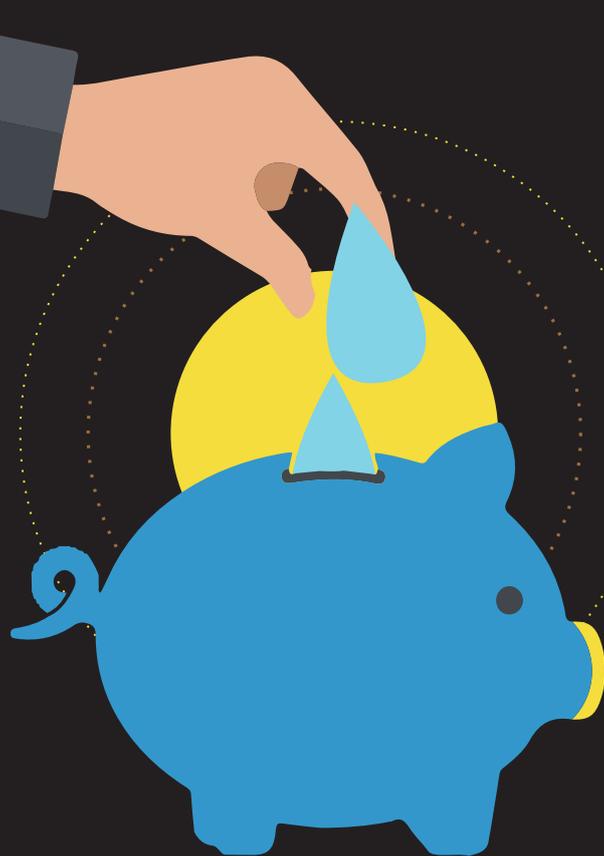


**Análisis y caracterización de las  
instalaciones interiores de suministro de  
agua desde el punto de vista del ahorro**

**Gonzálo López Patiño**  
Valencia 2015



Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

## TESIS DOCTORAL

“ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES  
INTERIORES DE SUMINISTRO DE AGUA  
DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL AHORRO”

Autor:

D. Gonzalo López Patiño

Directores:

D<sup>o</sup>. P. Amparo López Jiménez

D. F. Javier Martínez Solano

Valencia, Septiembre de 2015

A mi familia

A mis compañeros en la UPV

## INDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	iii
RESUM	v
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1. Justificación. Estado del arte	2
2. Objetivo	12
3. Estructura del documento	14
CAPÍTULO 2. DEMANDA DE AGUA EN EDIFICIOS	
1. Introducción	20
2. Patrones de consumo de agua	22
2.1. Patrón de consumo doméstico.	22
3. Demanda de agua en edificios de viviendas	32
4. Obtención del consumo de agua en edificios	42
4.1. Auditoria del consumo de agua de un edificio	43
4.2. Encuesta de consumo de agua	51
5. Conclusiones	52
CAPÍTULO 3. ANALISIS DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA	
1. Introducción	56
2. Sistemas de ahorro de agua	57
2.1. Aireadores/perlizadores	58
2.2. Reductor de caudal de duchas	61
2.3. Cabezal de ducha con reductor de caudal	62
2.4. Grifos de inodoro de bajo consumo	64
2.5. Griferías automáticas	66
2.6. Válvulas reductoras de presión	68
2.7. Grifería monomando de apertura en dos posiciones	71

2.8. Grifería monomando de apertura en frío	72
3. Fuentes alternativas de suministro	74
3.1. Sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia	74
3.2. Sistemas de reutilización de aguas usadas	76
3.3. Sistemas de aprovechamiento de aguas de condensación	89
4. Conclusiones	90
CAPÍTULO 4.	
1. Introducción	92
2. Análisis general de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia	95
2.1. Aplicaciones del sistema	97
2.2. Coste del sistema	98
2.3. Cuestiones generales de diseño	99
3. Elementos que forman el sistema	100
3.1. Elementos de captación	100
3.2. Filtros primarios de retención	102
3.3. Conducciones	104
3.4. Separadores de primera lluvia	105
3.5. Depósitos	106
3.6. Equipo de bombeo	115
4. Morfología del sistema	116
4.1. Esquema de instalación	119
5. Dimensionado de la instalación	122
5.1. Separador de primera lluvia	122
5.2. Depósito de almacenamiento	129
5.3. Conducciones	139
5.4. Equipo de bombeo	140
6. Conclusiones	147

## CAPÍTULO 5. RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

1. Introducción	150
2. Sistemas de climatización para el aprovechamiento de condensados	153
2.1. Sistemas de climatización	153
3. Psicrometría del proceso de enfriamiento y deshumectación	160
3.1. Proceso de enfriamiento y deshumectación en una unidad de tratamiento de aire	162
3.2. Proceso de enfriamiento y deshumectación en un equipo autónomo compacto	169
3.3. Proceso de enfriamiento y deshumectación en una máquina de expansión directa con ciclo de compresión	171
4. Análisis del potencial de condensación en sistemas de climatización	174
4.1. Desarrollo de las mediciones	174
4.2. Resultados	177
5. Instalación de aprovechamiento de condensado	182
6. Conclusiones	184

## CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AHORRO DE AGUA

1. Introducción	188
2. Criterios característicos de los sistemas de hidroeficiencia	188
3. Criterio de ahorro de agua	190
4. Criterio de ahorro de energía	197
4.1. Ahorro de energía por calentamiento de agua	199
4.2. Ahorro de energía por bombeo	203
5. Criterio de impacto socio-ambiental	206
6. Criterio de diseño	209
7. Criterio de viabilidad económica	212
7.1. Análisis de ingresos	214
7.2. Análisis de costes	224

7.3. Valoración de la viabilidad económica de la inversión	233
8. Conclusiones	237
CAPÍTULO 7. VALORIZACIÓN Y SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AHORRO DE AGUA	
1. Introducción	240
2. Análisis coste-beneficio para la selección de sistemas de hidroeficiencia	241
2.1. Criterios de rentabilidad en el análisis coste-beneficio	244
2.2. Método del valor equivalente de un flujo de efectivo.	245
2.3. Método de la tasa interna de retorno	249
2.4. Método del periodo de retorno o pay-back	251
2.5. Aplicación de los criterios de rentabilidad al ahorro de agua	252
3. Selección multicriterio de sistemas de hidroeficiencia	259
3.1. Método del proceso analítico jerárquico (ahp)	265
3.2. Aplicación del método ahp a la selección de sistemas de hidroeficiencia	270
4. Selección de sistemas de hidroeficiencia	278
5. Casos de aplicación	280
5.1. Edificios de viviendas	283
5.2. Edificios residenciales multifamiliares	289
5.3. Hotel	293
6. Conclusiones	299
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	
1. Conclusiones	302
2. Desarrollos futuros	313
BIBLIOGRAFÍA	317

## RESUMEN

Es una realidad que en nuestro entorno existe un déficit hídrico que afecta tanto al consumo agrícola de agua dulce como al consumo urbano de agua potable. Las condiciones ambientales de cambio climático agravarán la situación en los próximos años. La gestión eficiente de los recursos hídricos es, y será, un tema importante para la sociedad que debe ser abordado desde un punto de vista social y tecnológico.

Aunque el consumo no agrícola supone sólo una 30% de la demanda total de agua dulce, es el uso urbano del agua, que consume la mayor parte de ese porcentaje, el más preocupante por cuanto afecta directamente a las condiciones de vida de las personas.

A la escasez de recursos hídricos se responde desde dos perspectivas. Por un lado el aumento de la oferta, a través de un aumento de las captaciones, trasvases desde cuencas excedentarias, o desalación. Por otro lado la reducción o gestión eficiente de la demanda. Es desde este enfoque desde donde se desarrolla este trabajo de investigación.

El objetivo de la tesis doctoral es desarrollar una metodología para la selección de los sistemas de ahorro de agua potable más adecuados para equipar en un edificio.

El proceso de selección se plantea desde dos aproximaciones, correspondiendo cada uno de ellos a un uso diferente del edificio. Para los edificios destinados a desarrollarse una actividad productiva se utiliza un método de selección coste-beneficio. Para el resto de edificios se utiliza un método de selección multicriterio. Para esta situación se ha optado por aplicar el método del proceso analítico jerárquico a la selección de sistemas de ahorro de agua.

Para la aplicación de la selección multicriterio, se han definido una serie de criterios a tener en cuenta: ahorro de agua, ahorro de energía, impacto socio-ambiental, diseño, y viabilidad económica.

Cada dispositivo o sistema de ahorro de agua debe ser caracterizado en base a cada uno de estos criterios. En la tesis se ha desarrollado la forma de caracterizar los denominados "sistemas de hidroeficiencia" para cada uno de los criterios de selección definidos.

Como parte del proceso de caracterización, es necesario conocer la forma de consumir agua potable que se produce en el edificio. Para ello se puede realizar una auditoría de demandas, en el caso que el edificio exista, o se debe extrapolar resultados de edificios similares, en caso que el edificio sea un edificio de nueva planta que se quiere equipar con los sistemas de hidroeficiencia, ya de partida. En la tesis se indica cómo llevar a

cabo una auditoría del consumo de agua del edificio. Igualmente se exponen algunos estudios de patrones de consumo en edificios de viviendas, y se presenta un estudio propio sobre patrones de demanda en la zona de Valencia, para la que no existía información.

Para la viabilidad económica de la implantación de los sistemas de ahorro tiene gran importancia que su tamaño sea lo más ajustado posible al uso que se hace de ellos en el edificio. Por ello, se ha hecho un estudio del dimensionado óptimo y económico de los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales.

Igualmente se ha estudiado de forma teórica la capacidad de generación de agua de condensación de los sistemas de climatización, para su aprovechamiento en las instalaciones de suministro de agua. Dicha información se utiliza para el dimensionado de los equipos de ese sistema de hidroeficiencia. Como no había información contrastada sobre la validez del método teórico, se han realizado mediciones para contrastarlos.

