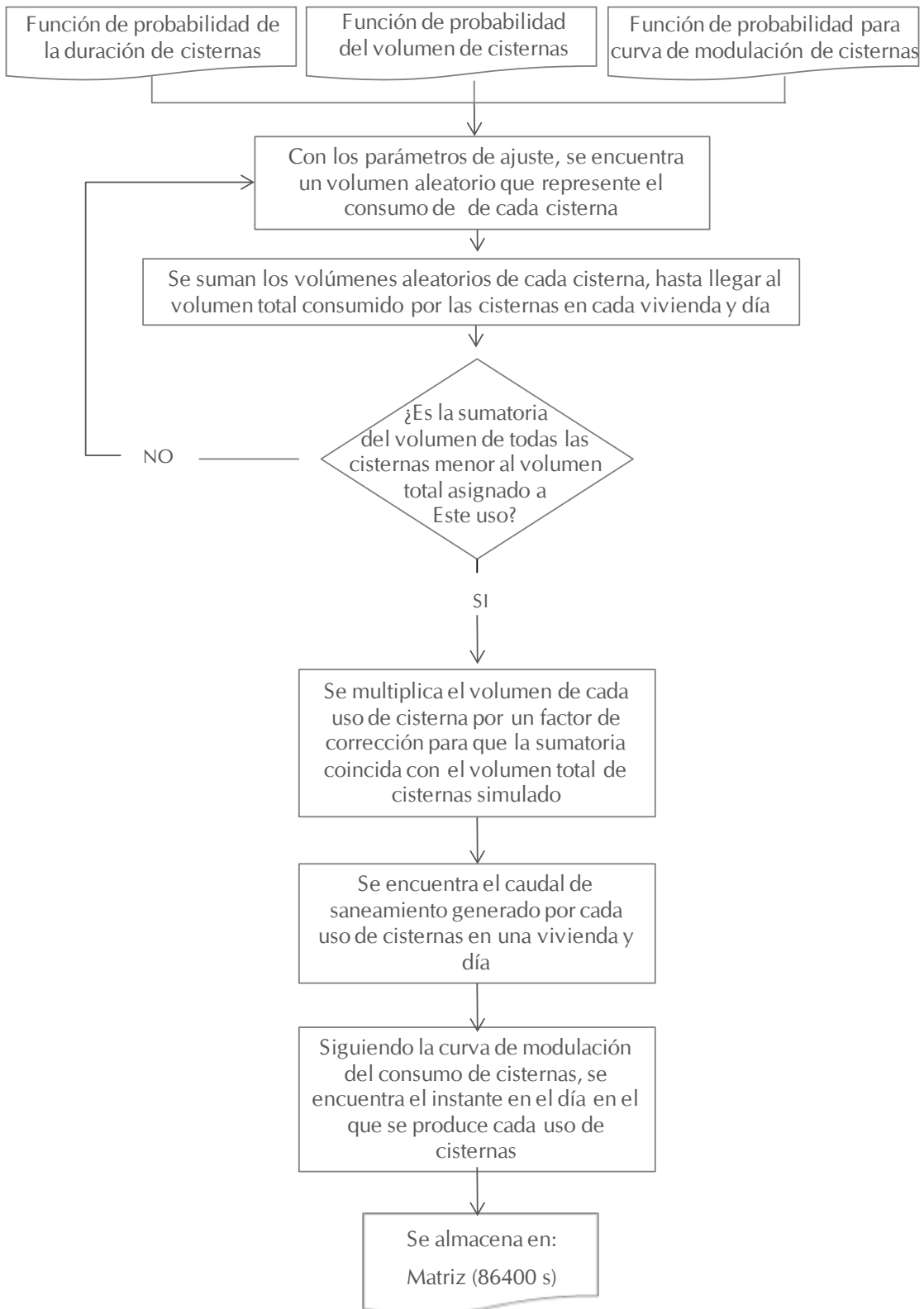
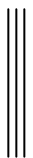


FIGURA 3-32: DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENCONTRAR EL CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DE CISTERNAS



3.9.2 DESCARGAS GENERADAS POR GRIFOS

La metodología para encontrar las descargas generadas por los grifos es conceptualmente igual a la empleada para las cisternas, encontrando en primer lugar la función de distribución de probabilidad que mejor ajusta los datos de volumen consumido por este uso. Sin embargo, dado que los grifos no son aparatos de consumo fijo, se hace necesario realizar una pequeña modificación a la metodología previamente utilizada para las cisternas.

Dicha modificación consiste en determinar la duración de cada descarga a partir del volumen y el caudal. Para ello se ajusta a una función de distribución de probabilidad los datos medidos de caudal asignados a cada uso de grifos. Con los parámetros de ajuste se generan números aleatorios ajustados a dichas funciones de distribución, y con la razón entre el volumen aleatorio y el caudal aleatorio, se establece la duración aleatoria de cada descarga.

Volumen aleatorio del uso de grifos

El gran inconveniente para encontrar el volumen aleatorio de cada descarga de grifos, reside en que este uso, es por naturaleza, un consumo completamente aleatorio, es decir, se registran volúmenes que pueden oscilar desde una decima de litro hasta los 10 litros por segundo. Razón por la cual, 28200 datos debían ser ajustados por una función de distribución de probabilidad, y para lograrlo, se hace necesario procesar los datos, de tal manera que se conserve la naturaleza estadística de estos. La figura 3-33 representa el histograma de frecuencias obtenido al ajustar a una función de distribución de probabilidad *Weibull*, debido que fue la función con mejor ajuste a la serie de datos procesada.



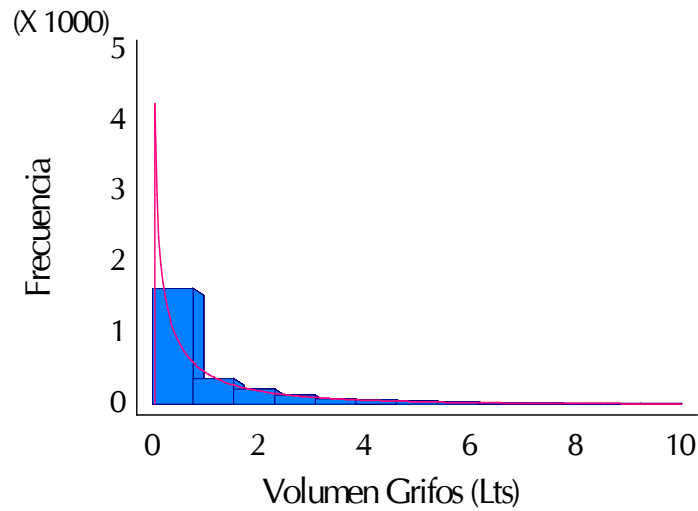


FIGURA 3-33: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (VGRIFOS)

La figura 3-34 muestra la manera en la que se ajustan los datos y aunque se observa que los volúmenes de mayor rango se van alejando de la línea de tendencia de la función de distribución *Weibull* (línea continua), se acepta como un ajuste razonable, dado que los volúmenes más recurrentes (entre 0 y 4 litros) se correlacionan adecuadamente a la tendencia impuesta por esta función de distribución. Respecto a los valores de los parámetros de la función de distribución *Weibull* para el volumen observado de grifos, son: $\rho = 0,60$ y $\lambda = 0,82$, siendo estos los parámetros de forma y escala respectivamente.

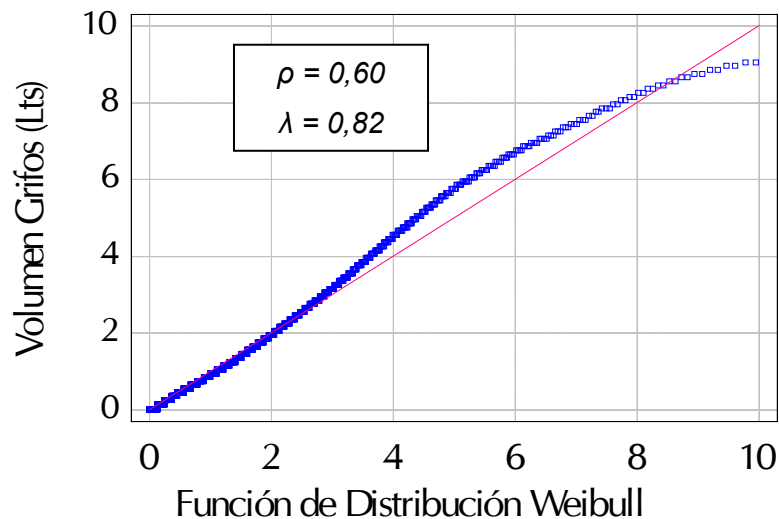


FIGURA 3-34: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL (VGRIFOS)

Caudal aleatorio del uso de grifos

El caudal descargado por los grifos, al igual que el volumen, puede ser modelado a través de una función de distribución de probabilidad *Weibull*. Respecto al análisis del histograma de frecuencias, se puede apreciar que la media de los datos, se ubica alrededor de 100 y 400 litros hora, cuyo valor medio es 272,42 l/h (dato obtenido del estudio de *Microcomponente y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid* (2008)). Otra información que aporta el histograma, es el sesgo positivo que forman los datos y la buena representación a la función de distribución *Weibull*.

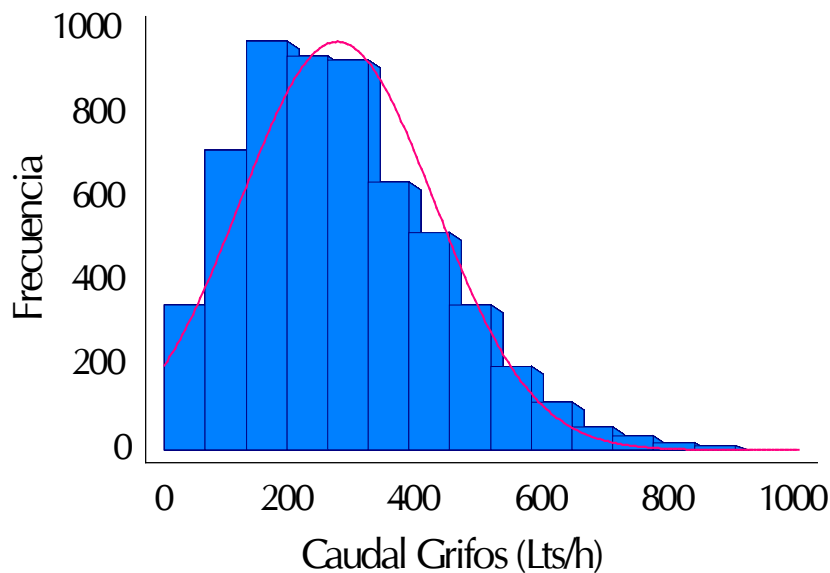


FIGURA 3-35: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (QGRIFOS)

En cuanto a los parámetros de ajuste de los caudales consumidos por los grifos, son $\rho = 1,83$ y $\lambda = 306,75$ (forma y escala). Ahora bien, la figura 3-36 muestra los valores que deben tomar los caudales aleatorios y la manera como ambas series se correlacionan de manera bastante ajustada, a pesar de que se observe poca dispersión en los valores más altos.



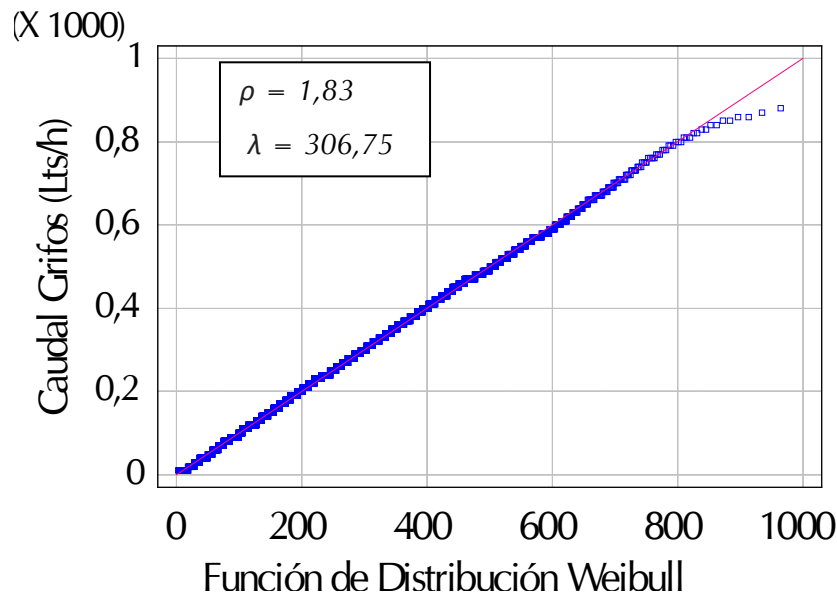


FIGURA 3-36: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL (QGRIFOS)

Encontrados los parámetros que definen las funciones de probabilidad tanto para el caudal como para el volumen, se procede a generar las descargas sintéticas. Posteriormente se calcula la duración de cada descarga con la restricción de que debe ser un número entero en segundos. Finalmente con la duración obtenida, se recalcula el caudal de aguas residuales generado por el uso de grifos.

$$\bar{D}_{G_i} = \frac{\bar{V}_{G_i} \cdot C_i}{\bar{Q}_{G_i}} \quad \text{Ecuación. 8}$$

Siendo:

\bar{D}_{G_i} : Duración aleatoria para cada descarga de grifos i (s)

\bar{Q}_{G_i} : Caudal aleatorio del consumo de grifos i (l/s)

\bar{V}_{G_i} : Volumen simulado de cada n pulso de grifos (l)

Para recalcular el caudal de aguas residuales generado por los grifos, se emplea la ecuación 8, adaptado los valores de las variables a este uso.

$$\bar{Q}_{G_i} = \frac{\bar{V}_{G_i}}{\bar{D}_{G_i}} \quad \text{Ecuación. 9}$$

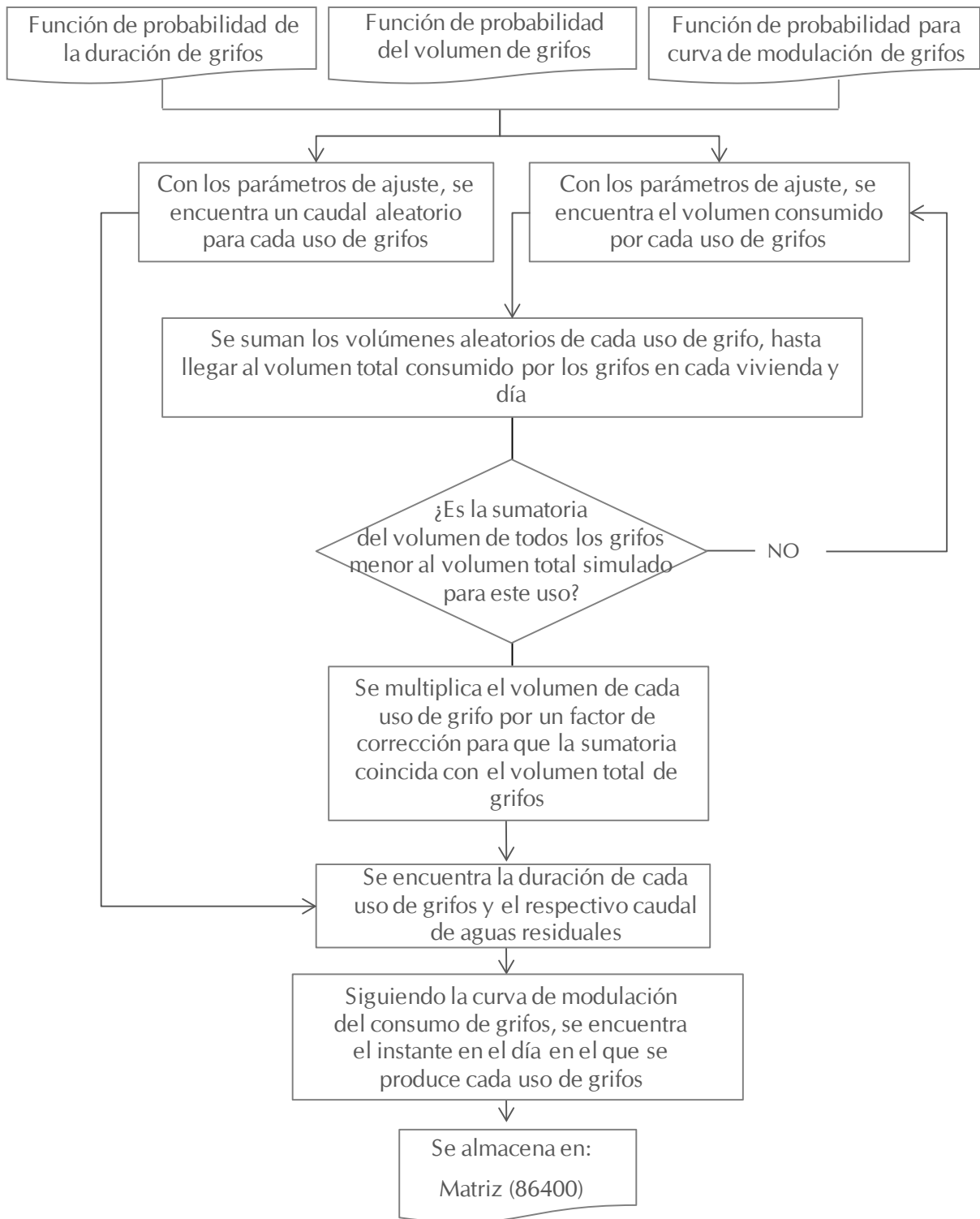


FIGURA 3-37: DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENCONTRAR EL CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DE GRIFOS

3.9.3 CAUDAL DE DESCARGAS GENERADAS POR LAS DUCHAS

Dada la similitud conceptual de las duchas y los grifos, se utiliza la misma metodología para encontrar el caudal de aguas residuales generado por las primeras. Por tanto se presentan únicamente las funciones de distribución utilizadas para obtener los parámetros que definen las variables de volumen y caudal, así como un análisis de la curva de modulación que representa el uso de duchas como un volumen aleatorio.

Volumen aleatorio de las duchas

El comportamiento de las duchas es muy similar al de los grifos, con la gran diferencia que en cada uso de duchas se generan volúmenes más altos con respecto a los grifos. La función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos, es la función de distribución *Gamma*.

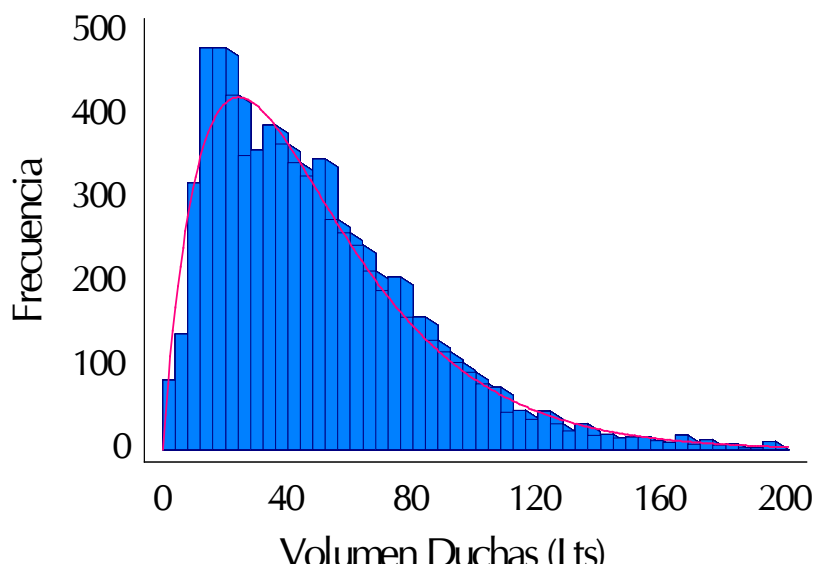


FIGURA 3-38: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (VDUCHAS)

Se puede observar en el histograma de frecuencias que los datos más recurrentes aparecen entre 10 y 50 litros. Sin embargo, existen datos con una frecuencia mucho menor, pero con volúmenes que superan con gran diferencia la media del consumo. Este fenómeno se puede asociar con el uso de bañeras, las cuales presentaron características tan similares a las duchas, que permitió agruparse en

uno solo uso. En cuanto a la calidad del ajuste que tiene la serie de datos a la función de distribución de probabilidad *Gamma*, se puede apreciar en la figura 3-39 que esta función reproduce la serie observada de modo bastante fidedigno, excepto en los valores extremos que presentan una ligera dispersión, pero sin mayores alteraciones respecto al comportamiento estadístico de toda la serie. Los parámetros de forma y escala son $\alpha = 1,94$ y $\beta = 0,039$.