Con todo, en la tesis que se presenta se han realizado las mediciones, estudios, análisis y caracterización de equipos necesarios para que se disponga de una metodología completa para la selección multicriterio de los sistemas de hidroeficiencia más adecuados para equipar un determinado edificio.

## SUMMARY

It is a fact that in our environment there is a water shortage that affects the agricultural and urban freshwater consumption. The environmental conditions of climate change will aggravate the situation in the coming years. The efficient management of water resources is, and will be, an important issue for society that must be addressed from a social and technological point of view.

Although nonfarm consumption represents only 30% of the total demand for freshwater, the urban water use is the more worrying because it directly affects the lives of people.

A shortage of water resources is answered from two points of view. On the one hand, increasing supply through an increase in water uptakes, transfers from surplus basins, or desalination. On the other hand the reduction of demand, or efficient demand management. It is from this approach where this research takes place.

The aim of the thesis is to develop a methodology to select the most appropriate water saving system to equip a building.

The selection process arises from two approaches, each corresponding to a different use of the building. For buildings intended to develop a productive activity a cost-benefit selection method is used. For other buildings, a multicriteria selection method is used. For this last situation, application of analytic hierarchy process to selection of water saving systems is chosen.

For the implementation of the multicriteria selection method, a series of selection criteria have to be defined and considered: water conservation, energy conservation, social and environmental impact, design, and economic viability.

Each device or water saving system should be characterized on the basis of each of these criteria. In the thesis has been developed the way to characterize the "water efficient systems" for every of the selection criteria defined.

As part of the characterization process, it is necessary to know drinking water demand patterns produced in the building. To do this, a water consumption audit can be performed, for the existing buildings, or results of similar buildings can be extrapolated, in the event that the building were a new construction that is going to be equipped with water efficient systems. The thesis shows how to carry out an audit of water consumption of the building. Also, some studies of water demand patterns in residential buildings are set. A self-done study on water patterns demands in the area of Valencia is presented.

For the economic viability of implementing water saving systems it is very important that the size of all its equipments are as tight as possible to the use made of them in the

building. Therefore, a study of the optimal and economic dimensioning of rain water harvesting systems has been made.

It has also been theoretically studied the generating capacity of water condensation in air conditioning systems, for its use in water supply facilities. This information is used for equipment sizing of this water saving system. As there was no verified information on the validity of the theoretical method, measurements have been performed to contrast them.

Finally, in this thesis measurements, studies, analysis, and equipment characterization, had been performed to make available a complete methodology for multi-criteria selection of the most suitable water efficient systems to equip a given building.

## RESUM

És una realitat que en el nostre entorn hi ha un dèficit hídric que afecta tant el consum agrícola d'aigua dolça com al consum urbà d'aigua potable. Les condicions ambientals de canvi climàtic agreujaran la situació en els pròxims anys. La gestió eficient dels recursos hídrics és, i serà, un tema important per a la societat que ha de ser abordat des d'un punt de vista social i tecnològic.

Encara que el consum no agrícola suposa només una 30% de la demanda total d'aigua dolça, és l'ús urbà de l'aigua, que consumix la major part d'eixe percentatge, el més preocupant ja que afecta directament les condicions de vida de les persones.

A l'escassetat de recursos hídrics es respon des de dos perspectives. Per un costat l'augment de l'oferta, a través d'un augment de les captacions, transvasaments des de conques excedentàries, o dessalatge. Per un altre costat la reducció o gestió eficient de la demanda. És des d'este enfocament des d'on es desenrotlla este treball d'investigació

L'objectiu de la tesi doctoral és desenrotllar una metodologia per a la selecció dels sistemes d'estalvi d'aigua potable més adequats per a equipar en un edifici.

El procés de selecció es planteja des de dos aproximacions, corresponent cada un d'ells a un ús diferent de l'edifici. Per als edificis destinats a desenrotllar-se una activitat productiva s'utilitza un mètode de selecció cost-benefici. Per a la resta d'edificis s'utilitza un mètode de selecció multicriterio. Per a esta situació s'ha optat per aplicar el mètode del procés analític jeràrquic a la selecció de sistemes d'estalvi d'aigua.

Per a l'aplicació de la selecció multicriterio, s'han definit una sèrie de criteris a tindre en compte: estalvi d'aigua, estalvi d'energia, impacte socioambiental, disseny, i viabilitat econòmica.

Cada dispositiu o sistema d'estalvi d'aigua ha de ser caracteritzat basant-se en cada un d'estos criteris. En la tesi s'ha desenrotllat la forma de caracteritzar els denominats "sistemes de hidroeficiència" per a cada un dels criteris de selecció definits.

Com a part del procés de caracterització, és necessari conèixer la forma de consumir aigua potable que es produïx en l'edifici. Per a això es pot realitzar una auditoria de demandes, en el cas que l'edifici existisca, o s'ha d'extrapolat resultats d'edificis semblants, en cas que l'edifici siga un edifici de nova planta que es vol equipar amb els sistemes de hidroeficiència, ja de partida. En la tesi s'indica com dur a terme una auditoria del consum d'aigua de l'edifici. Igualment s'exposen alguns estudis de patrons de consum en edificis de vivendes, i es presenta un estudi propi sobre patrons de demanda en la zona de València, per a la que no existia informació.

Per a la viabilitat econòmica de la implantació dels sistemes d'estalvi té gran importància que la seua dimensió siga el més ajustat possible a l'ús que es fa d'ells en l'edifici. Per això, s'ha fet un estudi del dimensionat òptim i econòmic dels sistemes d'aprofitament d'aigües pluvials.

Igualment s'ha estudiat de forma teòrica la capacitat de generació d'aigua de condensació dels sistemes de climatització, per al seu aprofitament en les instal·lacions de subministrament d'aigua. La dita informació s'utilitza per al dimensionat dels equips d'eixe sistema de hidroeficiència. Com no hi havia informació contrastada sobre la validesa del mètode teòric, s'han realitzat mesuraments per a contrastar-los.

Amb tot, en la tesi que es presenta s'han realitzat els mesuraments, estudis, anàlisi i caracterització d'equips necessaris perquè es dispose d'una metodologia completa per a la selecció multicriterio dels sistemes de hidroeficiència més adequats per a equipar un determinat edifici.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1. JUSTIFICACIÓN. ESTADO DEL ARTE

---

El agua líquida es, junto con la energía, uno de los elementos fundamentales para la existencia de la vida. "Se puede decir categóricamente que un planeta habitable debe tener grandes cantidades de agua líquida" (Dole, 1964).

El planeta en que nos ha tocado vivir dispone de grandes cantidades de agua líquida. Aproximadamente el 70% de la superficie del planeta es agua líquida (USGS, 2015). El volumen total de agua en el planeta es aproximadamente de 1408,8 millones de km<sup>3</sup> (Shiklomanov's, 1993), lo que parece una cantidad suficientemente grande.

Sin embargo, sólo un 2,5% de esa cantidad es agua dulce. De ésta, aproximadamente un 30% es agua subterránea, para cuya obtención hay que disponer de medios mecánicos de extracción. Sólo un 0,25% del agua dulce del planeta es agua superficial que se encuentra en ríos y lagos, un 0,00625% del agua total del planeta.

Sí, la Tierra es un planeta con abundante agua, pero la parte que puede ser destinada al consumo humano, en todas sus formas, de una forma asequible es una ínfima parte, que además hay que preservar.

Las Naciones Unidas, a través de su Resolución 2200A (XXI) (UN, 1966) y posteriormente en la Observación General 15 (UN, 2002) proclaman el derecho al agua potable como fundamental para la dignidad del ser humano. Los estados harán por garantizar el acceso suficiente, seguro, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico del agua para las personas.

A la escasez de recursos de agua dulce se une la necesidad de garantizar su acceso a todo ser humano, lo que supone un reto social y tecnológico en las actuales condiciones de cambio climático.

Sin embargo, existe un amplio margen de mejora de la eficiencia. En todo Europa se desperdicia, por ineficiencia, el 20% del agua disponible, y es posible reducir el consumo en los edificios hasta en un 30% (Dworak et al., 2007). La propia Comisión Europea insta a los estados miembros a mejorar su eficiencia hídrica (Comisión Europea, 2008) estableciendo el ahorro de agua como una prioridad que deben asumir los estados.

La situación de disponibilidad de recursos hídricos en España es especialmente mala. España es el país más árido de la Unión Europea y recibe un 15% menos de aportaciones por lluvia que la media, con unos niveles de evapotranspiración mucho mayores (MMA, 2000).

Aunque el ámbito de aplicación de este trabajo de investigación no se ciñe a la Comunitat Valenciana, por estar desarrollado desde su influencia geográfica, hay que hacer notar lo que sucede en ella.

Los datos en la serie temporal desde 1980-2009 señalan que las aportaciones de agua, en la demarcación geográfica de la Confederación Hidrográfica del Júcar, debidas a las escorrentías, a la reutilización, a la desalación, y a los trasvases es de 2301,9 Hm<sup>3</sup> (MAGRAMA, 2014). De éstas 50,6 Hm<sup>3</sup> se corresponden con trasvases desde cuencas limítrofes. Son aguas superficiales que se encuentran disponibles en ríos, o lagos.

Las demandas, en la misma serie temporal, muestran que el consumo urbano, agrícola, industrial y recreativo es de 3171,5 Hm<sup>3</sup> (MAGRAMA, 2014). Esta demanda se reparte de forma muy desigual: un 79,7 % se corresponde con consumo agrícola; un 17,3% es de uso urbano; un 2,6% es uso industrial, y el 0,4% restante es de uso recreativo.

La demanda es superior a las aportaciones. El déficit se compensa por la explotación y sobreexplotación de los acuíferos. Aguas subterráneas de muy difícil y costosa obtención.

Se está utilizando parte de las reservas existentes en los acuíferos subterráneos para compensar un exceso de demanda del 27% con respecto a las aportaciones superficiales.

Si bien la mayor parte de la demanda se produce en el uso agrícola, y es hacia donde debería destinarse la mayor parte de los esfuerzos en el uso racional de los recursos hídricos, no cabe duda que una reducción del consumo en cualquier otra actividad conduce a un equilibrio en el balance hídrico de la cuenca

Las expectativas de los planes de cuenca es que en el horizonte hasta 2020, se reduzca la demanda de agua agraria en la Comunitat Valenciana en un 7% debido a la implantación de medidas de eficiencia en el riego.

Igualmente, si se consiguiera obtener el 30% de ahorro en la demanda urbana de agua, que es el margen de mejora que propone la Comisión Europea, se estaría reduciendo la demanda de agua en otro 5% en la Comunitat. Se pasaría a un déficit de sólo el 15%, que se puede cubrir con aguas subterráneas no sobreexplotadas.

A este déficit de recursos se le puede hacer frente desde dos perspectivas. En primer lugar se considera una aproximación al problema desde el lado de aumentar la oferta de recursos hídricos disponibles, lo que se denomina gestión de la oferta. Por otro lado, existe la posibilidad de reducir las demandas hasta los niveles que equilibren totalmente ésta con la oferta. Es lo que se denomina gestión de la demanda.

Ambas dos aproximaciones tienen sus ventajas e inconvenientes, y deben ser analizadas.

La gestión de la oferta ha pasado tradicionalmente por aumentar las posibilidades de almacenamiento de las escorrentías naturales. La política de construcción de embalses para su aprovechamiento en abastecimiento de agua fue prolífica en tiempos pasados. Sin embargo, los regímenes pluviométricos tienen tendencia a reducirse, y su distribución es muy dispar en la Península Ibérica. Si bien las precipitaciones medias son del orden de 700 mm anuales en el norte de España, en las zonas más áridas, Almería por ejemplo, la media anual puede no llegar a los 200 mm anuales (MMA, 2000). Sin embargo, la distribución de demandas no sigue la misma tendencia.

Con los embalses existentes se cubre la demanda de las zonas húmedas, mientras que la demanda de las zonas áridas no es cubierta con el régimen de precipitaciones, con lo que no tiene mucho sentido construir grandes embalses para un agua que no va a llegar.

Así pues la gestión de la oferta, hoy en día se centra en tres aspectos: el trasvase de agua de zonas húmedas hacia zonas secas, la reutilización de aguas depuradas para riego, y la desalación.

En España el volumen de agua reutilizada en 2006 alcanzó los 368 hm<sup>3</sup> anuales (MMA, 2010). Por su parte, en el año 2004, se desalaban en España 400 Hm<sup>3</sup> anuales (INE, 2008) y la expectativa era llegar en 2009 a los 1200 Hm<sup>3</sup>. Los datos actuales son confusos, por cuanto que hay muchas desaladoras construidas, con capacidad de producción, pero total o parcialmente paradas. Actualmente, no es una prioridad para la administración su puesta en funcionamiento, lo que evidencia uno de los problemas principales de las medidas de gestión de la oferta: la dependencia para su implantación de criterios más políticos que técnicos.

Aunque la tecnología de desalación ha mejorado notablemente en los últimos años gracias al desarrollo de mejores membranas de osmosis inversa, a la recuperación energética en el proceso, y a la utilización de variadores de velocidad en las bombas, su coste sigue siendo elevado. Se pueden conseguir consumos de 1,8kWh/m<sup>3</sup> de agua desalada (Peñate y García-Rodríguez, 2012) muy inferiores a los 40 kWh/m<sup>3</sup> consumidos en las primeras plantas de desalación, pero excesivo para un uso agrícola.

La distribución del agua desalada es complicada. Las redes de distribución están generalmente diseñadas para captar el agua tierra adentro de los núcleos de población costeros. Las desaladoras se localizan cerca de la costa, y distribuyen su producción hacia el interior. Las conducciones que requieren mayor capacidad se localizan donde

las redes tienen las de menor capacidad. Su adaptación supone un coste adicional al sistema.

La política de trasvases es fuente de continuas disputas entre administraciones autonómicas, y cambia con los diferentes gobiernos nacionales, que utilizan este argumento como elemento de disputa política. Hasta tal punto llega la disputa que en su día se modificó el plan hidrológico nacional aprobado en el año 2001 (ESPAÑA, 2001), para anular la parte referida al trasvase del Ebro-Júcar (ESPAÑA, 2005) al cambiar el gobierno de la nación.

En general, las políticas de gestión de la oferta requieren de la construcción de nuevas infraestructuras, promovidas por la administración, a través de los organismos de cuenca o de las empresas públicas de gestión del agua.

Desde la trasposición a la legislación española (ESPAÑA, 2003b) de la Directiva Europea Marco del Agua (Unión Europea, 2000) el coste de las infraestructuras hidráulicas debe ser repercutido directamente en la tarifa del recurso. Las medidas de gestión de la oferta suponen, todas ellas, un coste de inversión adicional, coste que debe ser transmitido a la tarifa, pero que no todos los usuarios están dispuestos a asumir.

Además, el aumento de la oferta supone que el usuario final paga más por el servicio de suministro de agua que recibe. El suministro de agua lo gestionan las administraciones locales o metropolitanas, bien a través de empresas o entidades públicas propias, por empresas privadas en régimen de concesión, o por entidades mixtas.

En cualquier caso, cuanto mayor es la oferta, más ingresos recibe quien gestiona la distribución. Si no se repercutiera la amortización de las infraestructuras en la tarifa, como ha sucedido hasta el año 2003 en España, las infraestructuras se costearían vía impuestos públicos, cuando no de fondos europeos, pero los ingresos repercutirían en las empresas. El interés de la administración gestora del suministro de agua es evidente. Con la entrada en vigor de la directiva europea del Agua, la gestión de la oferta ya no resulta tan interesante.

Las recomendaciones de la Unión Europea en materia de gestión de sequías (Comisión Europea, 2008) van en la línea de implantar las medidas de aumento de la oferta una vez que se han aplicado todas las medidas para conseguir el ahorro de agua.

Por estos motivos, y otros más, el éxito de la implantación en estos últimos años de las medidas de gestión de la oferta no ha sido elevado.

De otro lado están las medidas de gestión de la demanda. El déficit hídrico se cubre reduciendo el consumo de agua hasta igualar a las aportaciones. La mayor parte de la demanda de agua se destina al regadío. La mejora en la eficiencia del regadío es lo que más influye en la correcta administración del recurso, pero no es objeto de este trabajo de investigación.

Al consumo agrícola le sigue en volumen el consumo urbano en edificios, que es donde este trabajo de investigación se va a desarrollar.

A diferencia de las medidas de gestión de la oferta, cuando la gestión de la demanda supone la realización de una inversión, es el usuario quien la realiza. La rentabilidad económica, junto a otros factores también importantes para el usuario, es la que decide acometer o no la inversión.

Pero la gestión de la demanda no solo implica la realización de inversiones para conseguir el ahorro de agua. En general, dentro de lo que se consideran medidas de gestión de la demanda se pueden distinguir las denominadas medidas activas y las medidas pasivas.

Las medidas activas de gestión de la demanda son aquellas en las que es la actitud participativa del usuario o del gestor de la instalación la que motiva el ahorro de agua. En este grupo de medidas estaría la concienciación ciudadana, las políticas de tarifas, el incentivo al usuario, las medidas del consumo, etc.

Son medidas pasivas de gestión de la demanda aquellas medidas en las que el ahorro de agua se consigue incluso sin la intervención consciente del usuario en ello. En este grupo estarían básicamente las medidas tecnológicas destinadas a suministrar agua al usuario, manteniendo el grado de confort, pero con un menor volumen consumido.

Las medidas activas tienen un importante componente de comportamiento humano. Hay personas más propicias a desarrollar conductas relacionadas con el ahorro que otras. Las medidas activas van destinadas a aumentar el número de éstas y a mejorar sus conductas con respecto al ahorro de agua. En el estudio sobre 1600 hogares en Devon (UK) (Gilg y Barr, 2006) se estableció que el perfil del ahorrador es una persona de cierta edad, mujer, que habita en una casa relativamente pequeña de la que es propietario de tipo adosado (aunque esta tipología es más popular en Inglaterra y no necesariamente va asociada a un mayor nivel económico), con un nivel de ingresos medio, con formación universitaria, votantes de partidos ecologistas o liberales, y perteneciente a alguna asociación vecinal. En el estudio de Gilg el porcentaje de población que cumplía parcialmente con este perfil está en el 56% de la muestra. Hay por tanto, un 44% de la población que no tiene un claro perfil ahorrador.

En el comportamiento de las personas, estén más o menos predispuestas al ahorro según su perfil social, hay una serie de factores que les afecta.

El primero de ellos es la climatología (Arbués et al., 2003). El consumo de agua tiende a ser mayor en zonas cálidas que en zonas frías. Incluso dentro de una misma zona climática, el consumo es mayor en los periodos de estío que en los invernales. En zonas de elevada precipitación el consumo de agua tiende a ser menor.

Otro de los factores a tener en cuenta es la tarifa. Su comportamiento presenta una gran variabilidad de unos estudios a otros. Algunos de ellos (Worthington y Hoffman, 2008) (Bruvold, 1990) indican que apenas si hay variabilidad los precios del agua. Según Bruvold, los precios son tan bajos que apenas si hay influencia de la tarifa en la demanda. Otros estudios, por el contrario, sí que encuentran cierta variabilidad con la tarifa (Campbel et al., 2004). En su estudio sobre 19000 hogares han encontrado que un aumento de la tarifa del 10%, en el rango de los 0,14\$, produce una reducción del consumo del 2,7%.