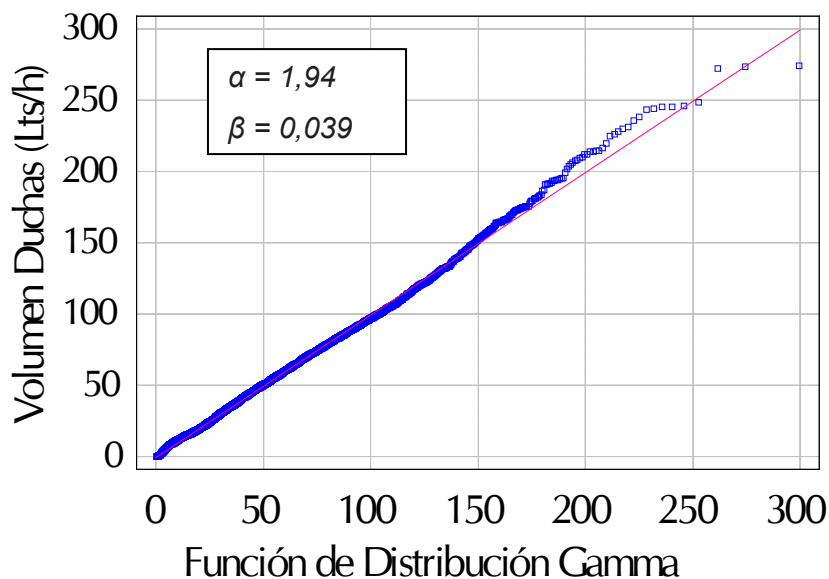


FIGURA 3-39: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAMMA (VDUCHAS).

Caudal aleatorio de las duchas

El histograma de frecuencias (figura 3-40) obtenido a partir de los datos de caudales generados por el uso de duchas, muestra como el ajuste mediante la función de distribución de probabilidad *Gamma* representa de manera adecuada la serie de datos observada. No obstante, es factible apreciar como las observaciones correspondientes a los eventos de mayor volumen se distancian del ajuste proporcionado por la función de probabilidad.



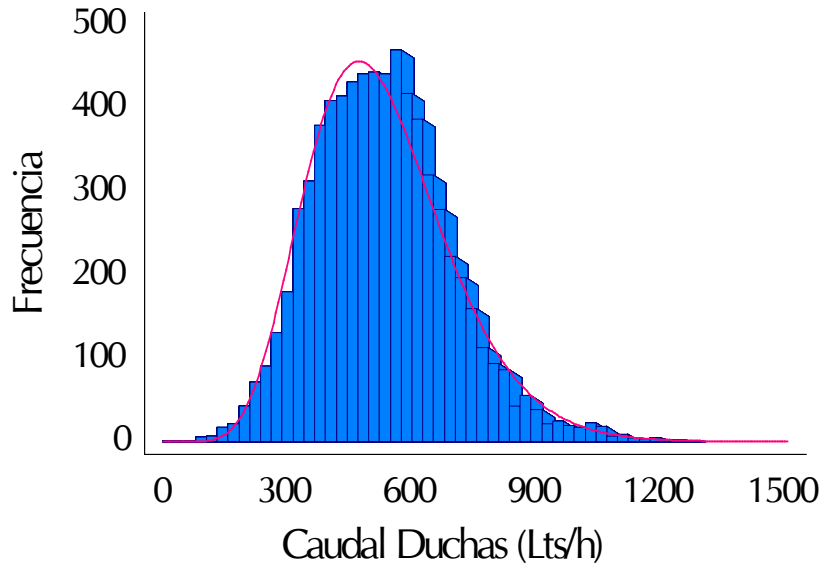


FIGURA 3-40: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS (QDUCHAS).

Respecto a los parámetros forma y escala de la función de distribución Gamma, son respectivamente: $9,48$ y $0,018$.

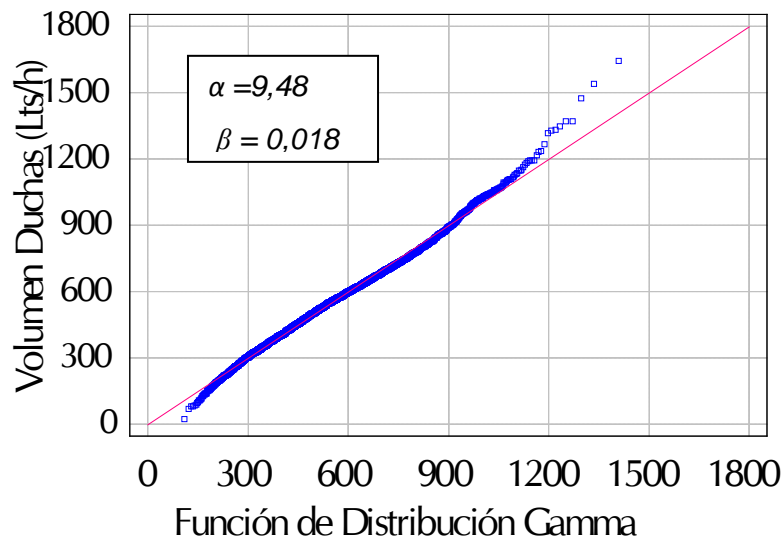


FIGURA 3-41: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAMMA (QDUCHAS).

En cuanto a la distribución de las descargas de duchas en el día, se recurre a la curva de modulación (figura 3-42). En esta ocasión se considera relevante presentar dicha curva, pues demuestra que el comportamiento de este uso se corresponde en bastante medida con la curva de modulación global del consumo. Se puede observar como un primer pico de consumo se presenta

durante las primeras horas de la mañana, coincidiendo con las horas en la que se espera que los usuarios se levanten y tomen una ducha para salir al trabajo, escuelas, etc. El segundo pico de consumo, se produce al finalizar el día, concordando con las horas en la que los usuarios retornan a sus hogares y se preparan para ir a dormir.

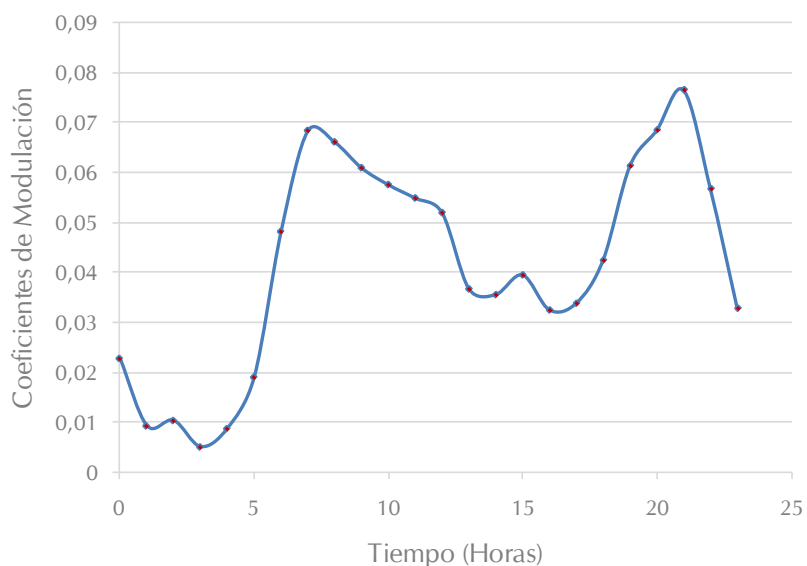


FIGURA 3-42: CURVA DE MODULACIÓN DEL USO DE DUCHAS EN UNA VIVIENDA/DÍA

La figura 3-43, resume la metodología utilizada para calcular las descargas a la red de evacuación de aguas, generadas por el uso de duchas.



Función de probabilidad de la duración de duchas Función de probabilidad del volumen de duchas Función de probabilidad para curva de modulación de duchas

Con los parámetros de ajuste, se encuentra un caudal aleatorio para cada uso de duchas

Con los parámetros de ajuste, se encuentra el volumen consumido por cada uso de duchas

Se suman los volúmenes aleatorios de cada uso de ducha, hasta llegar al volumen total consumido por las duchas en cada vivienda y día

¿Es la sumatoria del volumen de todas las duchas menor al volumen total simulado para este uso?

NO

SI

Se multiplica el volumen de cada uso de ducha por un factor de escala para que la sumatoria coincida con el volumen total simulado para las duchas

Se encuentra la duración de cada uso de duchas y el respectivo caudal de aguas residuales

Siguiendo la curva de modulación del consumo de duchas, se encuentra el instante en el día en el que se produce cada uso de duchas

Se almacena en:

Matriz (86400,1)

FIGURA 3-43: DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENCONTRAR EL CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES DE DUCHAS



3.9.4 DESCARGAS GENERADAS POR LAS LAVADORAS

Para describir el proceso utilizado para encontrar el caudal descargado por las lavadoras se hace necesaria una previa introducción en la que se explica el funcionamiento de las mismas. Dado que su uso consiste en la aparición de eventos repetitivos, cada uno de ellos con igual caudal. Es decir, una toma de lavadora de un volumen determinado, descarga un caudal repartido entre cada uno de los eventos que se utilicen en el proceso completo de lavado, que a su vez pueden variar en función del programa seleccionado y por supuesto del tipo de lavadora, la carga de la lavadora (cantidad de ropa), la marca, el fabricante, entre otros.

El proceso para encontrar los parámetros de volumen, duración y caudal de cada descarga de lavadora, se describen a continuación:

El primer paso es encontrar el volumen consumido por cada lavadora. Dado que este volumen está condicionado por el programa empleado y la marca del aparato, se le solicitó información a varios fabricantes de lavadoras, entre ellos FAGOR, quienes facilitaron la duración y volumen de cada uno de los ciclos, en función del programa seleccionado. Dicha información se presentan en la figura 3-44. Esta información es también corroborada con mediciones en diferentes tipos de lavadoras, y se llega a la conclusión que el volumen consumido en cada proceso de lavado, es un valor aleatorio que se mantiene entre los 45 litros para lavadoras pequeñas, con poca carga de ropa y, hasta 75 litros para lavadoras más grandes.

		PROGRAMAS																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
		1	2	3	4	5	10	6	8	9	7	11	13	12	15	16	14		
ALGODÓN FRÍO																			
	CICLO RÁPIDO 30'	28	28	39	62	84	62	FRÍO	28	39	28	FRÍO	32	FRÍO	FRÍO	FRÍO			
ALGODÓN 40°C																			
	ALGODÓN 60°C																		
ALGODÓN 90°C																			
	PRELAVADO 60°C																		
DELICADO FRÍO																			
	DELICADO 30°C																		
DELICADO 40°C																			
	DELICADO 60°C																		
COLD WOOL																			
	WOOL 35°C																		
SUAVE																			
	SPINNING																		
CICLO RÁPIDO 15'																			
	FRÍO																		
		DURACIÓN																	
		50	30	52	57	80	110	100	50	50	55	50	30	40	25	10	15		

FIGURA 3-44: DURACIÓN DE CADA CICLO EN FUNCIÓN DEL PROGRAMA SELECCIONADO. FAGOR

Otra de las diferencias con las anteriores simulaciones de usos está en que el volumen aleatorio generado por un solo evento de lavadora puede llegar a ser inferior al volumen real consumido en un proceso total de lavado. Para solucionar este inconveniente, se procede a encontrar el residuo entre ambos volúmenes y éste a su vez, es asignado al volumen total del siguiente día; repitiendo el proceso hasta que ambos volúmenes coincidan.

Con el fin de entender mejor el método se presenta como ejemplo una vivienda cuyo volumen asignado al uso de la lavadora, para un día, es de 100 litros. Se genera un volumen aleatorio para un primer evento cuyo volumen es 60 litros, dado que este valor es inferior al volumen total, se genera un segundo evento, con un volumen aleatorio de 70 litros. En este caso, el resultado de sumar ambos eventos es 130 litros; sin embargo, el volumen total consumido por las lavadoras en la vivienda es de 100 litros. Dado que no es posible fraccionar el segundo evento para que coincida con el volumen total, se decide entonces, considerar solo el evento de 60 litros y almacenar los 40 litros restantes para ser considerados en el volumen asignado a este uso en el siguiente día.

Una vez se ha obtenido el volumen aleatorio utilizado en cada toma de una lavadora, se procede a encontrar un número aleatorio que represente el número de descargas necesarias para evacuar el volumen de cada toma de lavadora, y a su vez, se encuentra el volumen correspondiente a cada una de las descargas, como la relación entre el volumen aleatorio de cada evento y el número de ciclos que pueden variar entre 3 y 5.

$$\bar{V}_{L_i} = \frac{\bar{V}_{evento_i}}{N_{Ciclo}} \quad \text{Ecuación. 10}$$

Siendo:

\bar{V}_{L_i} : Volumen de descarga de la lavadora i(l)

$\bar{V}_{evento,i}$: Volumen aleatorio de cada evento de la lavadora i(l)

N_{Ciclo} : Número de ciclos generados en cada evento



Duración de cada pulso de lavado

Para encontrar la duración de cada descarga, se debe encontrar primero el caudal generado en el evento de una lavadora, y para ello se recurre de nuevo a la información suministrada por los fabricantes, y a mediciones realizadas en varios tipos de lavadoras. De esto se deduce que el caudal total que aporta una lavadora tras cada proceso de lavado, es un número aleatorio que puede variar entre los 200 y los 600 litros/hora.

$$\bar{D}_{L_i} = \frac{3600 \cdot \bar{V}_{L_i}}{\bar{Q}_{L_i}} \quad \text{Ecuación. 11}$$

Siendo:

\bar{D}_{L_i} : Duración de cada descarga de la lavadora i (s)

\bar{Q}_{L_i} : Caudal aleatorio de la descarga de la lavadora i (l)

Finalmente, el caudal aleatorio de aguas residuales de cada descarga de una lavadora, se encuentra con la ecuación 8, ajustando las variables al consumo de lavadoras y creando así, la ecuación 12.

$$\bar{Q}_{K,L_i} = \frac{\bar{V}_{L_i}}{\bar{D}_{L_i}} \quad \text{Ecuación. 12}$$

Siendo:

\bar{Q}_{K,L_i} : Caudal de la descarga de la lavadora i (l/s)

En cuanto a la ubicación en el tiempo de estos caudales, se emplea la misma metodología comentada anteriormente para los otros usos, asignando los caudales generados en cada descarga, en la matriz dimensionada para almacenar los 86400 segundos. La figura 3-45 resume esta metodología.



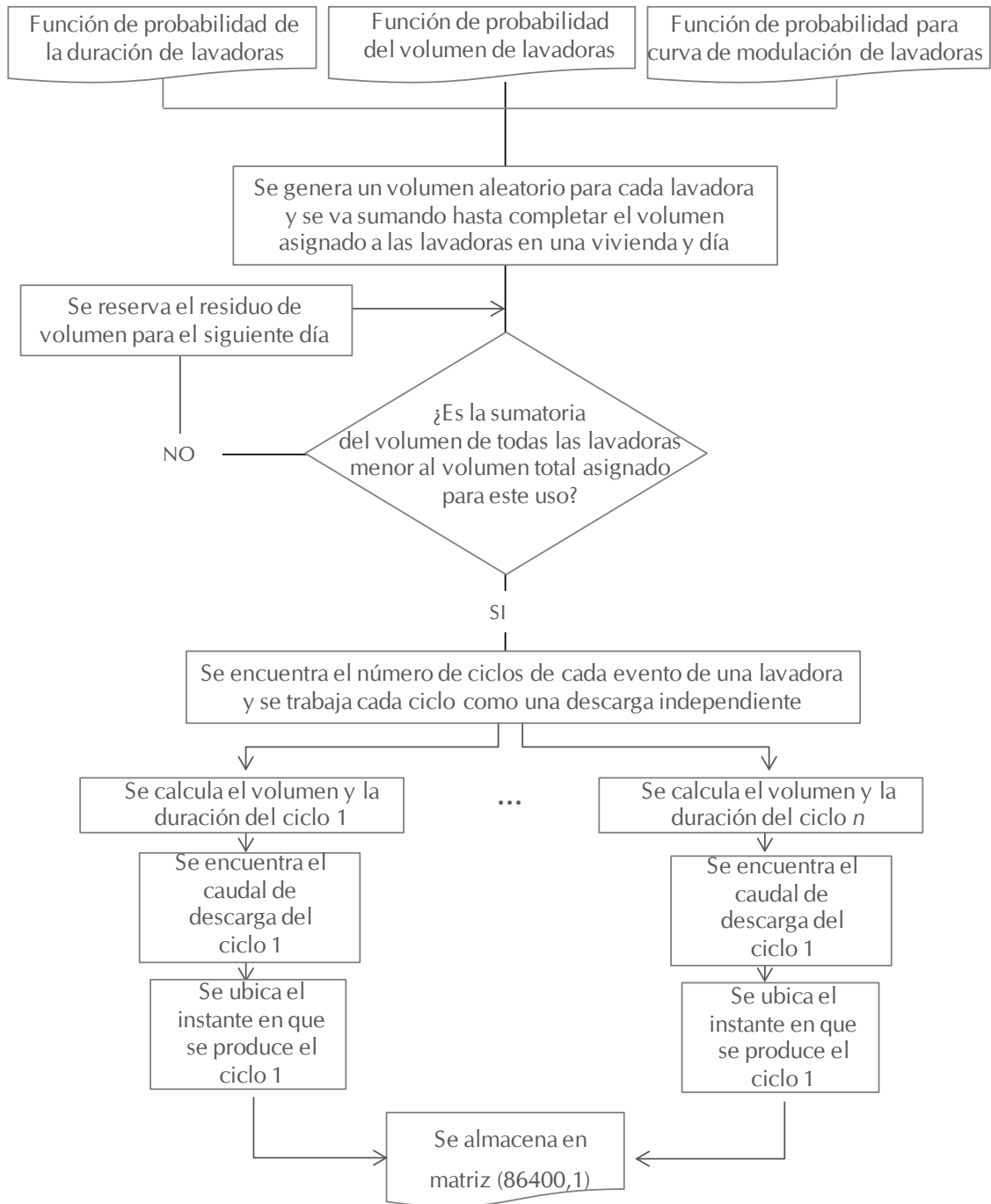


FIGURA 3-45: DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENCONTRAR EL CAUDAL DE SANEAMIENTO DE LAVADORAS

3.9.5 DESCARGAS GENERADAS POR LAVAVAJILLAS

El funcionamiento de un lavavajilla es igual al de las lavadoras, con la diferencia que se trabajan caudales, volúmenes de una duración mucho menor a las consideradas para las lavadoras. Sin embargo, la formulación es idéntica.

A continuación, se presentan únicamente las consideraciones que se tienen en cuenta para establecer las variables que describen el comportamiento de este tipo de aparatos. La primera de ellas tiene que ver con el volumen consumido en cada evento de lavado, el cual gracias a la información suministrada por los fabricantes y tras una serie de mediciones, se obtiene que los lavavajillas utilizan un volumen aleatorio entre 10 y 25 litros. En cuanto al número de ciclos de cada evento, se asumen que un lavavajillas utiliza entre 2 y 5 ciclos para descargar el volumen total utilizado en cada evento. Con esta información, se encuentra el volumen aleatorio de cada descarga.

Para encontrar la duración de cada evento de lavado, se recurre de nuevo a información suministrada por los fabricantes y se define que el caudal aportado por los lavavajillas durante un evento, es un dato que oscila entre 100 y 300 litros/hora. En cuanto a la ubicación de cada ciclo, se acude de nuevo a la información suministrada por la curva de modulación y se distribuye cada una de las descargas en el tiempo, empleando el mismo procedimiento comentado anteriormente para los otros usos. Por otro lado, se encuentra el caudal de cada descarga utilizando la ecuación 12 y adaptándola a los datos propios de los lavavajillas. Para tener más claridad del proceso, se resume la metodología en la figura 3-46.