La estructura de la tarifa es otro de los factores que influyen en la demanda. Se considera que una tarifa tiene una estructura cuando el precio unitario del agua consumida varía por bloques de consumo en función del volumen total consumido. Cuanto mayor es el volumen consumido más alto es el bloque al que se paga el m<sup>3</sup> de agua.

En el estudio realizado sobre los consumidores de la ciudad de Granada (Pérez-Urdiales et al., 2014), establece la comparación de la demanda al pasar de 5 bloques de tarifa a 4. Los 5 bloques son los comprendidos entre 0 y 8 m<sup>3</sup>/mensuales, entre 8 y 10, entre 10 y 16, entre 16 y 30, o mayores que 30. Los 4 bloques resultantes pasan a ser de 0 a 2 m<sup>3</sup>/mensuales, de 2-10, 10 a 18, o mayor que 18. En su estudio observa como no hay un cambio en la demanda para los dos niveles de consumo más bajos, lo que representa un 33% de la población muestreada. Se justifica por el desconocimiento que tiene el usuario del bloque de consumo en el cual se mueve.

Otros estudios (Dalhusien et al., 2003) indican que cuanto más alto es el bloque de tarifa, mayor influencia tiene un aumento del precio en el ahorro de agua.

La aprobación de normativa, reglamentación, u ordenanzas específicas sobre medidas de ahorro de agua en los edificios tiene también cierto impacto en la demanda. Según (Campbel et al., 2004) la reducción en la demanda que se puede obtener es de un 3,5%.

Son muchas las administraciones que más bien motivadas por épocas de sequía han aprobado este tipo de normativas. La administración nacional a través del Código Técnico de la Edificación, en su documento DB-HS4 (ESPAÑA, 2006a), que obliga a

que en todos los edificios públicos se implanten dispositivos temporizados de ahorro de agua. Las administraciones autonómicas también han promovido normativas que afectan tanto a edificios de viviendas, como a edificios de pública concurrencia, o industriales (ESPAÑA, 2006), o a algunas tipologías de edificios particularmente consumidores como son los hoteles, independientemente de cuanto consumen (Junta de Andalucía, 2004). En algunos casos, la reglamentación no es una obligatoriedad sino un incentivo para los usuarios, o para los propios fabricantes de los dispositivos hidrosanitarios, para hacerlos más eficientes (Generalitat Catalunya, 2009).

Las administraciones locales también han regulado para proponer medidas de ahorro de agua. Uno de los primeros en hacerlo fue el Ayuntamiento de Alcobendas (ALCOBENDAS, 2001), al que han seguido muchos otros (Ayuntamiento de Madrid, 2006).

Las medias de educación y divulgación también favorecen el ahorro de agua. Sin embargo, para que su eficacia sea significativa, deben ser capaces de implicar al usuario. En el estudio llevado a cabo por Campbell (Campbell et al., 2004), se realizó una campaña de distribución de folletos sobre ahorro de agua de una manera indiscriminada. Los resultados en el ahorro de agua no se percibieron. Más tarde se llevó a cabo una nueva campaña en la que el usuario llevaba a cabo una serie de medidas de ahorro sugeridas, y debía devolver un cuestionario sobre los ahorros logrados. Entre las personas que respondieron al cuestionario se observaron ahorros del 1,8%, mientras que en aquellos que no respondieron al cuestionario no se observó ahorro. Cuando estos programas de divulgación se han combinado con medidas de descuento para la instalación de dispositivos de ahorro, éstos han subido hasta el 6%. Cuando la medida activa ha implicado al usuario la medida ha tenido efecto favorable. Según Maggioni (2015) otros factores que influyen en el comportamiento hacia la demanda de agua de las personas son:

- Propiedad de la vivienda
- Tamaño de la vivienda
- Tamaño del jardín
- Envergadura de la empresa o entidad suministradora de agua

Según Maggioni, las entidades encargadas de la gestión del agua deberían tomar una serie de medidas para fomentar su ahorro:

- Implementar regulaciones al consumo hasta conseguir que los ahorros sean "indiscutibles"
- Mejorar las políticas de precios con estructuras más sofisticadas

- Apoyar sólo los sistemas de eficiencia que sean más eficientes e invertir sólo donde se esperen obtener ahorros de agua sustanciales
- Apoyar a las entidades de suministro más pequeñas para que implanten medidas que fomenten el cambio de hábitos de sus clientes.

Es importante hacer notar la tercera de las medidas que propone Maggioni, por cuanto este trabajo de investigación va a seguir esa línea. De cara a destinar recursos para la implantación de sistemas de eficiencia, lo que en este documento se denominan sistemas de hidroeficiencia, hay que hacerlo sólo sobre los más eficientes. Luego la clave, como más adelante se indicará, es establecer cuáles son esos sistemas más eficientes.

Como se ha indicado, las medidas pasivas son actuaciones de carácter tecnológico e ingenieril que se llevan a cabo sobre la instalación de suministro de agua o sobre el conjunto del edificio, de tal manera que generan ahorro por sí mismas. Lo más habitual es la implantación de dispositivos o sistemas de hidroeficiencia que cubran suficientemente las necesidades de agua que el usuario demanda, pero consumiendo menor volumen.

Estos dispositivos o sistemas pueden consistir en equipos que reducen el caudal aportado, como por ejemplo los aireadores, o los reductores de caudal de ducha. También puede ser equipos que reducen el volumen de agua consumido por el usuario, como por ejemplo los inodoros de pequeña descarga, o las lavadoras de alta eficiencia. O pueden ser sistemas que aportan agua de forma alternativa para no tener que ser consumida desde la red general de distribución, como son los sistemas de reutilización de aguas usadas, o los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales.

En comparación con las medidas activas, la eficacia de las medidas pasivas presenta una gran variabilidad. Según Zadeh (2014) y basándose en datos semi-empíricos de su estudio en el Reino Unido, en edificios de viviendas se logran mayores ahorros con las medidas pasivas que con las medidas activas. Sin embargo, el comportamiento es al revés para los edificios de oficinas. Por su parte Kenney (2008) en un estudio realizado en Colorado demuestra que la combinación de una política de precios, restricciones al consumo, e información de las demandas en tiempo real generan mayores ahorros que las medidas tecnológicas aplicadas a duchas, inodoros, y al riego exterior en viviendas unifamiliares. Si bien no establece qué tipo de medida es más ahorradora de agua (Olmstead y Stavins, 2009) sí que indica que es más rentable acometer medidas de precios al consumo que medidas de implantación de dispositivos de ahorro.

Lo que sucede es que, como apunta Maggioni (2015), la tarifa debe servir como elemento que modifica el comportamiento de los consumidores, y como elemento para mejorar la viabilidad económica de los dispositivos de ahorro de agua.

En cualquier caso, los dispositivos y sistemas no deben suponer una reducción del confort para el consumidor de agua por cuanto se puede conseguir el efecto contrario. No sirve reducir el volumen de descarga de un inodoro, por ejemplo incorporando bolsas en el interior de la cisterna, o regulando el grifo de descarga, si no se modifica el diseño de la taza para adaptarse al nuevo volumen de descarga. El efecto que se consigue puede ser contrario a una reducción del consumo, por cuanto la falta de limpieza en el inodoro obliga a un mayor número descargas (Henderson, 2000). Igualmente puede suceder si se reduce la presión en un grifo, mediante la introducción de una válvula reguladora de caudal, y no se modifica el diseño del mismo para adaptarse a las nuevas condiciones. La falta de caudal, no compensada con otras medidas de diseño del dispositivo, hace que los usuarios aumenten la duración de cada uso, con lo que los ahorros que se logran resultan negativos (Brown et al., 2014). En general, cuando se utilizan dispositivos o sistema de ahorro de agua, diseñados a tal efecto, la sensación de confort del usuario se mantiene (Lee y Tansel, 2013).

Las primeras experiencias en la implantación de sistemas de ahorro de agua en edificios de forma integral se realizaron en Arizona (EEUU). Se desarrollaron dos experiencias piloto en sendas viviendas aisladas denominadas “Casa del Agua” y “Desert House”. La Casa del Agua (Karpiscak, 1993) (France, 1989) fue construida en 1986 y funcionó como edificio de demostración hasta 1999. Disponía de un sistema de recogida de aguas pluviales, un sistema de reutilización de aguas grises, inodoros de bajo consumo, reductores de caudal en duchas, y lavabos con aireadores, y se aplicaron medidas de xerojardinería para plantar especies autóctonas. Durante los 13 años de funcionamiento de la Casa se lograron reducciones del consumo del 47% desde la red general de distribución. La Desert House (Brittain et al., 1994) se construyó en 1993 como residencia experimental, totalmente monitorizada. Cuenta con sistemas de reutilización de aguas grises y de aprovechamiento de agua de lluvia, así como dispositivos de bajo consumo.

Desde entonces, muchos han sido los estudios e investigaciones llevadas a cabo para analizar los potenciales y reales ahorros que se pueden obtener con la implantación de sistemas de hidroeficiencia. La mayoría de ellos se han realizado sobre edificios de viviendas porque, siendo más numerosos que otros, presentan más posibilidades de ahorro global. En ese grupo de otros edificios, hay estudios realizados sobre edificios de oficinas (Zadeh et al., 2014) en los que se indican que los ahorros que se pueden obtener con la incorporación de medidas pasivas de carácter tecnológico pueden llegar

al 64% con consumos de 10 l/hab/día, muy por debajo de los ahorros que se pueden obtener en edificios de viviendas.

Los ahorros que se consiguen en los edificios de viviendas son muy dispares según el tipo de tecnología de bajo consumo que se implanta, y la zona geográfica y climática donde se ubica el edificio.

En el estudio de Kenney (2008) los ahorros conseguidos han sido de 10% para inodoros, 8% para duchas y 11% para riego exterior. Los ahorros no siempre se mantienen en el tiempo, por ejemplo Lee (2013) obtiene unos ahorros por equipos similares a los planteados durante los dos primeros años de su estudio. Sin embargo, en los dos años siguientes los ahorros apenas si fueron significativos, lo que indica una cierta influencia del comportamiento en los ahorros de carácter tecnológico.

Hay una gran variación con el tipo de dispositivo. Los equipos con mejor calificación ecológica obtienen ahorros mucho mayores que los de menor calificación. En lavadoras, de un buen equipo a un equipo normal se pueden mejorar los ahorros en un 29% (Beal et al., 2012), y en duchas de una grifería de máxima calificación a otra de calificación normal se puede mejorar un 79%. De ahí que algunas administraciones hayan incorporado requisitos de diseño ecológico a algunos productos (ESPAÑA, 2011) (Comisión Europea, 2009)

Mayor influencia tienen los sistemas de tipo fuente alternativa. En Holanda, Agudelo-Vera (2013) analizó el potencial de suministro de los sistemas de aprovechamiento de pluviales y de reutilización de aguas grises. Con las aguas pluviales, en esa zona geográfica, se podría abastecer el 60% del consumo total de una vivienda, y si en ésta se incorporan dispositivos de bajo consumo se podría llegar al 80%. Por su parte, con un sistema de reutilización de aguas grises se podría atender el 100% del consumo secundario, el que no requiere de condiciones hidrosanitarias, que considera el 36% del total, valores muy similares a los conseguidos en otros casos (Mourad, 2011).

En Sant Cugat del Vallés, cerca de Barcelona, donde la normativa municipal obliga a disponer de sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales en las nuevas edificaciones, se han calculado ahorros potenciales del 16% de la demanda total (Domenech y Saurí, 2011). Sin embargo los ahorros reales son menores porque la capacidad instalada de los depósitos es pequeña. Se evidencia un problema de este tipo de equipos. Los periodos de retorno de la inversión, para los equipos analizados, están entre 33 y 43 años, con una tarifa de 3,23 €/m<sup>3</sup>. Serán mayores si la tarifa es más baja. En Brasil, con otro régimen de lluvias completamente distinto, los estudios evidencian reducciones del consumo de hasta el 79% (Ghisi et al., 2007).

La tipología de edificio también influye en la capacidad de aprovechamiento de lluvia. Se tiene que tratar de edificios con mucha superficie de captación para un consumo relativamente pequeño. Así los edificios más favorables para el aprovechamiento de pluviales (Belmeziti et al., 2013) son las viviendas unifamiliares, los colegios de primaria y secundaria, y los edificios de pública concurrencia.

Con tan grandes periodos de retorno se hace necesario un correcto dimensionado de los sistemas de aprovechamiento de lluvia y que éste dimensionado se haga con la información más fiable posible. De no ser así, los errores en el cálculo de la viabilidad de un sistema puede llevar a que indique que el sistema genera ahorros, cuando en realidad no los produce (Roebuck, 2011).

La problemática de los sistemas de aprovechamiento de lluvia se puede extender a los sistemas de reutilización de aguas grises (Mourad, 2011) donde los periodos de retorno están entre los 7 años para sistemas de filtrado por lagunaje o hasta 52 años para sistemas compactos con bio-filtración.

El ahorro de agua en muchos de estos sistemas supone además un ahorro de energía, tanto en bombeo como térmica, y la consiguiente reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Fidar e al., 2010), aspecto éste que es importante que se tenga en cuenta a la hora de analizar los sistemas de hidroeficiencia.

A la vista de los análisis, resultados, y conclusiones de algunos de estos trabajos previos consultados, se pone de manifiesto toda una problemática en torno a los sistema de hidroeficiencia, su validez y valoración.

Desde este trabajo de investigación se pretende dar respuesta a algunas de las cuestiones planteadas.

## **2. OBJETIVO**

---

Se ha evidenciado que existe un déficit de recursos hídricos, que lejos de reducirse se va a ver incrementado en el futuro debido al cambio climático. Esa falta de recursos hídricos se traduce en un desajuste entre la oferta y la demanda.

Se ha puesto de manifiesto que, aunque las actuaciones para aumentar la demanda son factibles, es conveniente, desde muchos puntos de vista, que sean llevadas a cabo después de haber implantado todas las medidas para la mejora de la eficiencia en el consumo que sean posibles.

En este sentido, este trabajo de investigación se va a centrar en las medidas de gestión de la demanda. Hay dos formas de aproximarse a las soluciones al problema de la gestión de la demanda.

Por un lado están las medidas cuya finalidad es el cambio de hábitos o de comportamiento del usuario, de tal forma que sea éste el que de forma activa, mediante su intervención, reduzca la demanda de agua.

En el otro lado están las medidas de carácter tecnológico, medidas de ingeniería para algunos, en las que se actúa sobre los elementos que suministran agua de consumo al edificio, de tal forma que la demanda de éste se reduzca.

Este documento, un trabajo de investigación, aborda el problema del déficit de recursos hídricos desde esta perspectiva.

En el análisis efectuado sobre la situación actual se han expuesto algunos estudios que ponen de relieve los ahorros que se pueden llegar a obtener con la incorporación de dispositivos o sistemas de eficiencia de agua.

Algunos de estos estudios tratan sobre dispositivos que reducen los caudales suministrados. Otros, en cambio, aprovechan las aguas de lluvia, o las aguas usadas, para volver a ser utilizadas y con ello reducir la demanda desde las redes generales de distribución, y con ello el consumo del recurso.

Se ha evidenciado que los ahorros que se obtienen con cada uno de los sistemas son diferentes según el tipo de edificio, el uso que se hace de él, el emplazamiento donde se ubica, etc. Igualmente los costes de implantar cada uno de estos sistemas son distintos.

Igualmente se ha indicado que las acciones para mejorar la eficiencia en la demanda de agua incorporando, entre otras medidas, dispositivos y sistemas de eficiencia en su consumo, se deben focalizar en aquellos que mayores ahorros produzcan. En definitiva, implantar sólo los sistemas de hidroeficiencia que mejor se comporten.

A la vista de todo esto, cabe preguntarse algunas cuestiones, no resueltas en ninguno de los estudios revisados.

- ¿Cuál es, de entre los numerosos sistemas de hidroeficiencia que existen, el mejor?
- Si existiera ese mejor sistema ¿Lo sería para todos los edificios?
- ¿Con el tiempo, y el desarrollo de nuevas tecnologías, ese sistema sería siendo el mejor?

Este trabajo de investigación se plantea como respuesta a éstas, y otras preguntas.

Así, el objetivo general del trabajo de investigación es desarrollar una metodología para poder determinar el mejor, o mejores, sistema de hidroeficiencia que debe

implantarse en un determinado edificio, según sus características tipológicas y de uso, y en base a una serie de características de comportamiento de los sistemas.

Para lograr este objetivo general es preciso desarrollar otros mucho más específicos:

- Definir las características de comportamiento que deben tener los sistemas de hidroeficiencia para que puedan ser evaluados. Y la evaluación debe ser realizada desde todos los puntos de vista que el usuario puede considerar a la hora de seleccionar un equipo, y no sólo desde el punto de vista del ahorro de agua. Es decir, aspectos como el coste, la durabilidad, la instalación, y otros muchos, deben ser tenidos en cuenta.
- Definir una forma de valoración de cada uno de estos aspectos. Esta definición debe permitir valorar todos los sistemas, de forma equitativa, de tal forma que después puedan ser comparados en las mismas condiciones.
- Dimensionar los sistemas de hidroeficiencia para las condiciones del edificio en cuestión. Dimensionar de manera óptima, cuando se pueda, o adecuada, para el resto de casos, los equipos que forman parte de los sistemas de hidroeficiencia del edificio. Con ello se busca adaptar el equipo para su aplicación, evitando sobrecostes de inversión y operación ineficiente, que penalicen a un equipo en el proceso de selección.
- Analizar los sistemas de hidroeficiencia en los casos en que no existe información suficiente para poder desarrollar el dimensionado de sus equipos.
- Establecer un método para la obtención de la información necesaria para el correcto dimensionado de equipos. Es lo que se hace con los sistemas de aprovechamiento de condensados. Se analiza una instalación real para obtener los parámetros que permitan determinar posteriormente el volumen de condensación que permita dimensionar los equipos.

### **3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

---

Para lograr los objetivos marcados, el documento se ha estructurado en una serie de capítulos. Los capítulos se estructuran siguiendo una secuencia desde al análisis de los diferentes sistemas de hidroeficiencia que existen, hasta finalizar con el procedimiento de elección entre los mismos.

Este primer capítulo es puramente introductorio a la situación actual de déficit hídrico que existe a nivel global, se establece la naturaleza del problema, y se plantean los objetivos a los que se va a dar solución a lo largo del documento.

En el segundo capítulo denominado “Demanda de agua en edificios” se presentan y analizan diversos estudios, propios y externos, sobre la forma que tienen los usuarios de consumir el agua en los edificios.

Se analizan algunos patrones de consumo, frecuencia y duración de cada uso, para edificios de tipo doméstico. Se especifica el patrón para cada tipo de aparato sanitario del edificio, distinguiendo entre diferentes tipologías de edificación.

Posteriormente se presentan algunos estudios sobre los valores de demanda total en el edificio, aplicando a los patrones de consumos en cada aparato el caudal suministrado desde el mismo.

La información de los patrones es importante cuando se trabajan los hábitos de demanda. La información sobre los valores de demanda total son fundamentales para realizar cualquier valoración sobre los ahorros logrados con la implantación de los sistemas de hidroeficiencia.

Finalmente se indica cómo realizar una auditoría del consumo de agua de un edificio, en caso que no haya información disponible sobre la forma de consumo, y como paso previo al estudio de selección de los equipos.