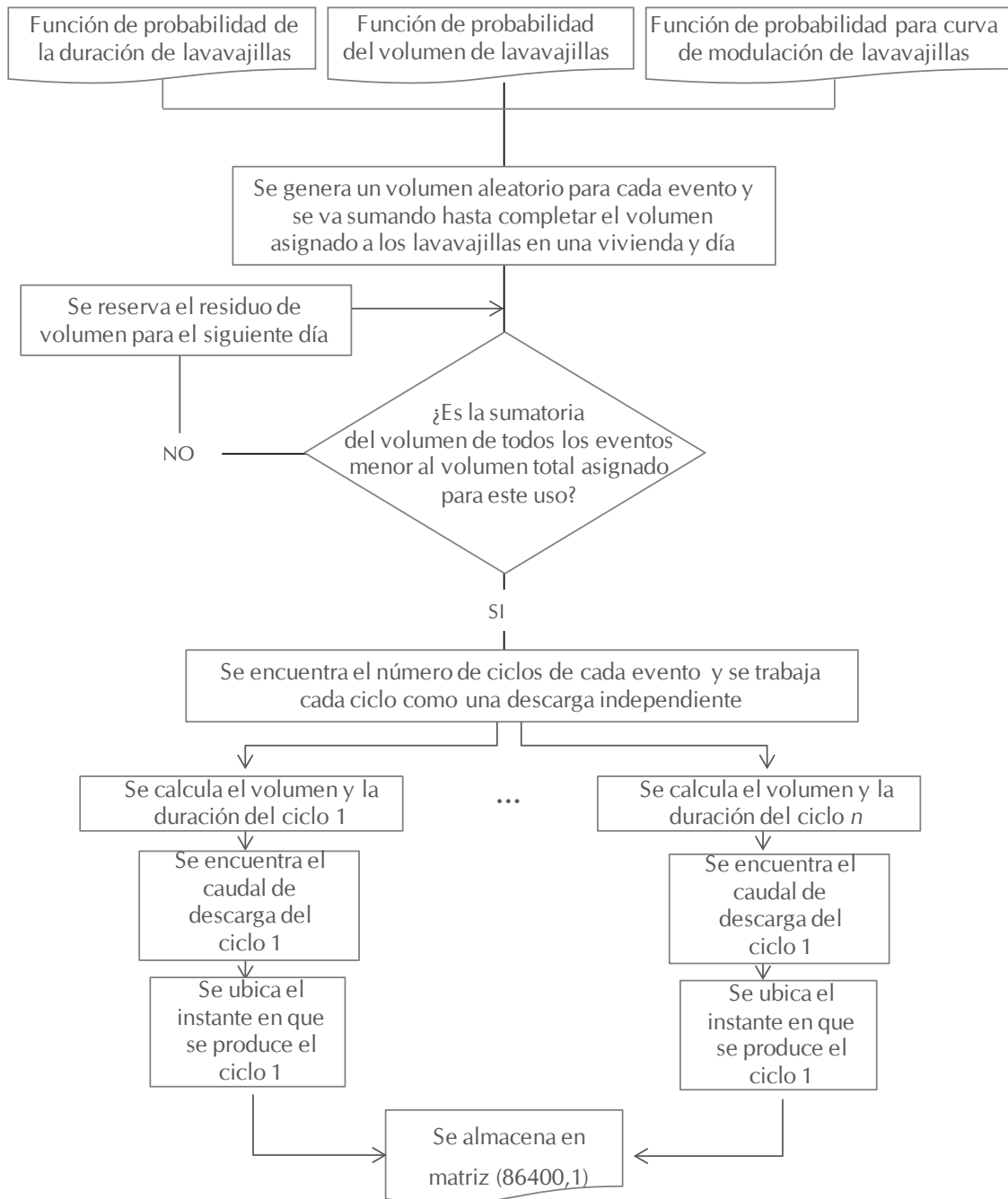


FIGURA 3-46: DIAGRAMA DE FLUJO PARA ENCONTRAR EL CAUDAL DE SANEAMIENTO DE LAVAVAJILLAS

3.9.6 CAUDAL PUNTA DE DISEÑO Y PROBABILIDAD DE NO SUPERARLO

Se insiste mucho en los anteriores epígrafes, en que los caudales de aguas residuales obtenidos en cada uno de los pulsos; así como el instante en el que se produce, debían ser almacenados en una matriz, cuya dimensión, permite ubicar el caudal correspondiente en cualquiera de los 86400 segundos de un día. El motivo, en primer lugar, es considerar que en un segundo puede ocurrir la descarga de varios usos. Por tanto, el caudal de descarga será la suma de cada uno de ellos. De esta manera, se considera la superposición de pulsos, que en términos de saneamiento, correspondería a la simultaneidad en la descarga de los aparatos. Por consiguiente, entre más número de aparatos se utilicen en cada instante de tiempo (un segundo), mayor es el caudal de aguas residuales aportado a la red de evacuación de aguas.

Bajo esta premisa, la función objetivo de este modelo, busca encontrar la función de distribución de probabilidad que mejor represente el máximo caudal de aguas residuales que se puede producir en un periodo de tiempo.

$$\bar{Q}_{P,t} = \text{MAX} \cdot \bar{Q}_K \left[\sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n \left(\bar{Q}_{K,C}; \bar{Q}_{K,G}; \bar{Q}_{K,D}; \bar{Q}_{K,L}; \bar{Q}_{K,V} \right)_{n,m} \right]_K$$

$$K = 1 \dots 86400 \quad : \quad t = 1 \dots \xi \quad \text{Ecuación. 13}$$

Siendo:

\bar{Q}_p : Caudal punta de aguas residuales generado en un día (l/s)

\bar{Q}_K : Máximo caudal de aguas residuales generado en un segundo (l/s)

m : Número de viviendas simuladas

n : Numero de aparatos utilizado en segundo

t : Número de días simulado

4 ANÁLISIS DE LOS CAUDALES DE DESCARGA PARA EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS HIDROSANITARIOS.

4.1 INTRODUCCIÓN

Los datos de entrada al modelo que se presenta en este trabajo de investigación corresponden a los datos observados de volumen, duración y caudal de los pulsos de consumo, modelados mediante una serie sintética de cada una de las variables mencionadas. Seguidamente, al hablar de modelación, se espera que la salida que se obtenga del modelo se aproxime lo suficientemente a las características establecidas a partir de los datos medidos. Para comprobar que el modelo funciona correctamente, se presenta a continuación el comportamiento en el tiempo de cada una de las descargas de los diferentes aparatos, y se compara con la respectiva curva de consumo, de tal manera que se pueda comprobar si existe correspondencia entre ambas series.

Por otro lado, se presenta el análisis de los caudales punta obtenidos del modelo, haciendo énfasis en dos aspectos importantes. El primero de ellos, es que para los análisis se optó por cuatro diferentes intervalos de tiempo, ponderándose caudales cada 10 segundos, 30 segundos, un minuto y 1 hora, para un total de 5000 viviendas y un periodo de retorno de un año. El segundo aspecto, tiene que ver con el hecho de que los caudales punta en función del número de viviendas consideradas, no corresponden a un valor fijo, sino que cada uno de ellos es una variable aleatoria que sigue una función de distribución de probabilidad que es necesario determinar.

Para encontrar la función de distribución de probabilidad que ajusta a los caudales punta, se realizan 200 simulaciones adicionales con un intervalo de tiempo de 10 segundos, para 20, 50, 100, 300 y 500 viviendas. Cada simulación de un año utiliza una serie de números aleatorios diferentes. De esta manera se



representa la variabilidad del caudal punta cada año, y a la vez, el comportamiento de los caudales de aguas residuales en un periodo de hasta 100 años.

Finalmente, no solo se encuentra la función de distribución de probabilidad más adecuada, sino que se evalúa la variabilidad de los parámetros de ajuste de dicha función. Estos parámetros son los que posteriormente permiten reproducir el comportamiento de los caudales punta, a medida que se aumenta el número de viviendas. Por otro lado, se calculan los coeficientes de laminación por los que se debe multiplicar el caudal punta, obtenidos en un intervalo de tiempo de 10 segundos; para transformarlo en caudales con intervalos de tiempo de 30 segundos, un minuto y una hora, para un total de hasta 1000 viviendas.



Generación de un modelo estocástico para la determinación de las descargas de aguas negras a la red de evacuación de las aguas domiciliarias

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Objetivo: Validar el modelo propuesto y encontrar los caudales de diseño de los sistemas hidrosanitarios con su respectiva probabilidad de ocurrencia.

Validación de la metodología propuesta

Se presenta el comportamiento de las descargas de cada uno de los usos, con el fin de contrastarlas con los respectivos patrones de consumo (curvas de modulación del consumo)

Ley de probabilidad de los caudales punta de agua residual en edificios de viviendas

Se presenta la ley de probabilidad de ocurrencia de un caudal punta para un periodo de retomo de un año, y un determinado número de viviendas, así como la influencia de laminar dichos caudales en intervalos de segundos.

Intervalos de 10 segundos

Función de probabilidad de caudales

Intervalos de 30 segundos

Función de probabilidad de caudales

Intervalos de 1 minuto

Función de probabilidad de caudales

Intervalos de 1 hora

Función de probabilidad de caudales

Función de distribución de probabilidad de los caudales puntas

Se presenta la función de distribución de probabilidad que representa fidedignamente del comportamiento de los caudales en función del número de viviendas y el tiempo considerado.

COMPARACIÓN CON LA NORMA Y CONCLUSIONES

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: COMPROBACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

El primer análisis que se presenta a continuación, corresponde al estudio del comportamiento a lo largo del día de las descargas de cada uno de los aparatos analizados por separado, para un intervalo de tiempo de 60 segundos. Seguidamente, se comparan con las curvas de modulación correspondientes a los datos observados de consumo y se verifica si existe correspondencia entre ambas series. Dicha correspondencia permite comprobar si las simulaciones del modelo son consecuentes con las características que se le han impuesto a través en los datos de consumo.

4.2.1 COMPARACIÓN DE LA CURVA DE MODULACIÓN DEL VOLUMEN TOTAL REAL Y MODELADO

Las curvas de modulación representan la manera como los usuarios demanda el consumo de agua, mientras que de cara al saneamiento representan el comportamiento de las descargas de cada uno de los aparatos a lo largo del día. Con el fin de contrastarlas es necesario representarlas tanto para los datos de volúmenes observados como para los volúmenes aleatorios modelados para cada una de las descargas de los diferentes aparatos, y observar la similitud que debe existir entre ambas series. Por otro lado, aunque se espera que exista poca discrepancia entre las curvas de modulación y las curvas que representan el comportamiento de las descargas, no se puede perder de vista que los resultados de las simulaciones provienen de un modelo y por tanto el ajuste no será absolutamente consistente con los datos medidos. La tabla 4-1 muestra los coeficientes de modulación de la serie observada, de la cual se puede obtener información sobre el volumen horario, multiplicando cada coeficiente por los 368 l/vivienda/día, correspondiente al consumo medio de las viviendas monitorizadas.



TABLA 4-1: COEFICIENTES DE SIMULACIÓN DE LAS VIVIENDAS MONITORIZADAS

Tiempo	Coeficientes	Tiempo	Coeficientes
0	0,6949	12	1,3630
1	0,4011	13	1,2352
2	0,3036	14	1,2888
3	0,2316	15	1,3393
4	0,2687	16	1,1434
5	0,3939	17	1,0585
6	0,6828	18	1,0688
7	1,0888	19	1,1849
8	1,2316	20	1,2910
9	1,3259	21	1,4417
10	1,3941	22	1,2601
11	1,3833	23	0,9239

La tabla 4-2 muestra los coeficientes calculados con los resultados de las simulaciones, correspondientes a la descarga de un sistema de 5000 viviendas durante 100 días.

TABLA 4-2: COEFICIENTES DE SIMULACIÓN DE LAS VIVIENDAS SIMULADAS

Tiempo	Coeficientes	Tiempo	Coeficientes
0	0,7601	12	1,3940
1	0,4267	13	1,2477
2	0,2773	14	1,3998
3	0,2147	15	1,3521
4	0,2498	16	1,2265
5	0,3453	17	1,1642
6	0,5549	18	1,0714
7	1,0433	19	1,2266
8	1,1546	20	1,3019
9	1,2384	21	1,4317
10	1,3059	22	1,2894
11	1,4048	23	0,9189



La figura 4-1, representa las curvas de modulación obtenidas tanto para las viviendas simuladas (marcadores triangulares) como para las viviendas monitorizadas (marcadores circulares).

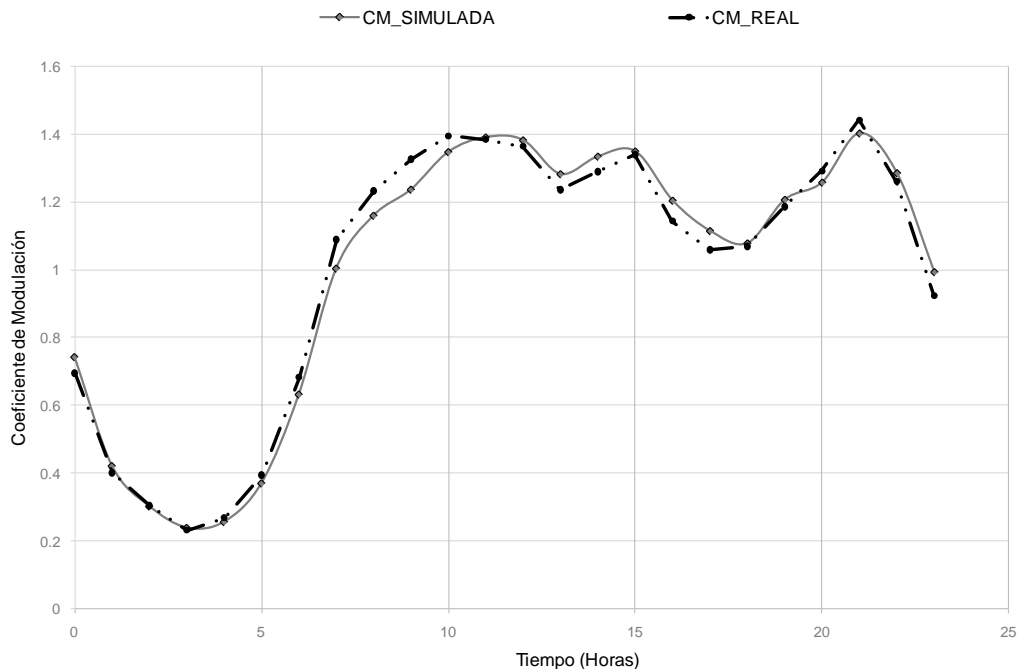


FIGURA 4-1: CURVA DE MODULACIÓN REAL Y SIMULADA PARA 5000 VIVIENDAS

Tal y como se puede observar en la figura 4-1, existe una fuerte coincidencia entre ambas series, permitiendo validar en primera instancia, y de manera muy general, la metodología utilizada para simular el comportamiento de la estimación de caudales en la red de saneamiento en edificios de viviendas. En cuanto al comportamiento en general, se observa como en las horas de menor consumo, es decir, entre las 0:00 y las 6:00, ambas curvas están altamente correlacionadas, así como en las horas entre las 19:00 y las 24:00, en las que no solo se observa una alta similitud, si no también, en las que se visualiza un pico de consumo.

Por otro lado, con el fin de presentar de manera cuantitativa la bondad de ajuste de los datos del modelo respecto a los datos observados, se analiza la correlación que existe entre los coeficientes de la curva de modulación de la serie observada y los coeficientes de la curva de modulación de la serie simulada

(figura 4-2), observándose que existe una linealidad entre ambas series con un grado de ajuste bastante bueno, además de indicar que el caudal punta para ambas series, le corresponde un coeficiente de modulación igual a 1,4.

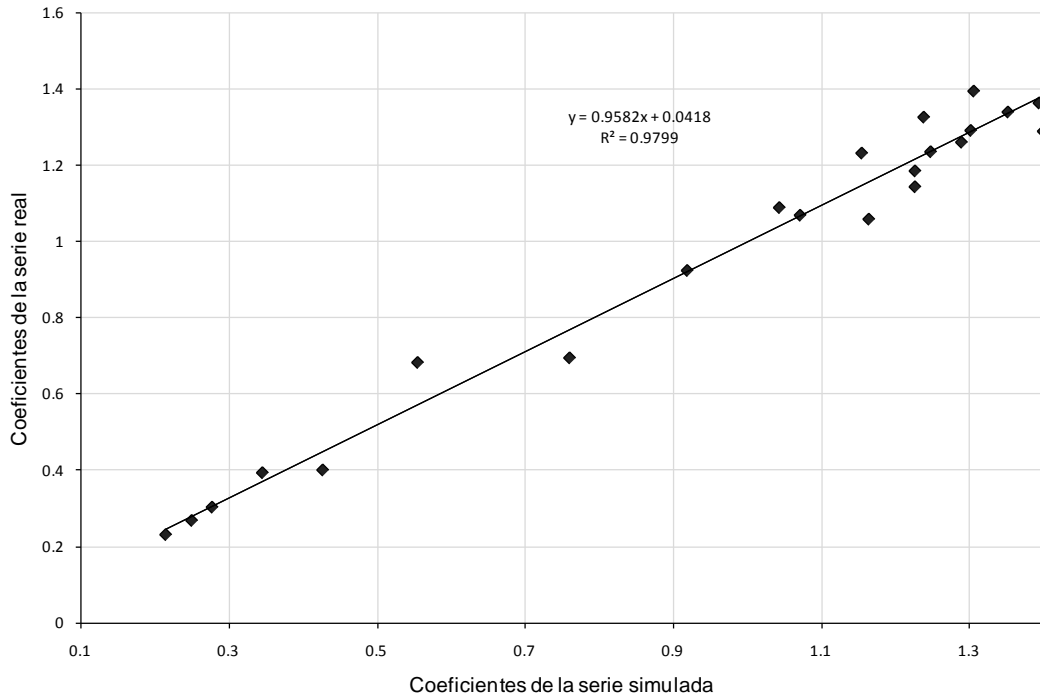


FIGURA 4-2: COEFICIENTES DE MODULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONSUMO VS LOS COEFICIENTES DE MODULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS DESCARGAS

De manera complementaria, la comparación entre el comportamiento de las descargas realizadas por cada uno de los aparatos modelados y las curvas de modulación de consumo en dichos aparatos, las cuales han sido extraídas del estudio *“Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid (2008)”*. Resaltando que los aparatos son los principales protagonistas pues al realizar modelos con tan alto grado de detalle es indispensable comprobar que los datos no solo provienen de muestras significativas, sino también, que la respuesta obtenida del modelo concuerda con el patrón de comportamiento establecido en las mediciones.

4.2.2 PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS DESCARGAS DE LOS GRIFOS

Los grifos cuentan con la particularidad que al ser aparatos de uso completamente aleatorio, (no se pueden caracterizar con un volumen ni un caudal fijo), las descargas se deben distribuir en el tiempo, siguiendo el patrón de comportamiento pautado por el consumo. En este caso, la curva de modulación del consumo es quien fija dicho patrón, siendo indispensable que la distribución de las descargas de grifos en cada instante de tiempo, corresponda a la distribución horaria de los volúmenes reales demandados por este tipo de aparatos.

En la figura 4,3 se presenta la relación entre los coeficientes de modulación obtenidos a partir del volumen aleatorio de grifos que se modela en cada simulación de 5000 viviendas, en un intervalo de tiempo de 60 segundos, y los coeficientes de modulación encontrados a partir del volumen real consumido por los grifos, en las viviendas monitorizadas, encontrados mediante la ecuación 14.

$$\bar{C}_i = 1440 \cdot \frac{\sum_{i=0}^{60} x_i}{\sum_{i=0}^{1440} x_i} \quad \text{Ecuación. 14}$$

Siendo:

\bar{C}_i : Coeficiente de modulación del uso de grifos

x_i : Volumen aleatorio de grifos simulados en cada descarga de grifos (l)

La ecuación 14 se multiplica por 1440 (valor correspondiente al número de minutos en un día) con el fin de convertir la escala temporal de 60 segundos (1 minuto) a una hora, y conseguir con ello representar ambas series en un mismo intervalo de tiempo. Por otro lado, el coeficiente de modulación de la serie real, se calcula según la ecuación 15.



$$C_i = 24 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\bar{V}_i} \quad \text{Ecuación. 15}$$

Siendo:

C_i : Coeficiente de modulación de la serie observada en la hora i

V_i : Volumen real de grifo en un intervalo de una hora

\bar{V}_i : Promedio de volumen total diario consumido

N: Número de consumos en la hora i

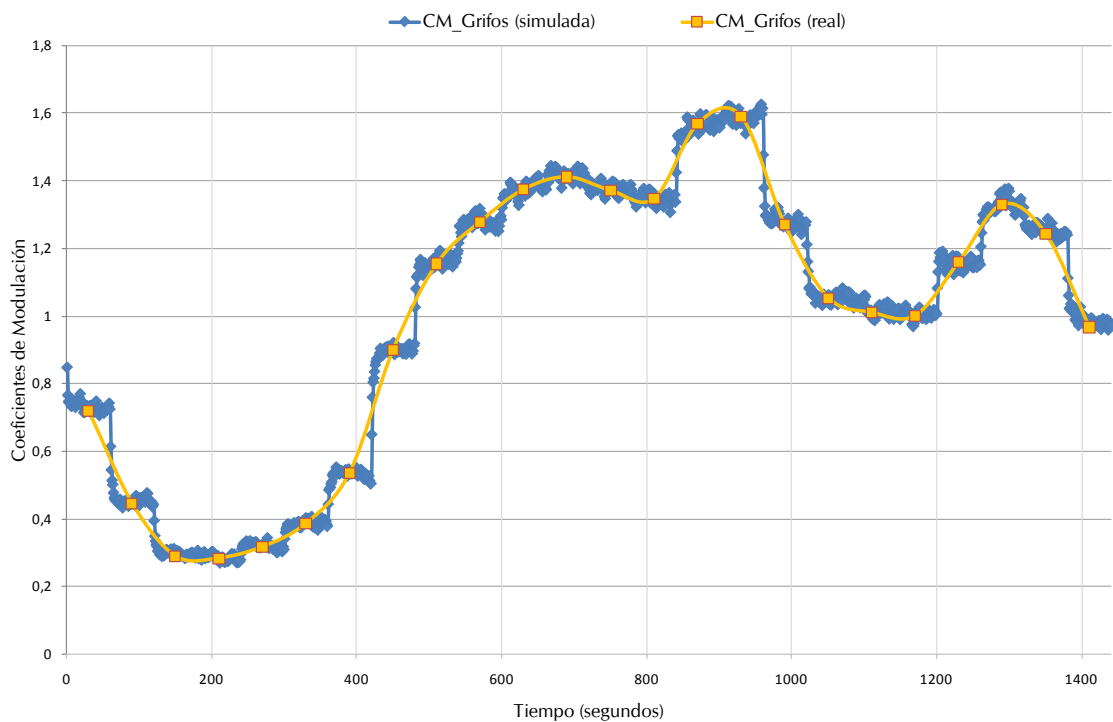


FIGURA 4-3: CURVA DE MODULACIÓN DE GRIFOS (REAL Y SIMULADA)

Respecto a las curvas de modulación, se puede observar la alta relación que existe entre ambas series, confirmando que la simulación de descargas de consumo en los grifos siguen el patrón de comportamiento medido en las viviendas. Por otra parte, se aprecia como la grafica de la descargas sigue una forma escalonada, el cual se debe al supuesto del modelo que considera que en cada hora del día las descargas se distribuyen uniformemente.

4.2.3 PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS DUCHAS

Siguiendo con la tipología de aparatos con uso aleatorio (aparatos que no consumen ni un volumen ni un caudal fijo), las duchas es también uno de ellos. En cuanto al comportamiento general, se observa claramente que los picos de volumen se presentan en las primeras horas de la mañana, es decir, entre los 400 minutos que equivalen a las 6:00 y los 800 minutos equivalentes a las 10:00, y entre los 1100 minutos equivalentes a las 18:00 y los 1300 minutos, equivalentes a las 22:00 horas. La figura 4-4 corrobora el anterior análisis y muestra la alta correlación que existe entre la distribución del número de descargas de duchas que se producen en el día y la distribución de consumo en duchas generado mediante las simulaciones.

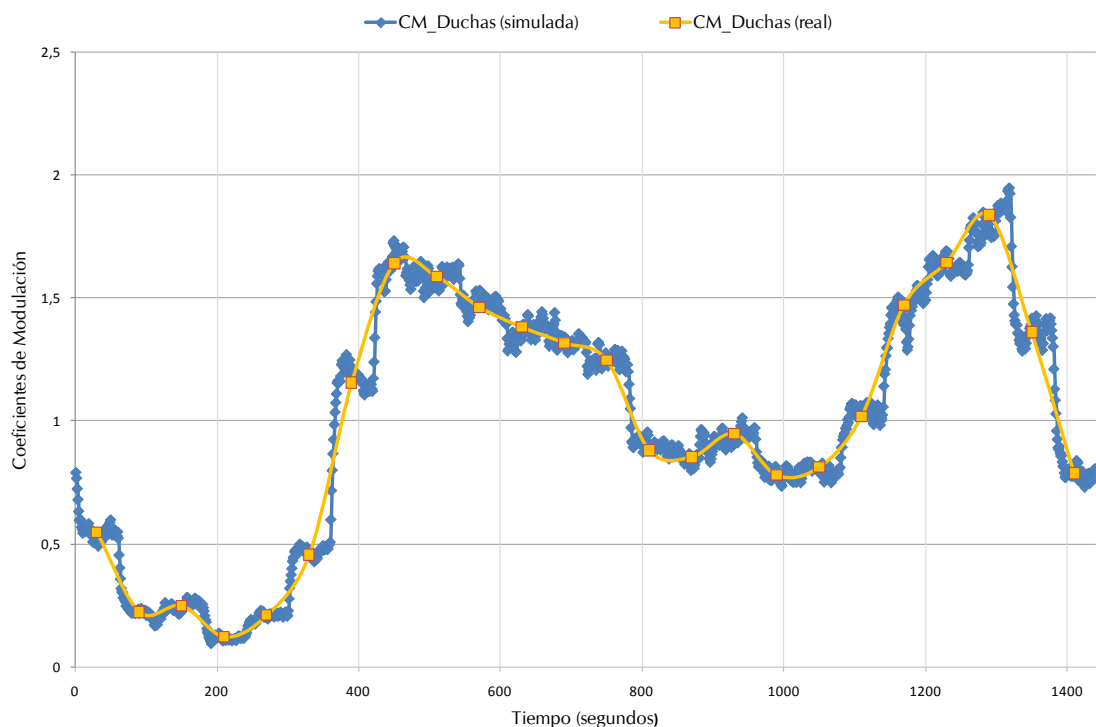


FIGURA 4-4: CURVA DE MODULACIÓN DE LAS DUCHAS (REAL Y SIMULADA)



4.2.4 ANÁLISIS DEL PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS CISTERNAS

En la figura 4-5 se puede apreciar como la distribución de las descargas de las cisternas sigue de manera muy ajustada la curva de modulación de consumo para este uso, al igual de observarse que entre los 500 minutos equivalente en horas a las 8:00 y las 24:00 horas, se presenta una continuidad sin evidenciarse la existencia de un claro pico tanto en el consumo como en las descargas de las cisternas. Por el contrario, es claro que entre las 24:00 y las 6:00, se presentarán los caudales más bajos debido a este uso. Una vez más se comprueba como la distribución del volumen utilizado por las cisternas en la serie simulada, se corresponde a las mediciones con una excelente fidelidad.

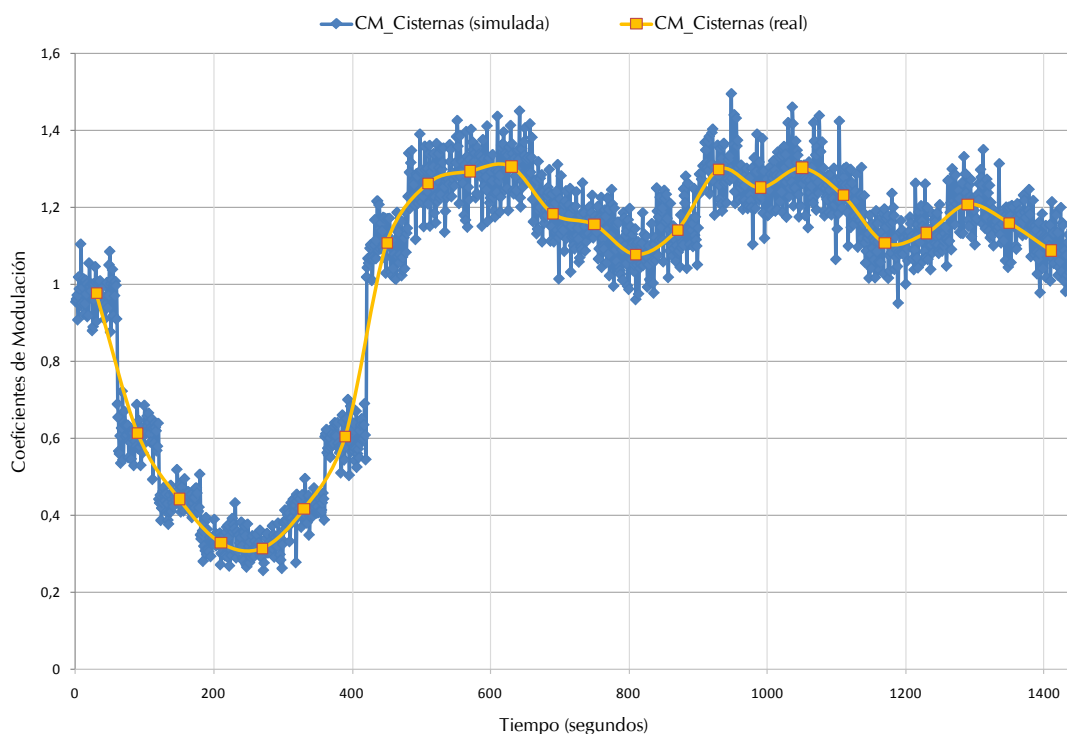


FIGURA 4-5: CURVA DE MODULACIÓN DE CISTERNAS (REAL Y SIMULADA)

4.2.5 PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LAS LAVADORAS

En la figura 4-6 se puede apreciar una clara correlación entre los coeficientes de modulación de la serie observada y la serie modelada, indicando que el comportamiento simulado de las descargas de las lavadoras corresponde al comportamiento definido por el consumo de este tipo de aparatos en las mediciones realizadas. Respecto al desplazamiento que pareciera tener la serie simulada respecto a la serie observada (real), se debe a que las descargas se puntúan en el tiempo una vez se ha definido el primer evento, es decir, se define el instante en el que se produce la primera descarga y a partir de ella se distribuyen las siguientes, haciendo que se produzca un retraso de las descargas respecto al primer consumo. En cuanto al comportamiento general de ambas series, se observa un claro pico de entre las 10:00 y las 15:00, que paulatinamente va disminuyendo al pasar el tiempo. De esta manera se tiene una idea de las horas en las que este aparato contribuye en mayor grado a la ocurrencia del caudal punta.

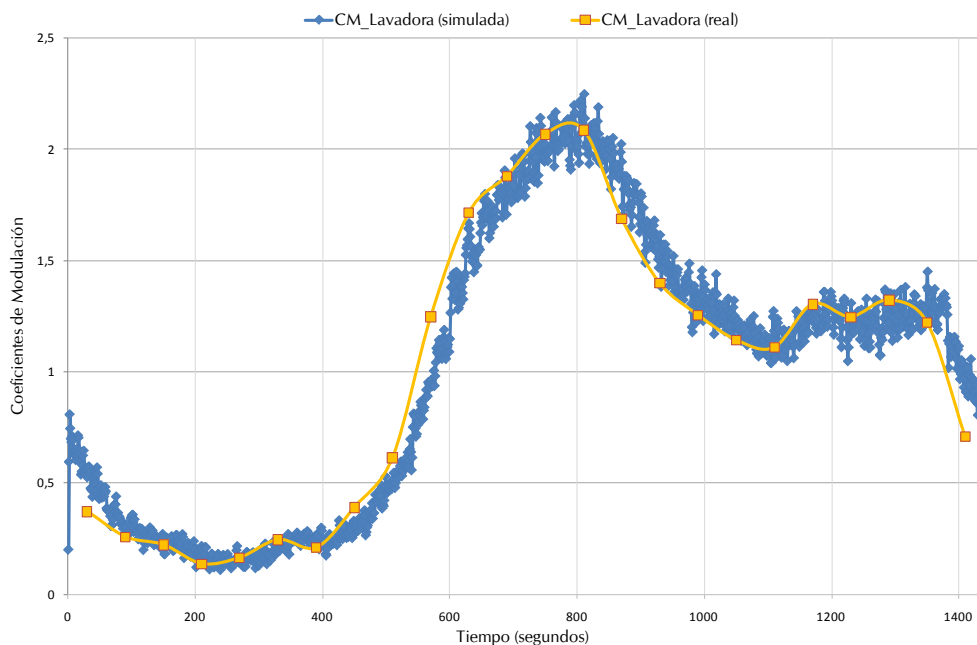


FIGURA 4-6: CURVA DE MODULACIÓN DE LAVADORAS (REAL Y SIMULADA)



4.2.6 PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE LOS LAVAVAJILLAS

El comportamiento del consumo y de las descargas de los lavavajillas se representa en la figura 4-7, en la que además de mostrar el buen ajuste entre ambas series, se puede apreciar aún más el retraso que presentan las descargas respecto al consumo, debido a la manera como se han punteado dichas descargas en el tiempo. En cuanto al comportamiento general, se aprecia claramente que la ocurrencia del caudal punta estará entre los 800 y los 1000 minutos, equivalentes a las 14:00 y a las 16:00 horas; justo durante y después de la hora típica de comer.

De esta manera queda demostrado que los procesos modelados, aunque provengan de sucesos aleatorios transformados a funciones de probabilidad, representan convenientemente el comportamiento real del sistema aportando fiabilidad a los resultados obtenidos.

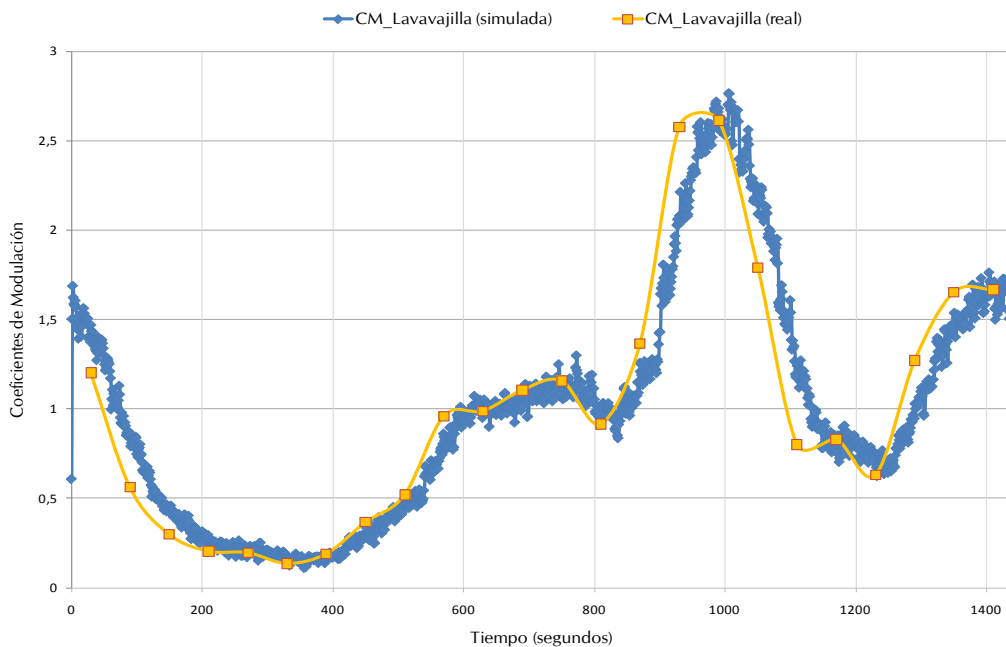


FIGURA 4-7: CURVA DE MODULACIÓN DE LAVAVAJILLAS (REAL Y SIMULADA)



4.3 CAUDAL PUNTA DE AGUAS RESIDUALES EN EDIFICIOS DE VIVIENDA, PARA UN PERIODO DE RETORNO DE UN AÑO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, dentro de los cuales se establece la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los caudales punta, obtenidos en los diferentes grupos de viviendas, así como el comportamiento que se espera que tengan para un periodo de retorno igual a 365 días. De manera adicional se analizan los casos en las que el caudal puede ser nulo, cuando no se utiliza ningún tipo de aparato sanitario, ó puede adoptar un valor positivo dentro de un cierto rango, dependiendo del número de viviendas que estén conectadas al sistema de saneamiento.

4.3.1 CAUDALES MÁXIMOS LAMINADOS EN INTERVALOS DE 10 SEGUNDOS

Laminar caudales significa encontrar el valor medio de los caudales obtenidos en un intervalo de tiempo dado. En este caso, corresponde al ponderado de caudales cada 10 segundos, para el cual, dichos caudales están en función del número de viviendas que estén conectadas al sistema. Por otro lado, cada una de las series de caudal corresponde a una función de distribución de probabilidad, en la que cada uno de los valores que integran la serie, corresponde a un caudal con una determinada probabilidad de ocurrencia.

Dado que para una sola simulación difícilmente se puede estudiar este proceso, por ahora solo se presenta el comportamiento de los caudales punta, y se analiza si efectivamente estos caudales son congruentes con los caudales punta obtenidos en las mediciones. Respecto a los valores, la tabla 4-3 presenta para cada número de viviendas el caudal más alto que se puede presentar con un periodo de retorno de un año. Para ello cada número de viviendas se ha simulado durante este tiempo.



TABLA 4-3: CAUDALES PUNTA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS Y LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN CAUDAL INFERIOR EN UN INTERVALO DE TIEMPO DE 10 SEGUNDOS

Probabilidad	Número de viviendas					
	20	50	100	200	500	1000
P = 1 Qp (l/s)	2,468	3,345	4,197	5,979	8,589	12,61
P = 0,8 Qp (l/s)	0,144	0,327	0,643	1,260	2,997	5,82
P = 0,6 Qp (l/s)	0,058	0,195	0,424	0,910	2,398	4,92
P = 0,4 Qp (l/s)	0,010	0,107	0,272	0,645	1,858	4,01
P = 0,2 Qp (l/s)	0,000	0,028	0,127	0,333	1,032	2,112
P = 0,1 Qp (l/s)	0,000	0,001	0,048	0,166	0,522	1,170
P = 0,0001 Qp (l/s)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,139

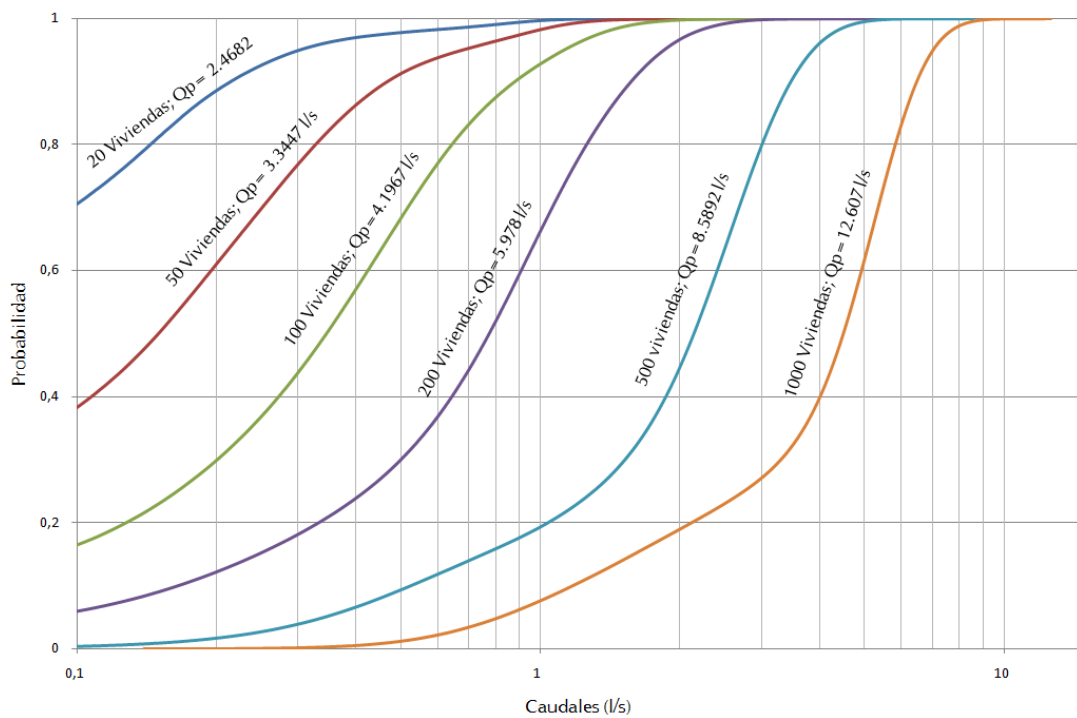


FIGURA 4-8: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS CAUDALES PUNTA, LAMINADOS 10 SEGUNDOS

La figura 4-8 presenta una aproximación al comportamiento asintótico que siguen los caudales punta, calculados para un número determinado de viviendas que pueden estar conectadas a la red de saneamiento en los edificios de viviendas. Es importante considerar que para una simulación difícilmente se puede obtener la función de distribución de probabilidad que siguen los caudales punta. Considerando estas limitaciones, un ejemplo de la lectura que se puede realizar de la anterior gráfica sería que bajo estas condiciones y para un periodo de retorno de un año y 20 viviendas conectadas al sistemas, existe una probabilidad que tiende a ser del 100%, de que los caudales punta no superen los 2,47 l/s; así como para 1000 viviendas, la probabilidad de que los caudales punta no superen los 4,01 l/s es del 40%. Siendo este análisis igual para todos los máximos caudales y las respectivas probabilidades presentadas en la tabla 4.3 y representadas en la figura 4-8.