En el capítulo tercero, denominado “Dispositivos y sistemas de ahorro de agua” se hace un repaso de las diferentes tecnologías para el ahorro de agua en edificios que existen a nivel comercial. En primer lugar se analizan los dispositivos de ahorro: aireadores, reductores y cabezales de ducha, inodoros de pequeña descarga, válvulas reductoras, grifos de doble apertura, grifos de apertura en frío. Para cada uno de ellos se analizan las ventajas e inconvenientes de su instalación, así como los potenciales ahorros que se pueden obtener.

También se analizan las fuentes alternativas de suministro: los sistemas de reutilización de aguas usadas, los sistemas de aprovechamiento de lluvia y, los sistemas de recuperación de condensados. El primero de estos sistemas se desarrolla de una manera más específica, mientras que los otros se tratan de forma resumida puesto que se les va a dedicar un capítulo específico.

Se indica cómo es la morfología de un sistema de recuperación de aguas usadas, las diferentes tecnologías existentes, y como se debe dimensionar.

El capítulo cuarto denominado “Sistema de aprovechamiento de Pluviales en edificación (SAP)” trata específicamente de este sistema de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa.

Se analizan los diferentes elementos que forman parte del sistema, indicando las características de cada uno de ellos. Se presentan diferentes morfologías de instalación, desde las más sencillas hasta las más sofisticadas y costosas.

Se indica cómo dimensionar los principales elementos: separador de primera lluvia, el depósito de almacenamiento, tanto desde el lado de la oferta como desde el de la demanda, así como las conducciones, y el sistema de bombeo.

El siguiente capítulo está dedicado a los sistemas de “Recuperación de condensados en sistemas de climatización”. En él se comienza haciendo un repaso a los diferentes sistemas de climatización que existen, dónde es posible generar condensación en cada uno de ellos, y las posibilidades técnicas que los limitan.

Posteriormente se indica cómo calcular, de forma genérica, el volumen de condensación de un sistema de climatización, para después particularizarlo a cada una de las morfologías.

Finalmente se presenta un estudio, desarrollado por el autor, sobre la producción real de condensados en una instalación, que sirve de comparación y contraste de los cálculos teóricos con los reales.

El capítulo finaliza indicando la morfología del sistema de recuperación de condensados, así como la forma de proceder a su dimensionado.

Llegados a este punto se ha cubierto el objetivo de establecer cómo realizar el dimensionado de cada uno de los equipos que pueden ser implantados en un edificio como consecuencia de una actuación de hidroeficiencia.

Se puede considerar que hasta este punto se ha presentado la información que se va a necesitar para realizar la selección del sistema de hidroeficiencia más adecuado para equipar el edificio. A partir de este punto se va a desarrollar el proceso de selección.

El capítulo seis está dedicado a la “Caracterización de los sistemas de ahorro de agua”. En él se establecen los criterios que se van a utilizar para la selección de los sistemas de hidroeficiencia: ahorro de agua, ahorro de energía, impacto socio-ambiental, diseño, y viabilidad económica.

Para el criterio de ahorro de agua se indica cómo determinar el ahorro absoluto de agua que produce cada sistema. Igualmente se define el indicador de ahorro de agua, y se indica cómo calcularlo.

Para el criterio de ahorro de energía se establece cómo calcular el ahorro de energía por calentamiento y por bombeo asociado a cada sistema de hidroeficiencia, teniendo en cuenta que en algunos de ellos el ahorro es negativo. Se define el indicador de ahorro de energía y se establece cómo determinarlo.

Para los criterios de impacto socio-ambiental y de diseño se establecen los factores a valorar para cada uno de los criterios, así como la forma de determinar el índice y el indicador de cada uno de ellos.

Finalmente para el criterio de viabilidad económica se hace un análisis de todos los ingresos que se obtienen, directos e indirectos, como consecuencia de la implantación del sistema de hidroeficiencia. Se analizan los costes derivados de dicha implantación, coste fijos y variables, y/o recurrentes o no-recurrentes. Con todo se establece como hacer la valoración de la viabilidad económica del sistema. Se define el indicador de viabilidad económica y se indica cómo calcularlo.

Con éste se logra el objetivo de caracterizar completamente el comportamiento de los sistemas de hidroeficiencia.

El capítulo siete es el corazón del trabajo de investigación. Se denomina "Valoración y selección de sistemas de ahorro de agua". En él se desarrollan los dos métodos que se proponen para la selección de los sistemas de ahorro de agua: método de coste-beneficio, y el método multicriterio.

La selección siguiendo el procedimiento de coste-beneficio se hace en base a los valores absolutos establecidos para cada uno de los criterios de selección. La selección mediante el método multicriterio se realiza en base a los indicadores de cada uno de los criterios de selección.

En el procedimiento del coste-beneficio se desarrollan implica el desarrollo de los métodos de valor equivalente, de la tasa interna de retorno, y del periodo de retorno de la inversión, particularizados a la selección de sistemas de ahorro de agua.

Para el método de selección multicriterio se va a utilizar el proceso analítico jerárquico, igualmente particularizado para los sistemas de ahorro de agua y sobre los criterios de selección con los que se trabaja.

Finalmente, se establece el procedimiento de priorización de alternativas y de selección de entre las posibles, teniendo en cuenta la influencia que la selección de un sistema tiene en los demás.

En el capítulo final de "Conclusiones" se indican las principales conclusiones obtenidos como consecuencia de la aplicación de la metodología desarrollada, así como las principales aportaciones del autor al trabajo de investigación y los desarrollos futuros que se pueden realizar a partir del mismo.



## 2. DEMANDA DE AGUA EN EDIFICIOS

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Analizar el ahorro en el consumo de un bien o servicio, es presentar dos situaciones de consumo diferentes y para compararlas entre sí. Del análisis se evidencia cuánto menos se consume en una situación, con respecto a la otra.

En el caso del ahorro de agua, cuando éste se obtiene mediante la implantación de sistemas de hidroeficiencia en los aparatos sanitarios que existen en un edificio, se está comparando una situación de consumo producida sin la utilización de dichos sistemas, y el estado de consumos una vez que los sistemas han sido incorporados.

En cualquier procedimiento de análisis y/o selección de sistemas de hidroeficiencia, el ahorro que se obtiene como consecuencia de la implantación de un determinado sistema es de prever, como más adelante se verá, que será uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta. Lo complejo del asunto es la propia cuantificación del ahorro obtenido.

Un análisis de la información técnico-comercial facilitada por los propios fabricantes de los sistemas de hidroeficiencia, o un estudio que se realice sobre el comportamiento de un aparato en concreto, puede presentar un resultado de ahorro que nada tiene que ver con la realidad.

En efecto, si midiendo el comportamiento de una grifería de bajo consumo, ésta presenta unas reducciones en el caudal suministrado de un determinado valor, ya sea en términos absolutos o en términos porcentuales, no se puede concluir, como en muchas ocasiones hacen de forma interesada los comercializadores de dicho producto, que el ahorro de agua real va a representar valores de volumen del mismo porcentaje.

En el volumen de agua ahorrado influirá la frecuencia y duración de los usos que se hacen de dicho aparato o sistema.

Para realizar un correcto análisis de los ahorros de agua que se pueden obtener mediante la aplicación de medidas de hidroeficiencia en un determinado edificio, no solo basta con conocer los caudales entregados, sino también es necesario conocer cómo se consume en dicho edificio.

Esa forma de consumir es lo que se considera como el patrón de consumo de un determinado aparato hidrosanitario.

Para la cuantificación de algunos de los parámetros de selección que se utilizarán más adelante es necesario conocer, con un cierto detalle, el patrón de consumos para la implantación que se está analizando, de cada aparato hidrosanitario.

Ahora bien, no es fácil disponer de esta información. Cuando se está seleccionado el sistema de hidroeficiencia más adecuado para una nueva implantación, el patrón de consumo de cada uno de los aparatos forma parte de las hipótesis que hay que realizar a la hora de concebir la instalación.

El patrón de consumos que se maneja en este caso debe provenir de la bibliografía existente, o de una extrapolación de intervenciones previas que se hayan realizado en edificios similares, si es el caso. Más adelante se van a proponer algunos datos obtenidos de la bibliografía.

Si no se dispone de información suficiente en la bibliografía, siempre queda la solución de realizar un estudio de consumos en edificios de la misma tipología, y extrapolar los resultados.

En este sentido, en el capítulo se van a presentar los resultados obtenidos de la realización de una serie de medidas de consumo doméstico de agua, tanto fría como agua caliente sanitaria (en adelante A.C.S.) realizadas por alumnos de diferentes titulaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

Si por el contrario, se está seleccionando un sistema para una implantación ya existente, por ejemplo para mejorar la eficiencia en el consumo de agua en un edificio que ya está funcionando, las opciones son más variadas.

Siempre es factible recurrir a la determinación de patrón de consumos mediante los métodos anteriormente comentados. Pero parece más afinado recurrir a conocer cómo está consumiendo el propio edificio sobre el que se va a hacer la actuación. Para ello se recurre a la realización de una auditoría del consumo de agua del edificio en cuestión.

La auditoría del consumo de agua consiste en medir, para cada aparato hidrosanitario del edificio en cuestión, cuánto caudal suministra, con qué frecuencia se utiliza y durante cuánto tiempo.

Implica disponer de equipos de medida, instalados durante un cierto periodo de tiempo, que registren una serie de datos. Posteriormente hay que procesar todos esos datos, abundantes en la mayoría de casos, para transformarlos en información útil.

A lo largo de este capítulo se va a indicar cómo realizar dicha auditoría.

El procedimiento de auditoría es largo y costoso de implementar. Si se quiere disponer de información fiable de la variabilidad de los consumos con la época del año en que se producen, es necesario extender las medidas en el tiempo para abarcar todos los periodos que se quieren verificar. Por ello, no siempre es rentable.