4.3.2 CAUDALES MÁXIMOS LAMINADOS CADA 30 SEGUNDOS

El efecto de ponderar los caudales máximos en intervalos de tiempo, permite identificar la manera como se ven afectados los caudales al incrementar dicho intervalo. Para ello, se procede a analizar lo que le ocurre a los caudales al aumentar el intervalo de tiempo. Es decir, en lugar de ponderarlos exclusivamente en intervalos de diez segundos, se repite el procedimiento para treinta segundos en un igual número de viviendas (mil viviendas), para un mismo periodo de retorno igual a 365 días. Aplicando este concepto, se obtiene un caudal máximo de 10,228 l/s, en lugar de los 12,61 l/s encontrados anteriormente para los intervalos de diez segundos. Esta discrepancia se da debido a que al aumentar el intervalo de integración ó instante de tiempo, los caudales se laminan gradualmente. Los caudales para las diferentes combinaciones de viviendas y sus respectivas probabilidades, se presentan en la tabla 4-4, representada gráficamente en la figura 4-9.



TABLA 4-4: CAUDALES PUNTA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS Y LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN CAUDAL INFERIOR EN UN INTERVALO DE TIEMPO DE 30 SEGUNDOS

Probabilidad	Número de viviendas					
	20	50	100	200	500	1000
P = 1 Qp (l/s)	1,278	1,793	2,555	3,448	6,480	10,228
P = 0,8 Qp (l/s)	0,155	0,346	0,651	1,221	2,918	5,680
P = 0,6 Qp (l/s)	0,065	0,216	0,461	0,943	2,443	4,949
P = 0,4 Qp (l/s)	0,019	0,121	0,310	0,694	1,956	4,132
P = 0,2 Qp (l/s)	0,001	0,039	0,151	0,380	1,039	2,056
P = 0,1 Qp (l/s)	0,000	0,008	0,062	0,195	0,590	1,224

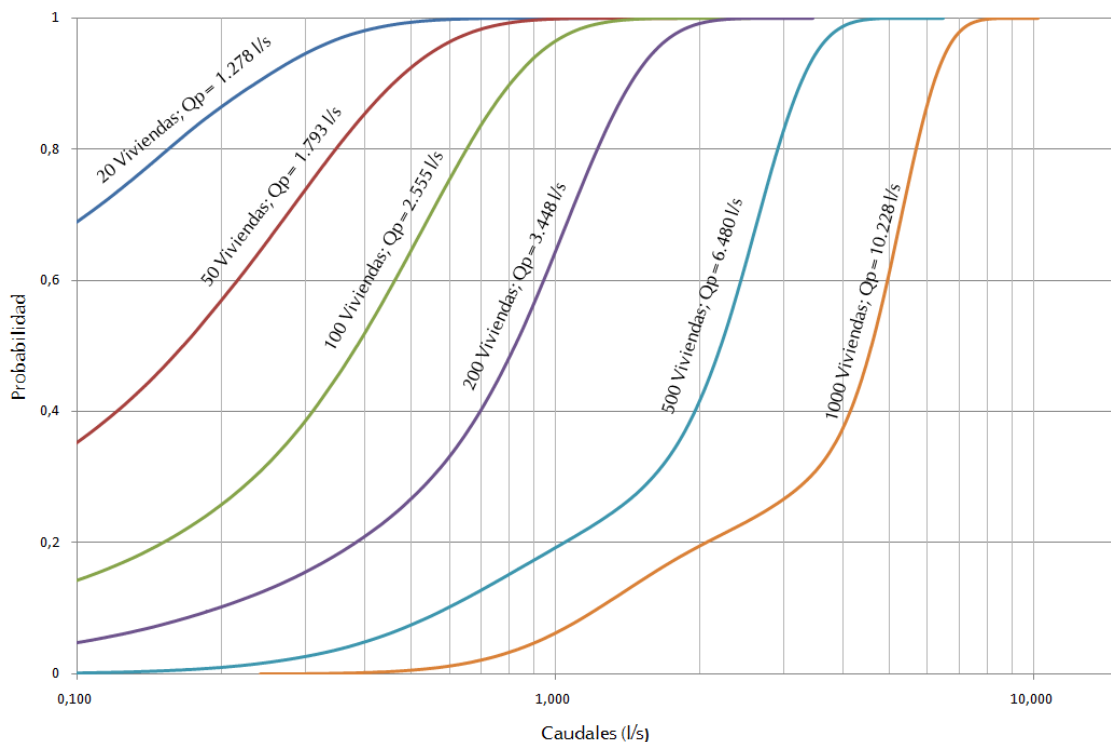


FIGURA 4-9: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS CAUDALES PUNTA, LAMINADOS 30 SEGUNDOS

La interpretación de la figura 4-9 es igual a la presentada en la figura 4-8, es decir, indica que para un determinado número de viviendas existe una cierta probabilidad de no superar, en un año, el caudal máximo presentado en un

intervalo de tiempo igual a los 30 segundos. Analíticamente esto quiere decir que para 1000 viviendas, se puede estimar una probabilidad que tiende a ser del 100%, de no superar un caudal igual a los 10,23 l/s en un periodo de un año.

4.3.3 CAUDALES MÁXIMOS LAMINADOS CADA 60 SEGUNDOS

De manera análoga a lo anterior, se desea establecer los caudales máximos producidos en un intervalo de integración igual a 60 segundos. De nuevo, se observa como los caudales se laminan aún más, pues ahora para 1000 viviendas, en lugar de obtener un caudal máximo de 10,23 l/s calculado en un intervalo de 30 segundos, se obtiene un caudal de 9,39 l/s. Por otro lado, se observa cómo se presenta una curvatura en las funciones de probabilidad cuyo número de viviendas es superior a 500, la cual se debe a que los caudales punta no son valores puntuales, sino funciones de distribución de probabilidad con variación de parámetros (esta variación de parámetros se analiza más adelante cuando se presenten los resultados de varias simulaciones).

TABLA 4-5: CAUDALES PUNTA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS Y LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN CAUDAL INFERIOR EN UN INTERVALO DE TIEMPO DE 60 SEGUNDOS

Probabilidad	Número de viviendas					
	20	50	100	200	500	1000
P= 1 Qp (l/s)	1,221	1,453	2,184	2,959	5,640	9,388
P= 0,8 Qp (l/s)	0,158	0,340	0,641	1,215	2,902	5,694
P= 0,6 Qp (l/s)	0,079	0,226	0,472	0,965	2,475	5,019
P= 0,4 Qp (l/s)	0,029	0,141	0,331	0,732	2,021	4,248
P= 0,2 Qp (l/s)	0,004	0,053	0,175	0,400	1,036	2,048
P= 0,1 Qp (l/s)	0,000	0,017	0,081	0,220	0,610	1,247
P= 0,002 Qp (l/s)	0,000	0,000	0,000	0,013	0,140	0,464

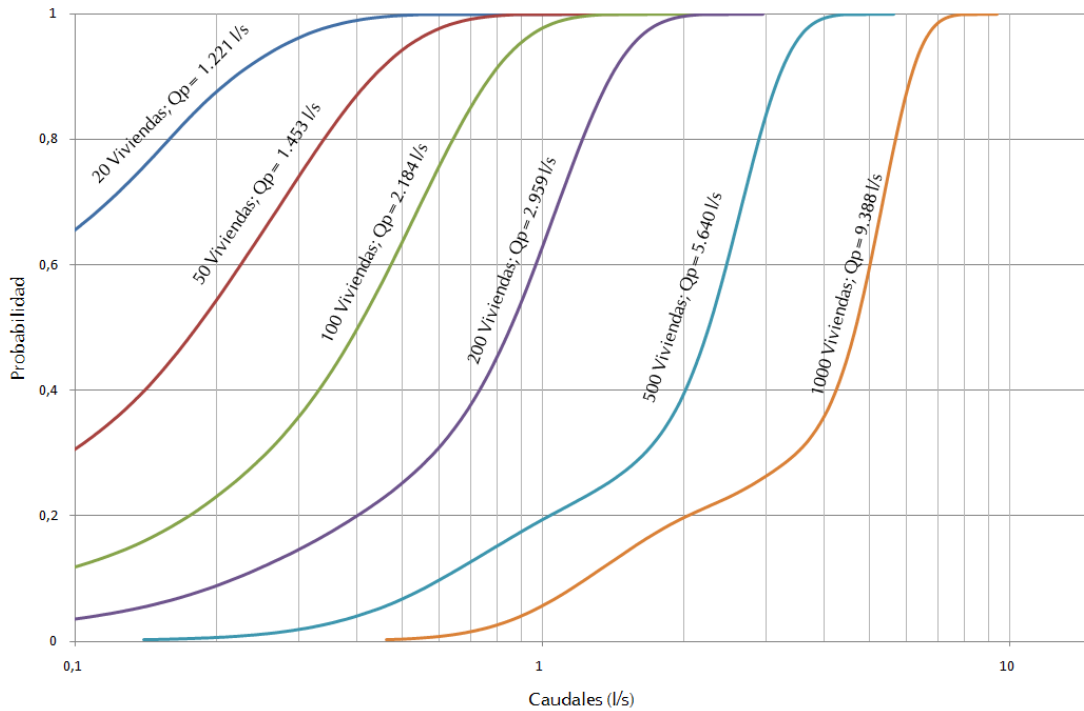


FIGURA 4-10: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS CAUDALES PUNTA, LAMINADOS 60 SEGUNDOS

4.3.4 CAUDALES MÁXIMOS LAMINADOS CADA HORA

El último análisis realizado para identificar el efecto que se produce al ponderar los caudales, se da al agruparlos en intervalos de 3600 segundos. Para esto, es de esperar que se continúe presentando la tendencia que se ha marcado hasta el momento, es decir, que los caudales punta se continúen laminando, y se obtengan valores menores a los presentados en los anteriores casos. La tabla 4-6 presenta los resultados de los caudales punta obtenidos, con la respectiva probabilidad de no ser superados en un periodo de retorno de un año, y en un intervalo de integración igual a 3600 segundos.



TABLA 4-6: CAUDALES PUNTA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS Y LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA LAMINADO 3600 SEGUNDOS

Probabilidad	Número de viviendas					
	20	50	100	200	500	1000
P= 1 Qp (l/s)	0,297	0,558	0,928	1,561	3,549	6,524
P= 0,8 Qp (l/s)	0,116	0,280	0,555	1,105	2,757	5,510
P= 0,6 Qp (l/s)	0,094	0,243	0,494	0,994	2,507	5,033
P= 0,4 Qp (l/s)	0,078	0,209	0,433	0,879	2,231	4,491
P= 0,2 Qp (l/s)	0,040	0,094	0,187	0,365	0,894	1,775
P= 0,04 Qp (l/s)	0,014	0,040	0,088	0,183	0,472	0,954

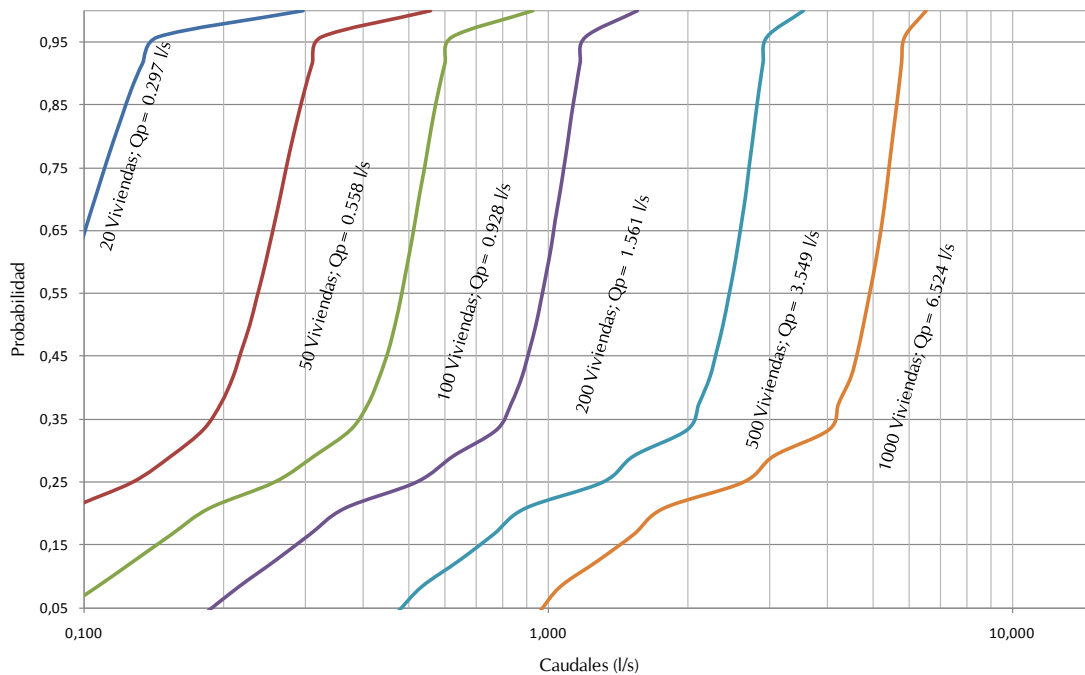


FIGURA 4-11: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS CAUDALES PUNTA, LAMINADOS 3600 SEGUNDOS

Presentada una aproximación del comportamiento de los caudales punta para cada intervalo integración, número de viviendas y un periodo de retorno igual a 365 días, es posible verificar si estos caudales corresponden con los caudales punta obtenidos de los datos de consumo. Para ello, se hace referencia a la figura 4-1, en la que se aprecia que el coeficiente de modulación horario máximo es igual a 1,43. Con este coeficiente y el caudal medio obtenido de los datos de consumo, equivalente a 368 l/vivienda/día, se obtiene un caudal punta de 526,2 l/vivienda/día.

Por otra parte, el caudal máximo horario encontrado para 1000 viviendas y en un periodo de retorno de 1 año es de 563,6 l/vivienda/día (se obtiene multiplicando los 6,52 l/s (tabla 4-6), por los 3600 segundos que tiene una hora, dividiendo entre las 1000 viviendas simuladas y multiplicando por las 24 horas del día). Como se puede apreciar, el caudal punta horario de aguas residuales obtenido mediante la modelación estocástica del consumo difiere muy poco (menos del 7%) del caudal punta obtenido de las mediciones realizadas en el proyecto *“Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid (2008)”*, lo cual corrobora los resultados obtenidos.

Un último análisis que conviene realizar para una simulación, corresponde al porcentaje de tiempo en el que el sistema permanece inactivo, en función del número de viviendas. Es decir, calcular para cada intervalo de tiempo y un determinado número de viviendas, el porcentaje durante el cual el sistema no le aporta caudal a la red de saneamiento en un periodo de retorno igual a 365 días.



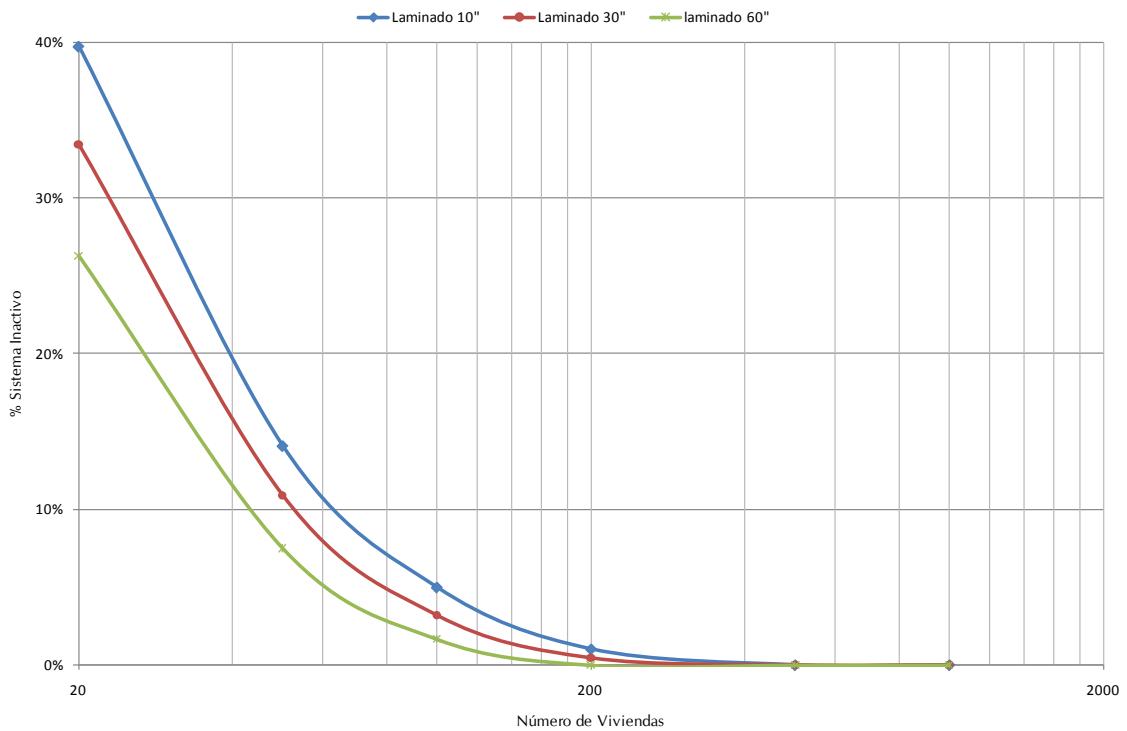


FIGURA 4-12: PORCENTAJE DE INACTIVIDAD DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS CONSIDERANDO TODOS LOS INTERVALOS DE TIEMPO.

La figura 4-12 muestra dicha relación e indica que al aumentar el intervalo de tiempo y el número de viviendas, disminuye la probabilidad de que estas no aporten algún caudal a la red de saneamiento. Como ejemplo se toman 20 viviendas, en la cual para un intervalo de tiempo de 10 segundos, la probabilidad que no se presente un caudal en dicho intervalo es aproximadamente del 40%, mientras que para las mismas 20 viviendas, la probabilidad de que en 30 segundos no se presente caudal es de aproximadamente el 33%.



4.4 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LOS CAUDALES PUNTA PARA UN PERIODO DE RETORNO DE HASTA 100 AÑOS

El caudal punta en un tiempo estimado de un año, en un conjunto de viviendas, es una variable aleatoria (cada simulación proporcionará un valor del caudal punta ligeramente diferente). Esta situación obliga a encontrar una función de distribución de probabilidad que permita describir del mejor modo posible, el comportamiento del caudal pico generado.

Siguiendo esto, tras realizar 200 simulaciones, agrupando los caudales cada 10 segundos, donde cada simulación corresponde a 365 días, para combinaciones de 20, 50, 100, 300 y 500 viviendas, e imponiendo en cada simulación una semilla al azar para generar diferentes series sintéticas, se encuentra que la función de distribución de probabilidad *Lognormal* es la que mejor ajusta los caudales punta de aguas residuales en edificios de viviendas. La figura 4-13 indica que los caudales punta (máximos anuales) de aguas residuales más recurrentes, para un intervalo de tiempo de 10 segundos, se encuentran entre 2,5 y 2,7 l/s, para un total de 20 viviendas.

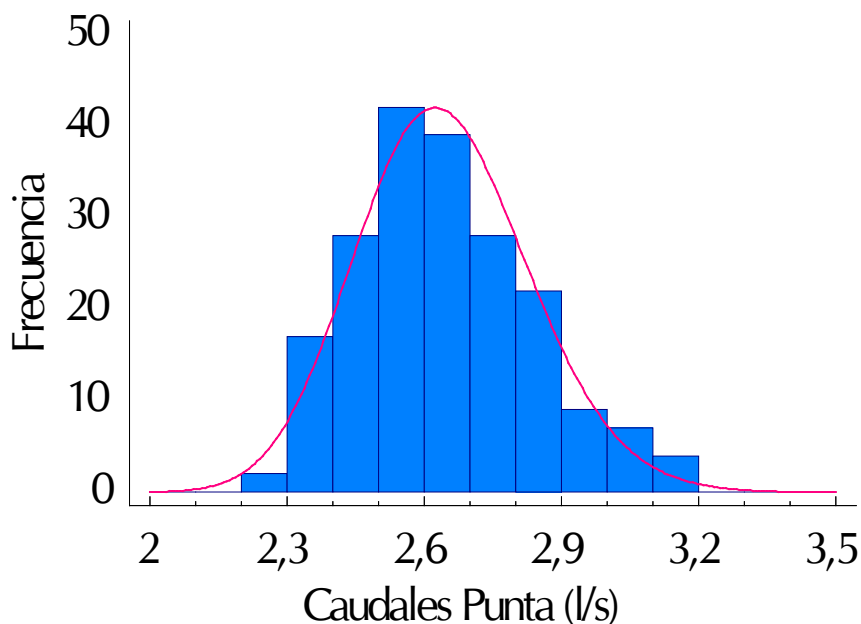


FIGURA 4-13: HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES PUNTA DE AGUAS RESIDUALES PARA 20 VIVIENDAS

La figura 4-14 muestra el buen ajuste de los caudales punta a la función de distribución *Lognormal*, salvo para los caudales más bajos, en los que tiende a subestimarlos. Esta situación, aunque se presente también para los máximos caudales, no afecta al caudal punta obtenido para 20 viviendas y un periodo de retorno de 100 años (3,2 l/s), que coincide justamente con la función de distribución de probabilidad descrita. De esta manera se comprueba que los caudales punta de aguas residuales en edificios de vivienda se pueden obtener a partir de los parámetros de media y desviación estándar de la función de distribución *Lognormal*.

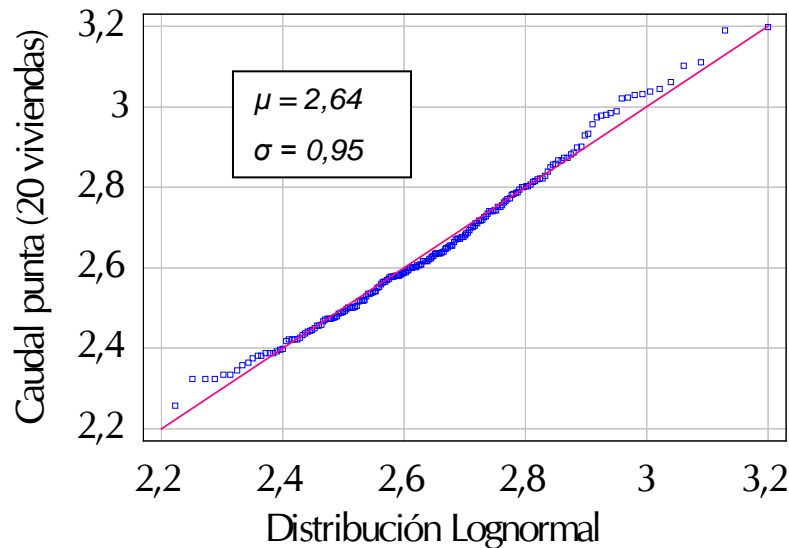


FIGURA 4-14: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES PUNTA DE AGUAS RESIDUALES PARA 20 VIVIENDAS

En cuanto a los parámetros de ajuste de la función de distribución *Lognormal*, son respectivamente la media y la desviación estándar (ecuación 16 y 17).

$$E(X)_{\log} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad \text{Ecuación. 16}$$

$$d.s_{\log} = \sqrt{\left(e^{\sigma^2} - 1\right)} e^{2\mu + \sigma^2} \quad \text{Ecuación. 17}$$

Siendo:

$E(X)_{\log}$: Media de los datos

$d.s_{\log}$: Desviación estándar



μ : media del logaritmo de los datos.

σ : desviación estándar del logaritmo de los datos.

La tabla 4,7 muestra, para diferente número de viviendas, los parámetros de ajuste de los caudales punta a la función de distribución Lognormal obtenidos en 200 simulaciones. También se muestran los caudales punta que no serán superados con una probabilidad tanto para el 95% (equivalente a un periodo de retorno de 20 años) como para el 99% (equivalente a un periodo de retorno de 100 años).

TABLA 4-7: PARÁMETROS DE AJUSTE A LA FUNCIÓN LOGNORMAL DE LOS CAUDALES PUNTA DE AGUAS RESIDUALES A UNA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN Y PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA A 95% Y 99% DE CONFIABILIDAD.

Parámetros de la función Lognormal	Número de viviendas				
	500	300	100	50	20
σ	0,0508	0,05077	0,0606	0,0746	0,0748
μ	2,16	1,89	1,43	1,22	0,97
$d.S_{log}$	0,44	0,33	0,25	0,25	0,20
$E(X)_{log}$	8,66	6,63	4,19	3,39	2,65
Q [l/s]; 95%	9,38	7,19	4,62	3,81	2,98
Q [l/s]; 99%	9,69	7,42	4,79	3,98	3,11

Por otro lado, la ecuación 18 tomada de la figura 4-15 define, en función del número de viviendas conectadas, los caudales punta anuales que con una probabilidad del 99%, equivalente a un periodo de retorno de 100 años, no serán superados, según la función de distribución de probabilidad *Lognormal*.

$$Q_{Punta} = [-9 \cdot 10^{-6} \cdot (N_v)^2] + [0,018 \cdot (N_v)] + 2,9565 \quad \text{Ecuación.18}$$

Siendo:

Q_{Punta} : Caudal punta de saneamiento (l/s)

N_v : Número de viviendas

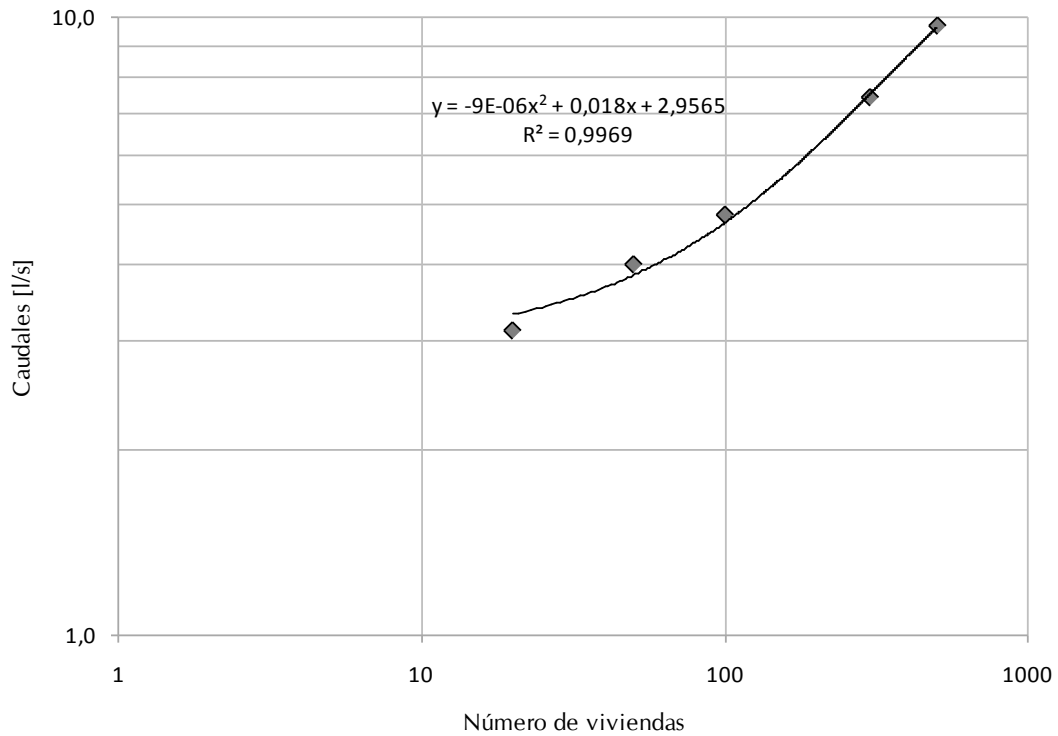


FIGURA 4-15: CAUDALES PUNTA CON UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS, EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS

Una vez presentada la expresión que ajusta los caudales punta con un periodo de retorno de 100 años, conviene analizar el comportamiento de la desviación típica en función del número de viviendas. En este caso se comprueba que aumenta con el número de viviendas. Sin embargo, en términos relativos respecto al caudal máximo medio (tabla 4-7), la dispersión tiende a disminuir conforme incrementa el número de viviendas (figura 4-16). Este ratio de dispersión relativa es lo que se conoce como coeficiente de variación (C_v) y está definido como la razón entre la desviación estándar y la media de los datos. Ecuación 19.

$$C.v = 0.1192 \cdot (N_v)^{-0.141} \quad \text{Ecuación.19}$$

Siendo:

C_v : Coeficiente de variación (%)

N_v : Número de viviendas

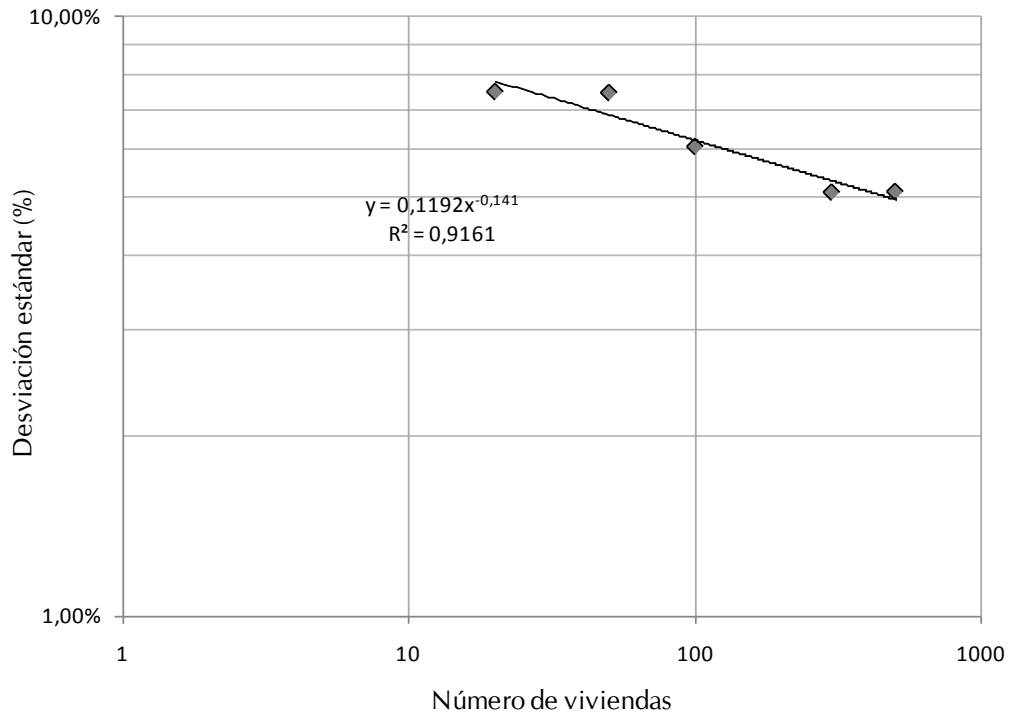


FIGURA 4-16: COMPORTAMIENTO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS CAUDALES PUNTA

4.5 COEFICIENTES DE ESCALA TEMPORAL DE LOS CAUDALES PUNTA

Una vez se ha encontrado el ajuste de los caudales punta a una función de distribución de probabilidad, y para un intervalo de tiempo de diez segundos, se presenta a continuación un análisis que permite obtener los coeficientes para transformar el intervalo de integración de estos caudales punta. Es decir, si la expresión presentada en la figura 4-15 corresponde a caudales con un intervalo de integración de diez segundos, es posible estimar los caudales con escalas temporales superiores, sin necesidad de recurrir de nuevo a las simulaciones. Es importante mencionar que dadas las limitaciones y los plazos estipulados para la presentación del presente trabajo de investigación, y teniendo en cuenta el ámbito de aplicación más habitual, los coeficientes que se presentan a

continuación son válidos para redes sanitarias que consideren hasta 1000 viviendas conectadas al sistema.

Para encontrar los coeficientes de ajuste temporal de los caudales punta, se parte de la base de que estos se ajustan a una ecuación de tipo exponencial tal y como se presenta en la figura 4-12. La finalidad es ajustar dicha ecuación, a una expresión que permita encontrar los caudales punta en función del intervalo de integración y el número de viviendas. Para ello, se procede a graficar la variación que se presenta entre los caudales máximos encontrados en intervalos de diez segundos, respecto a los caudales máximos encontrados en treinta segundos, un minuto y una hora, para una simulación y un periodo de retorno de un año. Estos caudales fueron presentados anteriormente con sus respectivas funciones de probabilidad, sin embargo, en la tabla 4-8 se presenta de nuevo un resumen de los mismos.

TABLA 4-8: CAUDALES PUNTA PARA UNA SIMULACION Y UN PERIODO DE RETORNO DE UN AÑO

Viviendas	Caudal Punta (l/s)			
	laminado 10 s	laminado 30 s	laminado 60 s	Laminado 3600 s
5000	41,706	39,58	38,36	30,01
1000	12,607	10,23	9,39	6,52
500	8,589	6,48	5,64	3,55
200	5,979	3,45	2,96	1,56
100	4,197	2,55	2,18	0,93
50	3,345	1,79	1,45	0,56
20	2,468	1,28	1,22	0,3

Para ejemplificar la manera en la que se definen estos caudales, se toma como ejemplo el caudal máximo encontrado para 10 y 30 segundos y cinco mil (5000) viviendas, encontrando que la variación entre ellos es igual a 0,95, siendo este valor el cociente entre 39,58 l/s y 41,706 l/s. De la misma manera se encuentra la variación para los caudales de 60 segundos y 3600 segundos para cinco mil (5000) viviendas y se procede a graficar esta variación en función del intervalo de tiempo Figura 4-17.



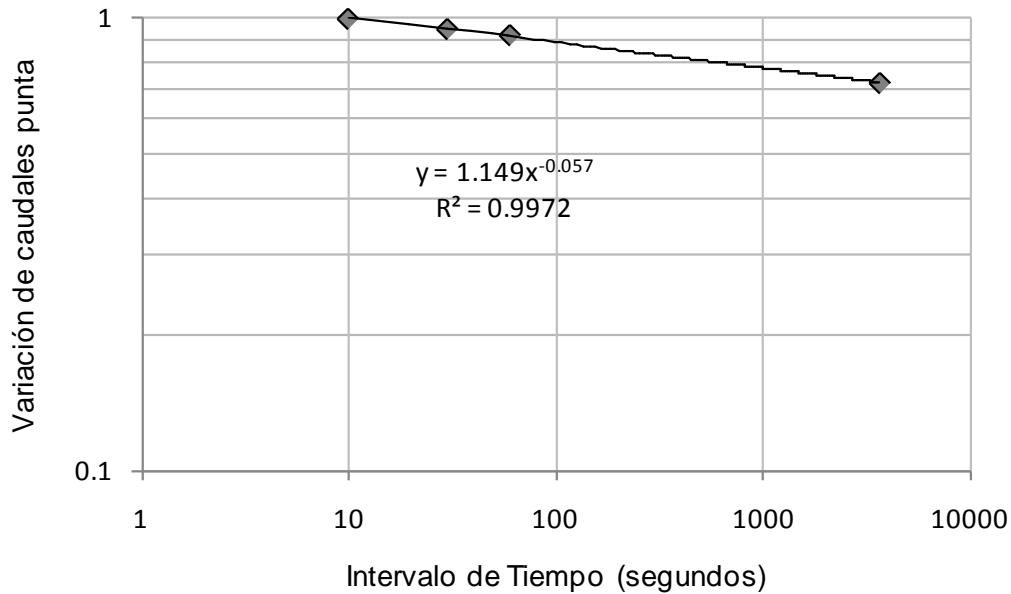


FIGURA 4-17: VARIACIÓN DE LOS CAUDALES PUNTA, EN FUNCIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO

De la misma manera que se procedió para 5000 viviendas, se realiza para 1000, 500, 200, 100, 50 y 20 viviendas, y se encuentran los parámetros de ajuste. Dichos parámetros corresponden a los valores de A y B, al ser una expresión exponencial de la forma $Y = AX^B$. Seguidamente, se grafican los diferentes valores de A y B, encontrando el mejor ajuste para cada uno de ellos. Los respectivos ajustes se presentan en la figura 4-18, resaltándose, además, la buena correlación que presentan cada una de las funciones.

Estos ajustes se integran con la ecuación potencial presentada en el ajuste de la figura 4-17 y se obtiene una expresión que permite obtener los coeficientes temporales de los caudales punta en diferentes intervalos de integración, el cual laminaran los caudales punta para diferente número de viviendas (ecuación 20). Es importante mencionar que esta ecuación tiene una validez de hasta 1000 viviendas conectadas simultáneamente a la red de saneamiento e intervalos de integración superiores que 20 segundos.

$$C_{Q_{P(t)}} = 3.7724 \cdot (N_{Viviendas})^{-0.149} (T)^{0.0669 \cdot \ln(N_{Viviendas}) - 0.5948}$$

Ecuación. 20

Siendo $C_{Q_{P(t)}}$ el coeficiente temporal del caudal punta y T , el intervalo de integración en el que se requiere calcular dicho caudal punta. El rango de error al utilizar esta expresión, estará aproximadamente entre el 5 y el 10% con respecto a los valores calculados directamente de las simulaciones.