De ahí que, en ocasiones, e incluso tratándose de implantaciones en edificios existentes, se desestime y se recurra a la bibliografía o a la extrapolación de datos para conocer los patrones de consumo.

## **2. PATRONES DE CONSUMO DE AGUA**

---

Un mismo aparato hidrosanitario instalado en un edificio de tipo residencial o en un edificio de uso colectivo, y aun cuando suministrase el mismo caudal, no va a generar la misma demanda. La forma de utilizarse en uno y otro caso es distinta.

Los patrones de consumo van a ir asociados, para cada aparato, a una tipología y uso del edificio en cuestión. Edificaciones destinadas a usos distintos tendrán unos hábitos de consumo distintos en las personas que los ocupan.

Lo que se va a desarrollar a continuación es una clasificación y caracterización de cada uno de los patrones de consumo de agua en función de los diferentes usos a los que se somete un edificio.

Se pretende que la información aquí aportada sirva como referencia bibliográfica para el análisis y la selección de equipos que se planteará en los siguientes capítulos. Habrá que utilizar el patrón de consumo, de los expuestos, que más se ajuste al edificio objeto de estudio.

Cuando en el edificio coexisten varios usos, se caracteriza cada uno de ellos. El patrón de consumo global del edificio es la ponderación de los individuales según la fracción que el uso individual supone con respecto al conjunto del edificio.

### **2.1. PATRÓN DE CONSUMO DOMÉSTICO.**

---

Se corresponde con el patrón de consumo de los edificios de tipo “residencial vivienda”, independientemente de su tamaño. Tiene la principal característica que es el usuario de la vivienda quien paga la factura del agua potable consumida, y por tanto es el responsable directo de su gestión.

Es de prever que un aumento en los costes asociados al consumo de agua, bien a través del aumento de la tarifa o del aumento del volumen consumido, tenga una repercusión en una mejora de su gestión.

En este sentido es el propio usuario de la instalación el que puede tener interés en implementar una serie de medidas de hidroeficiencia. Pero también es quien acomete la inversión, por lo que buscará la rentabilidad final.

Como se verá en capítulos más adelante, la importancia que se le da a unos parámetros de selección frente a otros depende en alguna medida de cuestiones

como: quién hace frente a la factura de agua, o quién debe afrontar la inversión en sistemas de hidroeficiencia.

Para la caracterización del patrón de consumo doméstico de un determinado edificio hay que tomar en cuenta una serie de factores que le influyen.

En primer lugar hay que considerar la tipología de edificación. Son muchas las tipologías de edificación que existen. No se pretende definir un patrón tipo para cada una de ellas, pues la casuística es muy amplia. El análisis que se realiza es para indicar el hecho diferencial de las más características, a fin de que el técnico proyectista pueda disponer de unos criterios de caracterización para la tipología en cuestión que tiene que parametrizar.

Como tipologías características se consideran: la vivienda unifamiliar, que puede ser en medianera o exenta, y de primera o segunda residencia; y la vivienda plurifamiliar, en medianera o exenta, y de primera residencia o en apartamento de segunda residencia.

La vivienda unifamiliar de primera residencia exenta se corresponde, en general, con unos habitantes de nivel socioeconómico alto. El consumo por persona en este estrato social es en general alto, pero los porcentajes de demanda de cada uno de los aparatos no varían significativamente con respecto a otro tipo de viviendas unifamiliares (Opitz et al., 1999). La principal característica que distingue su patrón de consumo es que dispone de zonas ajardinadas, cuyo porcentaje de consumo es significativo con respecto a los demás. Además, es normal que disponga de lavavajillas, lo que también reduce el consumo en fregadero. Si dispone de piscina particular su llenado puede suponer un porcentaje importante del consumo durante los meses de verano.

La vivienda unifamiliar de primera residencia en medianera, adosada o pareada, no dispone de zonas ajardinadas tan extensas. Por tanto, el porcentaje de la demanda destinado al riego no es tan importante.

La vivienda unifamiliar de segunda residencia, tanto de tipo exento como en medianera, se caracteriza por una ocupación de tiempo libre, ya sea de fin de semana o de periodo vacacional. Si bien los caudales demandados pueden ser similares al equivalente de primera residencia, la frecuencia de uso es mucho menor, con lo cual su patrón de consumo es bien distinto.

En las segundas residencias de tipo exento, el consumo de agua para riego de zonas ajardinadas puede ser elevado aun cuando no haya ocupación de la vivienda.

En las viviendas multifamiliares se puede considerar una tipología de consumo más intensivo y otra de consumo semi-intensivo (Molina et al., 2004). El primero de los casos se corresponde de un edificio entre medianeras en el que no hay zonas

ajardinadas y por tanto todo el consumo de agua se produce en el interior de la vivienda. La tipología semi-intensiva se corresponde con el edificio multifamiliar exento que dispone una zona común ajardinada. El consumo en estas zonas no es gestionado por el usuario de la vivienda, que lo costea de forma indirecta repartido entre otros muchos usuarios. La característica del consumo de esta zona común tendría el mismo carácter que el de un edificio de uso colectivo.

Los edificios de viviendas multifamiliares tienen un desarrollo vertical, disponiendo en varias alturas. Según las características de la red general de distribución de agua potable, el suministro a las viviendas de cada una de las plantas puede ser en directo, para las plantas más bajas, o a través de grupo de bombeo, para las más altas. En cualquier caso, si bien no influye directamente en el patrón de consumo, sí que puede influir en la demanda de caudal la planta en la que se encuentra cada una de las viviendas.

Para las viviendas que son alimentadas en directo, o sea, con la propia presión de la red general, cuanto más elevada esté la vivienda menor altura piezométrica habrá disponible a la entrada de la vivienda. A igualdad de condiciones, las viviendas más bajas dispondrán de mayor presión que las más altas.

Para las viviendas que se alimentan de grupo de bombeo, si bien representan un escalón de presión diferente con respecto a las alimentadas en directo desde la red, sucede el mismo efecto entre plantas. Las viviendas más bajas alimentadas desde la bomba dispondrán de más presión que las más elevadas.

Más adelante, en este capítulo, se presentará un análisis de la influencia real que tiene en la demanda de caudal la planta en la que se encuentra una determinada vivienda.

Lo que sí que influye en el patrón de consumo es la edad de los habitantes que ocupan una determinada vivienda.

Por ejemplo, las personas mayores tienen una movilidad más reducida. No utilizan el baño y sí la ducha. Incluso ésta con menor frecuencia que personas más jóvenes, debido a la menor actividad física. En el otro lado están las parejas con hijos de corta edad. En este caso es más frecuente el baño, de los hijos, que las duchas. La frecuencia del baño es diaria, como mínimo.

Entre ambos casos hay toda una casuística. De cara a poder disponer de unos patrones de consumo fiables sería conveniente disponer de información disgregada por edades sobre los consumos domésticos. Esta información servirá de referencia para acometer las actuaciones de hidroeficiencia.

Aunque se disponga de los correspondientes patrones de consumo disgregados por edades, a la hora de acometer una actuación hay que analizar qué patrón es el que hay que aplicar, aunque sea por extrapolación.

En este sentido es el propio edificio el que aporta la información necesaria. Aunque son siempre datos que hay que contrastar, en general, los edificios de zonas urbanas consolidadas tienden a tener una población de mayor edad. Por el contrario, en las zonas de nueva expansión la población es más joven.

Otro factor que influye en el patrón de consumo son los hábitos de permanencia en la vivienda (Cubillo et al., 2008). Cuanto mayor es el periodo de ocupación de la vivienda, mayor será el consumo de agua que se produce en ella. La permanencia en la vivienda puede ser continua o puede ser estacional.

La permanencia continua en la vivienda depende de cuestiones como el número de ocupantes que están empleados, de si hay personas que se dedican a las tareas domésticas, de si hay ocupantes en edad escolar, etc.

La permanencia estacional depende de si los ocupantes disponen de una segunda residencia, o de si disfrutan de periodos vacacionales. Indirectamente estas cuestiones están relacionadas, como alguna otra que se comentará más adelante, con el nivel socio-económico de los ocupantes.

Otros factores a tener en cuenta a la hora de caracterizar los consumos son la antigüedad, la superficie de la vivienda y la disponibilidad de electrodomésticos que consumen agua (Cubillo et al., 2008).

Según Cubillo, la antigüedad del edificio no tiene apenas influencia en el consumo. Por el contrario, la superficie de la vivienda sí que lo tiene. Se observa que, para vivienda con más de 150 m<sup>2</sup> de superficie, sí que se produce un aumento significativo del consumo. Las viviendas con mayor superficie se corresponden con habitante cuyo nivel socio-económico es más alto. Indirectamente, este hecho refleja que el nivel socio-económico de los habitantes de un edificio sí que influye en su consumo de agua.

La disponibilidad en las viviendas de electrodomésticos que consumen agua, lavadoras y lavavajillas, lejos de aumentar el consumo lo reduce al evitar que se haga uso de otros aparatos hidrosanitarios, lavadero y fregadero, respectivamente.

Todos estos factores deben ser tenidos en cuenta en el caso que se quiera realizar un estudio previo para disponer de un patrón particularizado y específico de la implantación de hidroeficiencia que se va a desarrollar.

Como representación, a continuación se presentan algunos patrones de consumo doméstico, obtenidos de la bibliografía.

El primer caso que se presenta es el estudio realizado por la Generalitat de Catalunya sobre el consumo de agua en el área metropolitana de Barcelona (Molina et al., 2004).

El uso correspondiente a los aparatos sanitarios, por persona, para higiene personal: lavabo, ducha e inodoro, es el indicado en la Figura 2.1. En él se incluyen todos los aparatos de un mismo tipo que existen en la vivienda. Al tratarse de un hábito de tipo particular, se representan los usos por persona, independientemente de cuál es el aparato utilizado de la vivienda.