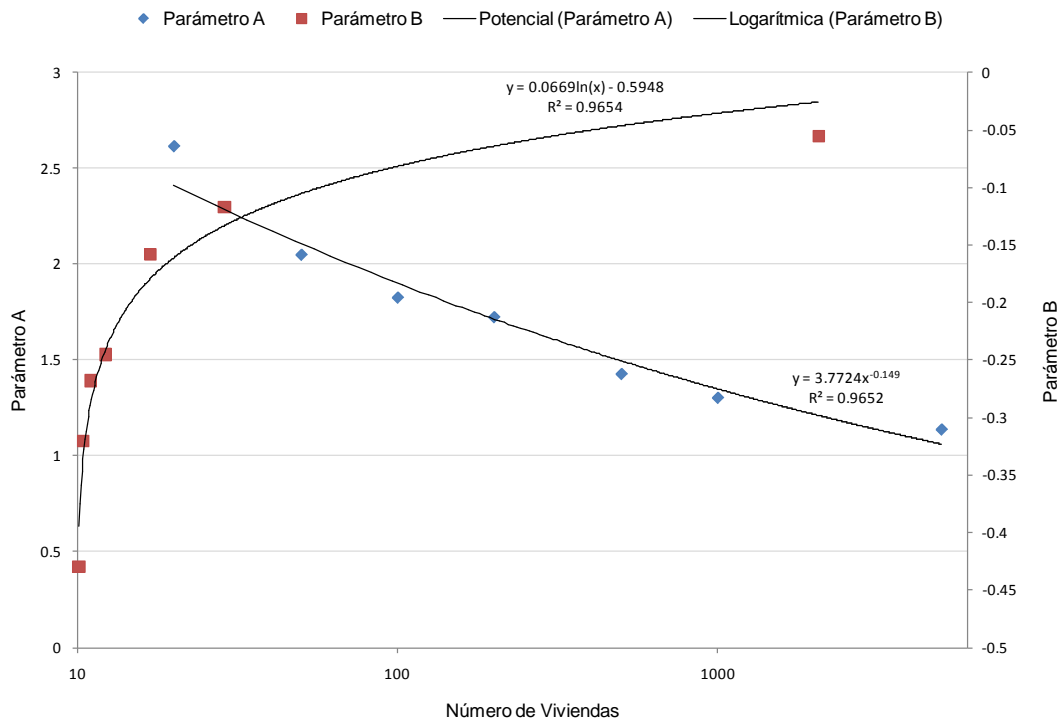


FIGURA 4-18: AJUSTE DE LOS PARÁMETROS A Y B PARA ENCONTRAR LOS COEFICIENTES DE ESCALA TEMPORAL DE CAUDALES PUNTA

TABLA 4-9: COEFICIENTES DE ESCALA TEMPORAL DE LOS CAUDALES PUNTA

Factor de tiempo	Número de Viviendas						
	20	50	100	200	500	1000	5000
10	0,974	0,978	0,982	0,985	0,990	0,993	1,001
30	0,631	0,678	0,716	0,756	0,813	0,858	0,974
40	0,564	0,616	0,660	0,706	0,772	0,826	0,967
50	0,516	0,572	0,619	0,669	0,742	0,802	0,962
60	0,480	0,539	0,587	0,640	0,718	0,783	0,957
80	0,429	0,489	0,541	0,598	0,682	0,754	0,950
100	0,393	0,454	0,507	0,566	0,655	0,732	0,945
200	0,299	0,361	0,416	0,479	0,579	0,667	0,929
300	0,255	0,315	0,370	0,435	0,538	0,632	0,919
400	0,227	0,286	0,341	0,406	0,511	0,609	0,913
600	0,194	0,250	0,303	0,368	0,475	0,577	0,904
800	0,173	0,227	0,279	0,344	0,452	0,555	0,897
1000	0,158	0,211	0,262	0,326	0,434	0,539	0,892
1200	0,147	0,199	0,249	0,312	0,420	0,526	0,888
2000	0,120	0,167	0,215	0,276	0,383	0,492	0,877
2500	0,110	0,155	0,202	0,261	0,368	0,477	0,872
3000	0,103	0,146	0,191	0,250	0,356	0,466	0,868
3600	0,096	0,138	0,182	0,239	0,345	0,455	0,864



5 COMPARATIVA CON OTROS CRITERIOS DE DIMENSIONADO

5.1 INTRODUCCIÓN

Los resultados del modelo demuestran que las series de descargas sintéticas se corresponden con el comportamiento medio de las observaciones. Sin embargo, resulta interesante contrastar la metodología propuesta en este trabajo de investigación con otros métodos de dimensionados, con el fin de obtener unas primeras conclusiones sobre la manera como están diseñados actualmente las redes sanitarias en edificios de viviendas, y la necesidad de continuar afinando estos modelos para acercarse cada vez más a la realidad sobre la manera en la que se descarga el consumo de agua.

5.2 CONTRASTE DE LOS RESULTADOS CON LA NORMATIVA ESPAÑOLA PARA LA EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La normativa vigente actualmente para el diseño de los sistemas de evacuación de aguas residuales en España, está articulada alrededor del CTE_Código Técnico de Edificación. Documento Básico HS Salubridad. Apartados HS 5 Evacuación de aguas (de aquí en adelante, CTE). Este documento es de obligado cumplimiento en saneamiento de edificios. Dicha norma utiliza el método de adjudicación de un número de unidades de descarga (UD) a cada aparato sanitario de una vivienda, en función de que el uso sea público o privado y la tipología que presente la misma. Dicho método fue introducido, en su versión más básica, por *Hunter* (1940). Sin embargo, en el CTE no se especifica la manera en la que el método considera la simultaneidad en el uso de aparatos, ni



propone una formulación para encontrar los caudales punta, sino que relaciona directamente el número de unidades de descarga con los diámetros mínimos a instalar tanto para las bajantes como para los colectores.

Por consiguiente, algunos autores han buscado la manera de suplir dicha carencia, tal es el caso de *Romero y Arrué (2008)*, quienes proponen un coeficiente de simultaneidad en función de las unidades de descarga, cuya curva se muestra en la figura 5-1. Estos autores definen dicho coeficiente, en base a las tablas de dimensionado presentadas en el CTE y a través de la ecuación empírica para el cálculo del diámetro de bajantes y colectores propuesta por Dawson-Kalinske.

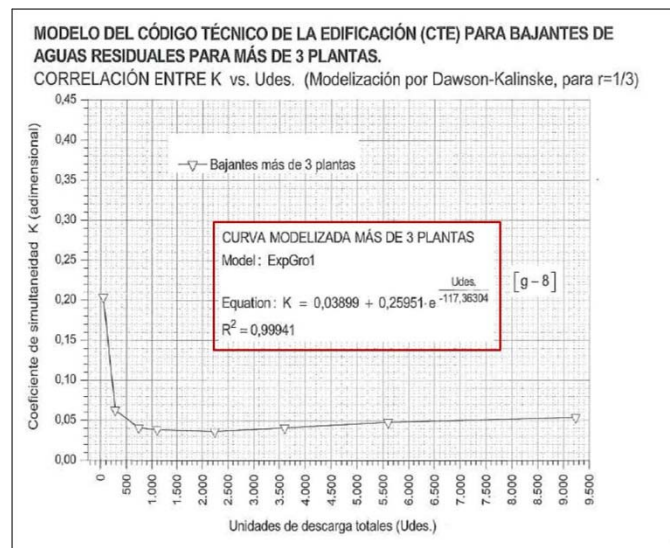


FIGURA 5-1: CURVA DE SIMULTANEIDAD MODELIZADA A PARTIR DE LAS TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL CTE (ROMERO Y ARRÚE (2008))

La ecuación que representa el coeficiente de simultaneidad obtenido para bajantes de aguas residuales de más de 3 plantas, viene dada por la ecuación 21.

$$K = 0,03899 + 0,25951 \cdot e^{-\frac{UD}{117,36304}} \quad \text{Ecuación 21.}$$

Donde UD corresponde al número de unidades de descarga presentes en función del número de aparatos y tipología de las viviendas. Dichas unidades de descarga están estipuladas en el Código Técnico de la edificación (CTE) según la tabla 5-1.

TABLA 5-1: UD CORRESPONDIENTES A LOS DISTINTOS APARATOS SANITARIOS (CTE)

Tipo de aparato sanitario	Unidades de desagüe (UD)	
	Uso Privado	Uso público
Lavabo	1	2
Bidé	2	3
Ducha	2	3
Bañera(con o sin ducha)	3	4
Inodoro	Con cisterna	4
	Con fluxómetro	8
	Pedestal	-
Urinario	Suspendido	-
	En batería	-
Fregadero	De cocina	3
	De laboratorio ,restaurante, etc.	-
Lavadero	3	-
Vertedero	-	8
Fuente para beber		0,5
Sumidero sinfónico	1	3
Lavavajillas	3	6
Lavadora	3	6
Cuarto de baño (lavabo, inodoro, bañera y bidé)	Inodoro con cisterna	7
	Inodoro con fluxómetro	8
Cuarto de aseo (lavabo, inodoro, bañera y ducha)	Inodoro con cisterna	6
	Inodoro con fluxómetro	8

Respecto al caudal de diseño, existen autores e incluso la propia norma que proponen 0,47 l/s como el valor correspondiente al caudal de 1 unidad de descarga. Otras veces, el concepto de unidad de descarga relaciona el hecho de llenar de agua un lavabo con un volumen determinado y cronometrar el tiempo que tarda en vaciarse (aproximadamente un minuto). Por otro lado, *Romero y Arrué* (2008) aceptando el concepto de unidad de descarga y su valor de 0,47 l/s, y considerando también la simultaneidad de aparatos, proponen la ecuación 21 para calcular el caudal de aguas residuales domésticas en el área de estudio. Sin embargo, para contrastar estos métodos con la metodología propuesta en este trabajo de investigación, es necesario trabajar con caudales de saneamiento, en lugar de unidades de descarga.

Para ello, utilizando la fórmula de Manning y los diámetros propuestos por el CTE para colectores horizontales (Tabla 5-2) se calcula el caudal que puede

transportar cada uno de los diámetros, considerando que el CTE propone que en condiciones punta los colectores deben trabajar como mínimo con un calado igual a la mitad del diámetro nominal y hasta un máximo de tres cuartos del diámetro nominal. Por otro lado, se calcula igualmente el caudal utilizando la ecuación 221 en la que se tiene en cuenta el coeficiente de simultaneidad propuesto por *Romero y Arrué* (2008), y se comparan los resultados con los caudales calculados mediante la metodología presentada en este trabajo de investigación.

TABLA 5-2: DIÁMETRO DE COLECTORES HORIZONTALES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO MÁXIMO DE UD (CTE_HS-5)

Máximo número de UD			Diámetro (mm)
Pendiente			
1%	2%	4%	
-	20	25	50
-	24	29	63
-	38	57	75
96	130	160	90
264	321	382	110
390	480	580	125
880	1056	1300	160
1600	1920	2300	200
2900	3500	4200	250
5710	6920	8290	315
8300	10000	12000	350

Suponiendo un coeficiente de rugosidad de Manning para materiales de PVC igual a 0,011 se encuentran los caudales a sección llena para los diferentes diámetros, utilizando la ecuación 22.

$$Q_{LLeno} = \frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}} = \frac{1}{2} \frac{\pi D^{8/3}}{4^{5/3}} \quad \text{Ecuación. 22}$$

Siendo:

S : Pendiente del colector igual al 2%

Posteriormente, con la relación de calado y diámetro de la conducción (y/D) tanto para un $\frac{1}{2}$ como para $\frac{3}{4}$, y utilizando las tablas *Thormann y Franke*, se

encuentra el caudal admisible que podría transportar cada uno de los colectores (Tabla 5-3 y 5-4).

TABLA 5-3: CAUDALES EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO Y LAS UNIDADES DE DESCARGA PROPUESTOS POR EL CTE, PARA UN COLECTOR TRABAJANDO A $\frac{1}{2}$ DEL DIÁMETRO NÓMINAL

Máximo número de UD			Diámetro (mm)	Q _{lleno} (m ³ /s)	Y/D	Q/Q _{lleno}	Q (l/s)
Pendiente							
1%	2%	4%					
-	290	25	50	0.0014	0.5	0.5	0.68
-	24	29	63	0.0025			1.26
-	38	57	75	0.0040			2.00
96	130	160	90	0.0065			3.26
264	321	382	110	0.0111			5.57
390	480	580	125	0.0157			7.83
880	1056	1300	160	0.0302			15.12
1600	1920	2300	200	0.0548			27.41
2900	3500	4200	250	0.0994			49.70
5710	6920	8290	315	0.1841			92.04
8300	10000	12000	350	0.2438			121.90

TABLA 5-4: CAUDALES EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO Y LAS UNIDADES DE DESCARGA PROPUESTOS POR EL CTE, PARA UN COLECTOR TRABAJANDO A $\frac{3}{4}$ DEL DIÁMETRO NÓMINAL

Máximo número de UD			Diámetro (mm)	Q _{lleno} (m ³ /s)	Y/D	Q/Q _{lleno}	Q (l/s)
Pendiente							
1%	2%	4%					
-	20	25	50	0.0014	0.75	0.865	1.176
-	24	29	63	0.0025			2.178
-	38	57	75	0.0040			3.468
96	130	160	90	0.0065			5.639
264	321	382	110	0.0111			9.629
390	480	580	125	0.0157			13.540
880	1056	1300	160	0.0302			26.152
1600	1920	2300	200	0.0548			47.417
2900	3500	4200	250	0.0994			85.973
5710	6920	8290	315	0.1841			159.227
8300	10000	12000	350	0.2438			210.881

Utilizando la ecuación 21 propuesta por Romero y Arrué (2008), se encuentran los caudales presentados en la tabla 5-5 y se contrastan con los caudales estimados según la recomendación del CTE en la figura 5-2.

TABLA 5-5: CAUDALES EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO Y LAS UNIDADES DE DESCARGA PROPUESTOS POR ROMERO Y ARRÚE (2008) PARA FINCAS CON MÁS DE 3 PLANTAS

Máximo número de UD			Q (m ³ /s) Arrue
Pendiente			
1%	2%	4%	
-	20	25	2.41
-	24	29	2.81
-	38	57	4.02
96	130	160	7.57
264	321	382	8.36
390	480	580	9.71
880	1056	1300	19.23
1600	1920	2300	34.94
2900	3500	4200	63.68
5710	6920	8290	125.91
8300	10000	12000	181.95

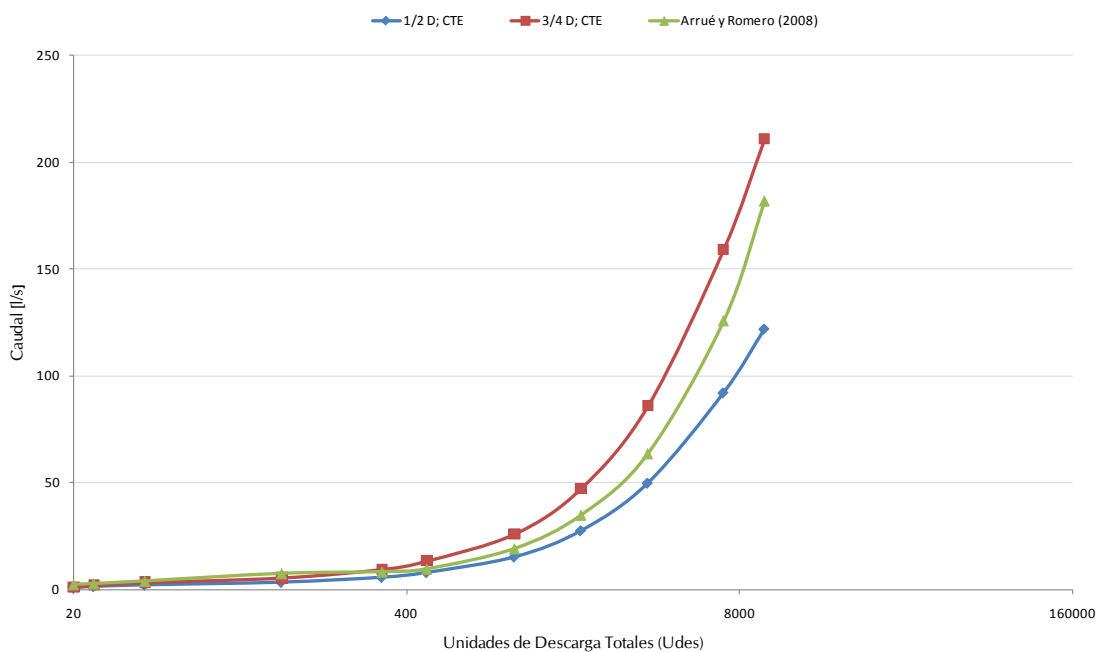


FIGURA 5-2: CAUDALES DE DISEÑO ENCONTRADOS MEDIANTE EL CTE Y (ROMERO Y ARRÚE (2008))

Ahora que se han convertido las unidades de descarga en caudales (punta) de saneamiento, es posible contrastar la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación con los métodos expuestos anteriormente para un diferente número de viviendas.

5.2.1 DIMENSIONADO DEL COLECTOR PARA UN EDIFICIO DE 20 VIVIENDAS

Planteada una de las metodologías más utilizadas para convertir unidades de descarga en caudales de saneamiento se procede a continuación a realizar el cálculo de un colector que debe soportar la carga aportada por las bajantes, en edificios de 20 viviendas distribuidas en 5 plantas. Asignándole 4 viviendas a cada planta. En primera instancia se encuentra el número de unidades de descarga para las 20 viviendas, utilizando la tabla 5-1. En función del número de unidades de descarga que se obtengan, se remite de nuevo al CTE y se encuentra el diámetro del colector necesario para una pendiente del 2% (Tabla 5-2)

Respecto al número de aparatos en cada una de las viviendas, sus respectivas unidades de descarga se definen en función del tipo de vivienda considerada. Considerando esto, se asumen viviendas tipo D, por presentar una gran similitud con las viviendas monitorizadas en la Comunidad de Madrid. Estas viviendas están dotadas con un cuarto de baño, un aseo, cocina, lavadora y lavadero. Por otro lado, el origen de esta clasificación se puede encontrar en la NIA (Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de Suministro de Agua), documento que fue sustituido por el CTE, del que aún, algunas de sus recomendaciones se utilizan como guía de diseño aunque no sean de obligado cumplimiento.

TABLA 5-6: UDS CORRESPONDIENTES A LOS DISTINTOS APARATOS SANITARIOS, VIVIENDA TIPO D

Tipo de aparato	Número de aparato	UD
Cocina		
Fregadero	1	3
Lavavajilla	1	3
Lavadero	1	3
Lavadora	1	3
Cuarto de baño	1	
Lavabo	1	1
inodoro (cisterna)	1	4
Bañera	1	3
Bidé	1	2
Cuarto de aseo	1	
Lavabo	1	1
inodoro (cisterna)	1	4
Ducha	1	2

La tabla 5-6 presenta el tipo de aparatos correspondiente a cada una de las viviendas tipo D, y sus respectivas unidades de descarga. Encontrándose que el número total de unidades de descarga para cada una de las viviendas es de 29 UD. Dado que el diseño del colector se realiza para 20 viviendas, se encuentra que el número total de unidades de descarga es igual a 580 UD. Con este número de unidades de descarga, y según lo calculado en la tabla 5-3 para colectores trabajando a $\frac{1}{2}$ del diámetro nominal, se encuentra que el diámetro óptimo del colector, según el CTE es de 160 mm y un caudal pico de 15,11 l/s. Por otro lado, aplicando la ecuación 21, planteada por *Romero y Arrué* (2008) se obtiene, para 580 unidades de descarga, un diámetro de 160 mm pero un caudal pico de 9,70 l/s.

Por otro lado, utilizando la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación se determinó que para 20 viviendas, el caudal máximo ponderado cada diez segundos que se espera no ser superado según una función de distribución Lognormal, una confiabilidad del 99% y un periodo de retorno de 100 años es de 3,31 l/s (Ecuación 18). Con este caudal y aplicando de nuevo la ecuación de Manning, se obtiene que el diámetro teórico del colector trabajando a un medio de su diámetro nominal, es igual a 85 mm, correspondiente a un diámetro comercial de 90 mm, que sería suficiente para transportar dicho caudal.

TABLA 5-7: DISEÑO DE UN COLECTOR DE 20 VIVIENDAS)

Q_{md} [m ³ /s]	Q_{md} [l/s]	Pendiente	Diámetro (mm)
0,003113	3,31	2%	110

Como era de esperar, la variación en los diámetros es sustancial. Sin embargo, antes de concluir, se procede a calcular los diámetros del colector para 10 y 40 viviendas respectivamente.



5.2.2 DIMENSIONADO DEL COLECTOR PARA UN EDIFICIO DE 10 Y 40 VIVIENDAS

De igual modo como se calcula el colector para un edificio de 20 viviendas, se procede a dimensionar el colector para edificios de 10 y 40 viviendas respectivamente. En el caso de 10 viviendas, el uso será de 290 UD. En las tablas 5-8 y 5-9, se presentan el resultado del caudal y el respectivo diámetro del colector que debe soportar la carga aportada por las 10 viviendas, calculado para ambos métodos.

TABLA 5-8: DISEÑO DE UN COLECTOR DE 10 VIVIENDAS (ROMERO Y ARRÚE (2008))

UD Total	Q [m ³ /s]	Q [l/s]	Pendiente	Diámetro (mm)
290	0,0082	8,24	2%	110

TABLA 5-9: DISEÑO DE UN COLECTOR DE 10 VIVIENDAS TRABAJANDO A ½ DEL DIÁMETRO NÓMINAL (MÉTODO PROPIO)

Q [m ³ /s]	Q [l/s]	n (PVC)	Pendiente	Diámetro Teórico (mm)	Diámetro Comercial (mm)
0,0023	3,13	0,011	2%	88,70	90

Como se puede observar, aplicando tanto el método de adjudicación de unidades de descarga propuesto por Romero y Arrué (2008), como el método propuesto en este trabajo, la variación de caudales, entre 10 y 20 viviendas no es muy significativa utilizando el mismo método. Sin embargo, se mantiene la importante diferencia de caudales entre ambos métodos. Por tal motivo, se realiza un tercer diseño para edificios de 40 viviendas, considerando ahora 1160 UD.

TABLA 5-10: DISEÑO DE UN COLECTOR DE 40 VIVIENDAS (ROMERO Y ARRÚE (2008))

UD Total	Q [m ³ /s]	Q [l/s]	Pendiente	Diámetro (mm)
1160	0,0211	21,114	2%	200

Para calcular el caudal de diseño del colector mediante el método propio, se recurre de nuevo a la ecuación 18 y para un total de 40 viviendas, el caudal que se obtiene es igual a 3,75 l/s.

TABLA 5-11: DISEÑO DE UN COLECTOR DE 40 VIVIENDAS (MÉTODO PROPIO)

Q [m ³ /s]	Q [l/s]	n (PVC)	Pendiente	Diámetro Teórico (mm)	Diámetro Comercial (mm)
0,00375	3,75	0,011	2%	95	110

Una vez más se evidencia la discrepancia entre calcular el caudal de diseño obtenido, mediante el método de las unidades de descarga para cada aparato, y calcular el mismo caudal en base a mediciones de consumo y al comportamiento real del uso de cada aparato.

Otro hecho importante al analizar esta discrepancia, tiene que ver con la manera en la que el CTE asigna un valor de caudal, 0,47 l/s, a cada unidad de descarga. Este valor resulta claramente excesivo en comparación con los resultados obtenidos en este modelo. Un claro ejemplo de dicho exceso, se evidencia en la normativa cuando al uso de un lavabo se le asigna una unidad de descarga. El cual resultaría de suponer que un usuario antes de abrir el grifo del lavabo emplea un tapón para sellar el sifón. Posteriormente abre el grifo y empieza a acumular un volumen de agua igual a 28 l/s, que posteriormente es descargado en un periodo de tiempo igual a 60 segundos.

Por otro lado, está el hecho de la simultaneidad en uso de aparatos, dado que aunque se utilice el coeficiente de simultaneidad propuesto por *Romero y Arrué* (2008), estos autores asumen que lo propuesto en la normativa es correcto. Razón por la cual, obtienen coeficientes demasiado estables e invariantes con las unidades de descarga, pudiéndose observar en la figura 5-1, como a partir de 200 UD, el coeficiente de simultaneidad (K) se mantiene casi constante en valores entre 0,04 y 0,05.



5.3 COMPARATIVA DEL CAUDAL SIMULTANEO CON LA NORMA AFNOR [NFP 41-204] (FRANCESA)

El método de los caudales es uno de los más utilizados para el diseño de las redes de saneamiento, dado que en lugar de asignar unidades de descarga a cada uno de los aparatos que se encuentran en una vivienda, utiliza para cada uno de ellos, un caudal de desagüe. Dicho caudal se obtiene a partir del volumen promedio utilizado por cada aparato, y el tiempo que este tarda en desaguar dicho volumen. Además, está condicionado a las propiedades hidráulicas de los elementos que utilice para el desagüe, como por ejemplo, los diámetros de los orificios de sifones, las válvulas instaladas para el control del caudal que se aporta a las bajantes, entre otras.

Por otro lado, para considerar el efecto de simultaneidad, AFNOR utiliza un coeficiente reductor, sobre el cual *Rubio Requena (Norma Francesa NFP 41-204)* propuso una modificación posterior. Este coeficiente, está condicionado por la actividad del edificio, es decir, si se trata de edificios de viviendas, hospitales, etc. Dicho coeficiente se presenta en la ecuación 23. (*Norma Francesa NFP 41-204*)

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{n-1}} + \alpha [0.035 + 0.035 \cdot \log_{10}(\log_{10} \cdot n)] \quad \text{Ecuación. 23}$$

Siendo:

n : Numero de aparatos instalados en una vivienda

α : Coeficiente según el uso de edificio

Nota: Para el caso de viviendas, se adopta $\alpha = 2$ (*Norma Francesa NFP 41-204*)



El caudal de diseño para una vivienda, se calcula como la sumatoria del caudal aportado por cada aparato y multiplicando esta sumatoria, por el coeficiente de simultaneidad planteado en la ecuación 24.

$$Q_{vivienda} = K_s \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{Ecuación. 24}$$

Siendo:

Q_i : El caudal correspondiente a cada aparato instalado en una vivienda.

Ahora bien, dado que lo que se buscan es diseñar el colector inicialmente para 20 viviendas el método propone un coeficiente de simultaneidad adicional, que estará en función del número de viviendas consideradas y encuentra el caudal, utilizando la ecuación 25. (*Norma Francesa NFP 41-204*)

$$Q_{colector} = \left[\frac{19 + N}{10 \cdot (N + 1)} \right] \cdot N \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{Ecuación. 25}$$

Siendo:

N : Número de viviendas consideradas en el edificio

Teniendo clara la metodología propuesta para encontrar el caudal de diseño del colector en 20 viviendas, se procede a presentar una vez más los resultados. Para ello, la tabla 5-12 se presenta los caudales aportados por cada uno de los aparatos de una vivienda tipo D y el respectivo caudal de diseño del colector.



TABLA 5-12: CAUDALES DE SANEAMIENTO PARA APARATOS DE VIVIENDAS TIPO D

Tipo de aparato	Número de aparatos	Q (l/s)	Ks(11)	Qi (m3/s)	K(20)	Q _{colector} (l/s)
Cocina			0,387	0,0041	0,1857	15,11
Fregadero	1	0,75				
Lavavajilla	1	1				
Lavadero	1	0,75				
Lavadora	1	1				
Cuarto de baño						
Lavabo	1	0,75				
inodoro (cisterna)	1	1,5				
Bañera	1	1,5				
Bidé	1	0,5				
Cuarto de aseo						
Lavabo	1	0,75				
inodoro (cisterna)	1	1,5				
Ducha	1	0,5				
Total Aparatos	11	10,5				

TABLA 5-13: DISEÑO DEL COLECTOR PARA 20 VIVIENDAS (MÉTODO DE LOS CAUDALES)

Q m ³ /s	l/s	n (PVC)	Pendiente	Diámetro Teórico (mm)	Diámetro Comercial (mm)
0,0151	15,11	0,011	2%	159,98	160

La tabla 5-13 muestra que utilizando el método de los caudales, el diámetro del colector que se debe instalar, trabajando a media sección de su diámetro nominal, es de 160 mm. Coincidiendo con el diámetro obtenido mediante el método propuesto por la normativa Española. Sin embargo, estos resultados siguen siendo bastante distantes a los presentados en el presente trabajo de investigación, cuya posible causa de deba a: Aunque el método de los caudales, como su nombre lo indica, realiza una estimación de los caudales aportados por cada aparato, y considerando además dos factores de simultaneidad (uno para el número de aparatos y otro para el número de viviendas), sigue presentando una gran incertidumbre, dado que sus estimaciones no se basan en mediciones reales de consumo.

TABLA 5-14: COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE UN COLECTOR TRABAJANDO A MEDIA SECCIÓN EN EDIFICIOS DE VIVIENDA

Número de viviendas	Metodología de cálculo del caudal punta de aguas residuales							
	CTE		Romero y Arrué (2008)		Método de los caudales (AFNOR)		Método propio	
	Q [l/s]	Diámetro [mm]	Q [l/s]	Diámetro [mm]	Q [l/s]	Diámetro [mm]	Q [l/s]	Diámetro [mm]
10	5,56	110	8,24	110	10,73	160	2,31	90
20	15,11	160	9,7	160	15,11	160	3,31	110
40	27,4	200	21,114	200	23,42	200	3,66	110

Respecto al caudal punta se puede apreciar como el método de las unidades de descarga (Romero y Arrué, 2008) y el método de los caudales (Norma Francesa NFP 41-204) discrepan entre sí en función del número de vivienda. El motivo está en la manera como se calculan los coeficientes de simultaneidad en el método de unidades de descarga, dado que a partir de ciertas unidades de descargas el coeficiente se mantiene invariante con el número de viviendas, es decir, se pierde la simultaneidad.

Por otro lado, los caudales encontrados por el método presentado en este trabajo de investigación, no solo provienen de mediciones reales, si no también, que se les ha aplicado una metodología estocástica que reproduce fidedignamente la naturaleza aleatoria de dichos datos. Eso a pesar de las simplificaciones realizadas sobre la independencia entre los usos que forman cada descarga de aparatos. Aun así, los caudales estimados siguen siendo muy inferiores a los adoptados por las normativas.

6 CONCLUSIONES

Partiendo del estudio "*Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico en la Comunidad de Madrid*", donde se obtuvieron una serie de mediciones de consumo, fue posible aprovechar estos datos para realizar un modelo estocástico que determinara el caudal descargado por los aparatos a la red de evacuación de aguas residuales, para un determinado periodo de retorno y en función del número de viviendas que se encuentren conectadas al sistema.

La metodología parte de la caracterización individual del consumo como una variable aleatoria. Obteniéndose en primera instancia que el volumen total consumido por una vivienda al día en la Comunidad de Madrid, es representado fidedignamente por la función de distribución de probabilidad *Gamma* con parámetros de escala y forma igual a 1,46 y 0,004 respectivamente.

En cuanto al porcentaje de volumen consumido en cada uno de los usos finales se obtuvieron las funciones de distribución de probabilidad más adecuada para estimar dichos parámetros, más concretamente: El volumen consumido por el uso de cisternas y lavadoras es caracterizado razonablemente por la función de distribución de probabilidad *Gamma*. De manera análoga, el porcentaje de volumen consumido en el uso de grifos es caracterizado por la función de distribución *Weibull*, al igual que el porcentaje consumido por las duchas. Adicionalmente, el porcentaje de volumen consumido por los lavavajillas es potencialmente caracterizable mediante la función de distribución de probabilidad *Lognormal*.

Respecto al volumen consumido por las cisternas, se obtuvo que la función de distribución *Lognormal* es la más adecuada para la modelación de este



parámetro. Aunque el ajuste no sea completamente satisfactorio para la totalidad de la serie, representa de manera razonable los volúmenes con las frecuencias más altas, a los que corresponden los usados en el modelo (6 y 11 litros).

Una situación muy similar a la anterior, se presenta con la caracterización del volumen consumido por los grifos y la función de distribución *Weibull*. Sin embargo, dado que para modelar este uso, también se tienen en cuenta sus caudales, se obtiene igualmente, que estos están fidedignamente representados mediante la función de distribución de probabilidad *Weibull*.

En cuanto al volumen consumido por las duchas así como sus caudales, son bien representados por la función de distribución de probabilidad *Gamma*.

Una vez es caracterizado el consumo se crearon series sintéticas de las descargas de los aparatos sanitarios. Con el fin de comprobar la fiabilidad de la transformación, se contrastaron las curvas de modulación del consumo con las curvas que representan el comportamiento en el tiempo, de las descargas de cada tipo de aparato. El resultado muestra una gran similitud entre ambas series, lo cual indica que las simulaciones del modelo se corresponden con los volúmenes reales demandados por los aparatos sanitarios, instalados en las viviendas monitorizadas.

El caudal máximo horario de saneamiento obtenido para una simulación, 1000 viviendas y un periodo de retorno de 365 días, es de 564 l/vivienda/día. Contrastando este resultado con el caudal punta de consumo (526 l/vivienda/día), se establece que la diferencia máxima no excede el 7%, mostrando un resultado bastante lógico.

El modelo propuesto es suficientemente flexible como para contemplar sin problema alguno los efectos de la estacionalidad, es decir, los periodos vacacionales o la época invernal en la que los usuarios suelen permanecer en sus hogares por más tiempo. Bastaría con aumentar la dotación del consumo que se ha considerado para las simulaciones y solo para estar siempre del lado de la seguridad, puesto que este efecto de estacionalidad aunque no es considerado



directamente dentro del modelo, es tenido en cuenta previamente en las mediciones del consumo.

La relación entre el porcentaje en el que permanece inactivo el sistema, en función del número de viviendas consideradas indica que al aumentar tanto el intervalo de integración como el número de viviendas, disminuye la probabilidad de que dichas viviendas no le aporten algún tipo de caudal a la red de saneamiento.

Partiendo del hecho que los modelos hidráulicos con naturaleza estocástica se valen de las leyes del azar o la probabilidad para representar eventos aleatorios, se ha encontrado que la función de distribución de probabilidad *Lognormal* es la que mejor representa los caudales máximos anuales por el sistema de drenaje, en función del número de viviendas que se encuentren conectadas a la red. Con una probabilidad del 99% de no ser superados estos caudales, en un periodo de retorno de 100 años.

Se han estimado mediante una expresión, los coeficientes de laminación de los caudales punta de saneamiento, en función del intervalo de integración y el número de viviendas. Encontrándose que estos coeficientes son validos para caudales punta de hasta 1000 viviendas conectadas a la red.

No obstante, al utilizar el modelo estocástico propuesto en este trabajo de investigación, se debe tener un especial cuidado con las redes que son sometidas a cargas de caudal que no correspondan a un comportamiento aleatorio, es decir, que se considere que la generación de un pulso puede conducir a la aparición de otro ó que impida la generación de un determinado uso durante cierto tiempo o que el uso este condicionado por un factor externo. Tal es el caso de aquellos eventos que inducen o sesgan el comportamiento en el uso de los aparatos, como es el caso un partido de futbol durante el cual los espectadores acuden masivamente al uso de los aparatos sanitarios durante el receso y justo antes o después de terminar el partido. Para modelar dicha situación es necesario acudir a técnicas que no solo se basen en comportamientos probabilísticos.



Se compararon los resultados del modelo propuesto con los métodos existentes para el diseño de las redes de saneamiento en edificio de viviendas. Dichos métodos existentes están basados en lo propuesto en 1940 por el Ingeniero Roy B. Hunter, cuyas teorías se basan en la probabilidad de ocurrencia de un determinado número de aparatos en función de una duración estimada de uso para cada uno de ellos, sin embargo, nunca es presentado un caudal de referencia que estime la descarga de cada uno de estos aparatos, como si se hace con la metodología propuesta en este trabajo de investigación.

Al comparar los resultados del modelo estocástico con los resultados obtenidos al aplicar los métodos tradicionales de diseño para las redes de saneamiento, se observa una gran discrepancia entre ambos. Demostrando que los métodos existentes sobreestiman la carga de diseño de los sistemas de saneamiento y al utilizar el Código Técnico de la Edificación estos métodos tradicionales, se puede concluir con un alto grado de fiabilidad que las redes de saneamiento diseñados con esta normativa, jamás fallaran en cuanto a su capacidad hidráulica se refiere.



7 DESARROLLOS FUTUROS

El trabajo realizado ha estado enfocado al análisis de los caudales descargados a la red de saneamiento. Sin embargo, existe un gran interés en afinar los modelos hidráulicos de las redes de distribución de agua. Es por este motivo que se ha previsto continuar la línea de investigación iniciada en el presente trabajo, extrapolando la metodología propuesta a los caudales suministrados a las viviendas. En este sentido se elaborará un modelo estocástico, similar al presentado para Saneamiento, que permita la predicción de los caudales punta en la red de distribución tanto en lo que se refiere a edificios de viviendas como a los puntos de entrada a sectores de la red general de distribución. Este modelo permitiría entre otras aplicaciones, llevar a cabo mejoras en el diseño de nuevas instalaciones y redes de distribución, así como optimizar las ya existentes; al igual que poner en marcha planes de gestión por parte de las empresas de abastecimiento, detectando el caudal fugado (perdidas físicas y aparentes), implementando métodos como el de los caudales mínimos nocturnos.

En cuanto a los resultados ya obtenidos para las redes de saneamiento, se ha presentado hasta el momento el comportamiento de los caudales máximos anuales y una expresión que permite predecirlos, con un periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, para terminar de afinar el modelo, es necesario ampliar el número de simulaciones y escenarios de análisis, considerando que para el presente trabajo estuvieron limitados por las herramientas informáticas disponibles y el plazo establecido para la presentación de entrega.

Aunque el modelo es capaz de contemplar el efecto de la estacionalidad, ya sea semanal o mensual, este parámetro no ha sido incluido en las simulaciones realizadas. Por ello, para el desarrollo de la Tesis doctoral está prevista la obtención de curvas de modulación para diferentes periodos de tiempo con el



fin de poder incluir la influencia de este parámetro tanto en lo que se refiere a las simulaciones de los caudales suministrados como las descargas a la red de saneamiento de los edificios.



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arregui, F.; Gascón, L. (2003). *“Comprobaciones de los patrones de consumo en la Comunidad de Madrid”*. Desarrollo para el Canal de Isabel II.
- Bowen, P. T., Harp, J. F., Baxter, J. W., y Shull, R. D. (1993). *“Residential Water Use Patterns”*. AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Buchberger, S. G. y Lee, Y. (1999). *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, capítulo Evidence Supporting the Poisson Pulse Hypothesis for Residential Water Demands*, 215–227. Research Studies Press Ltd.
- Buchberger, S. G. y Wells, G. J. (1996). *“Intensity, duration and frequency of residential water demands.” Journal of Water Resources Planning and Management*, 122, No. 1, 11–19.
- Buchberger, S. G. y Wu, L. (1995). *“Model for instantaneous residential water demands.” Journal of Hydraulic Engineering*, 121, No. 3, 232–246.
- Butler, D. y Graham, N. (1995). *“Modeling dry weather wastewater flow in sewernetworks” Journal of Environmental Engineering*, 121, No. 2, 161–173.
- Canal Isabel II. (2008). *“Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico en la Comunidad de Madrid”*. Cuadernos de I + D + I
- DeOreo, W. B., Heaney, J. P., y Mayer, P. W. (1996). *“Flow trace analysis to assess water use.” Journal AWWA*, 79–90.
- García, V. García - Bartual, R. Cabrera, E. M. ASCE Arregui, F. García, J. (2004). *“Stochastic Model to Evaluate Residential Water Demands”*. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, 386-394.



- Herrington, P. (1995). *"Climate change and the demand for water, Final report to the Institute of Hydrology and the Department of the Environment"*. London, April 1995.
- Hunter, R. (1940). *"Building Materials and Structures - Plumbing Manual, BMS66"* National Bureau of Standards. United States Government Printing Office. Washington
- ITA. (2003). *"Herramienta informática para el análisis de los usos finales de la demanda"*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Kiya, F. y Murakawa, S. (1989). Design Load for Water Supply in Buildings. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Martínez, F. (2002) *"Aplicación de los sistemas de información geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable"*. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia
- Mayer, P. W., DeOreo, W. B., Opitz, E. M., Kiefer, J. C., Davis, W. Y., Dziegielewski, B., y Nelson, J. O. (1999). *Residential End Uses of Water*. American Water Works Association Research Foundation AWWA.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. *"Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de Suministro de Agua (NIA)"*. Centro de Publicaciones (1975). Según Orden de 9 de Diciembre de 1975 (B.O.E. del 13-1-76 y corrección de errores en el B.O.E. de 12-2-76).
- Ministerio de la Vivienda de España. (2006). *"Código Técnico de la Edificación (CTE)"*. BOE nº 74, por el RD 314/2006, de 17 de marzo de 2006.
- Romero, P. y Arrué, P (2008). *"Cálculo de Instalaciones Hidrosanitarias con software para Calculadora Gráfica HP y Excel (adaptado al CTE, exigencia HS-4 y HS-5)"*. Universidad Politécnica de Valencia
- StatPoint Technologies (2006). *"Statgraphics 5.1"* Comprehensive package designed for interactive statistical data analysis.



Wells, G. J. (1994). *“Statistical characteristics of residential water demands.”*

Master’s thesis, Univ. of Cincinnati, Cincinnati.