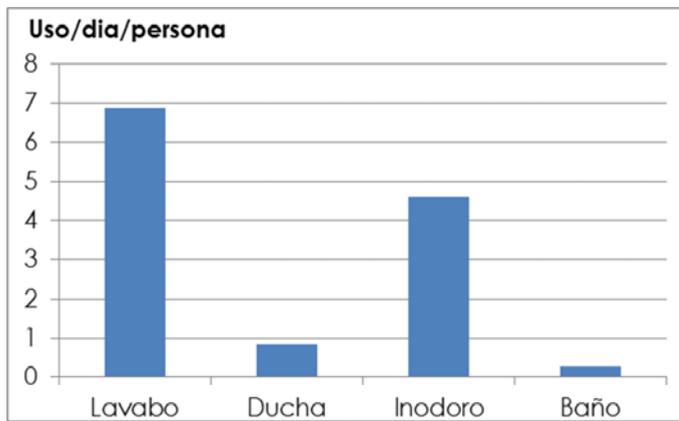


Figura 2.1. Frecuencia de uso de aparatos sanitarios doméstico (Molina et al., 2004)

Si bien para la cuantificación del ahorro no es influyente el número de aparatos de un mismo tipo en la vivienda, para el estudio de viabilidad de una implantación sí que lo es. Cuantos más aparatos existan de un mismo tipo, mayor será el coste de inversión pero el ahorro no se verá compensado. Será este un aspecto a tener en cuenta en su momento.

El uso correspondiente a los aparatos de higiene doméstica, menaje y ropa, es el que se indica en la Figura 2.2. Se trata de aparatos de uso común a todos los ocupantes de una vivienda, que no reflejan hábitos particulares, por lo que se considera el uso total, en lugar del uso por persona.

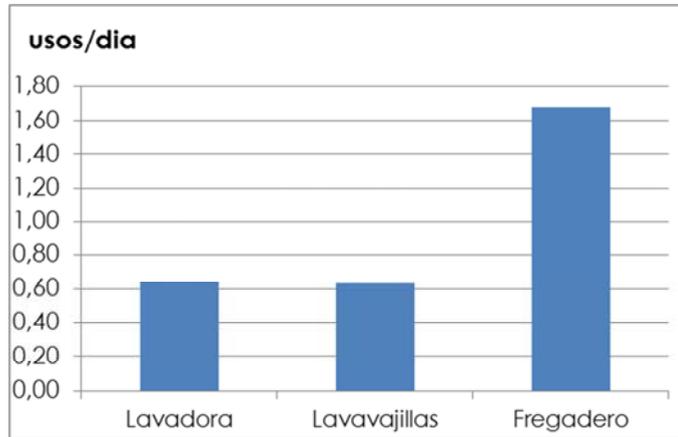


Figura 2.2. Frecuencia de uso de aparatos de limpieza (Molina et al., 2004)

Un segundo caso que se presenta se corresponde con el estudio realizado por la empresa pública que gestiona el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Madrid (Cubillo et al., 2008). El estudio se realizó en dos etapas. En una primera etapa se realizaron una serie de encuestas a los consumidores de viviendas elegidas aleatoriamente. En una segunda etapa se monitorizaron un número más reducido de viviendas representativas, elegidas a partir de los resultados de las encuestas de la etapa inicial.

En la Figura 2.3 se indican los patrones de consumo resultado de un análisis (Molina et al., 2004) de dicha información.

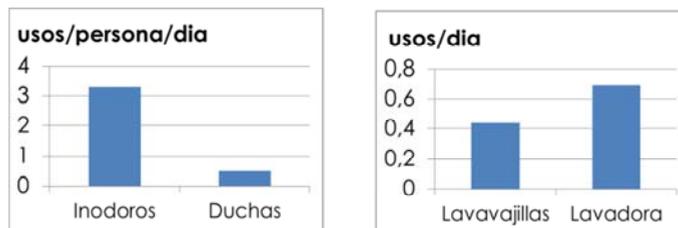


Figura 2.3. Patrones de consumo (Cubillo et al., 2008)

La información no es tan completa como en el primer caso presentado, pero es más fiable por cuanto está obtenida a partir de mediciones directas en las viviendas.

Un tercer caso que se presenta es el informe que bajo la denominación "Cuantificación de la exposición relacionada con diversos usos del agua para subpoblaciones en

Estados Unidos”, ha sido desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) del gobierno de los Estados Unidos (Wilkes et al., 2005).

En realidad, el objetivo del informe es valorar el riesgo que suponen los contaminantes de origen hídrico para las personas. Sin embargo, para poder evaluarlo considera fundamental conocer la duración y frecuencia de cada uno de los usos sanitarios de agua en los edificios, según diferentes características demográficas. Es este aspecto el que se desarrolla en el trabajo.

Los datos que se manejan han sido obtenidos de tres fuentes diferentes de información. Por un lado se utilizan las encuestas de campo recogidas en las bases de datos del “National Human Activities Pattern Survey, NHAPS” y del “Residential Energy Consumption Survey, RECS”. De otro lado se trabajan con mediciones recogidas en el “Residential End Uses of Water Study, REUWS”.

Tabla 2.1. Frecuencia y duración de los consumos domésticos (Wilkes et al., 2005)

Aparato/uso	Frecuencia de uso	Duración media
	[uso/persona/día]	[min/uso]
Lavabo	17,4	0,56
Ducha	0,98	6,8
Baño	0,32	17,6
Inodoro	5,5	
Lavadora	2,3*	
	0,87**	
Lavavajillas	1,4*	
	0,53**	

\* Uso/persona/semana

\*\* Uso/día/vivienda

El informe resume los datos que considera más fiables de cada uno de los estudios en los que se basa. Así, utiliza la información de las encuestas del NHAPS y RECS para obtener la frecuencia de uso de los consumos con menor cadencia, como por ejemplo duchas, baños, lavadoras, o lavavajillas. Para la frecuencia de los usos más frecuentes, como el de lavabos e inodoros, se usa la información más fiable del informe REUWS.

En todos los casos, para la duración de cada uno de los usos utiliza la información del estudio REUWS.

A modo de resumen, la Tabla 2.1 presenta los datos de duración y frecuencia medios de cada uno de los aparatos que es posible encontrar en una vivienda. Hay que hacer notar que se trata de resultados medios para todo tipo características demográficas de la población analizada.

Tabla 2.2. Patrón de consumos en vivienda unifamiliar

Aparato	Condiciones de uso	Frecuencia uso (Usos/persona/día)	Duración media (min/uso)
Lavabos	AF	2,60	0,74
	ACS	0,15	0,46
	Mezcla AF + ACS	2,54	1,57
	TOTAL usos	5,28	0,92
Ducha	Mezcla AF + ACS	0,93	7,63
Baño*	Mezcla AF + ACS	0,18	-
Inodoro	desc. completa	2,57	
	1/2 descarga	2,66	
	TOTAL usos	5,23	
Fregadero	Mezcla AF + ACS	1,35	5,86
Lavadora		0,85**	
Lavavajillas		0,96**	
Lavadero		1,50	1,53

\* Frecuencia entre los usuarios que utilizan el baño.

\*\* frecuencia: usos/día/vivienda. No se tiene en cuenta el número de usuarios que lo utilizan

Un cuarto caso que se presenta en el realizado por el autor con la colaboración de los alumnos de la asignatura "Instalaciones Hidráulicas en Edificación" correspondiente al Máster en Edificación y los alumnos de la asignatura "Instalaciones de Fluidos" del

Máster en Construcciones e Instalaciones Industriales ambos impartidos en la Universitat Politècnica de Valencia.

En este estudio se han realizado una serie de encuestas a los alumnos, todos ellos con formación de grado, y adiestrados en técnicas de medición, sobre los hábitos de consumo en sus viviendas de residencia habitual.

Los detalles de la encuesta se presentarán más adelante cuando se incida en la forma de obtener información sobre la demanda de agua en edificios. Lo que se presenta ahora es un análisis de los patrones de consumo.

Uno de los criterios que se ha utilizado para discriminar los datos es el tipo de edificación en la que se reside. Se distingue la vivienda unifamiliar de la vivienda multifamiliar. Para el consumo doméstico en el interior de la vivienda, el factor diferencial de las dos tipologías es el estrato social al que corresponde. Otros factores, como por ejemplo el consumo de agua ligado al riego de jardines o el de llenado de piscina, no se tiene en cuenta en este patrón de consumos, aunque si que serán de consideración en otras partes de este trabajo.

Así, la información correspondiente a las frecuencias de uso y la duración media de los consumos en las viviendas de tipo unifamiliar, tanto aislado como en pareado o medianera, es el indicado en la Tabla 2.2.

Hay que hacer notar que aunque no sólo es más baja la frecuencia de uso del baño que de la ducha, sino que sólo un 13% de los usuarios encuestado utiliza el baño.

La información correspondiente a las viviendas de tipo multifamiliar, tanto si se encuentran entre medianeras o si son de tipo exento, en las que suele existir zona ajardinada, se encuentran en la Tabla 2.3.

A la vista de los resultados, se puede establecer que no existen grandes diferencias entre los hábitos de consumo interior, en viviendas de residencia habitual, si éstas son de tipo unifamiliar o si son de tipo multifamiliar.

Sí que hay que indicar que si bien el 94% de las viviendas encuestadas disponen, o usan, de lavadora, sólo el 56% disponen de lavavajillas. Teniendo en cuenta que es uno de los sistemas que más ahorro de agua producen (Ibañez et al., 2009) resulta evidente el potencial que presenta la adopción de medidas (IVE, 2014) que potencien, o incluso que obliguen, a la instalación de este tipo de dispositivos.

Tabla 2.3. Patrón de consumos en vivienda multifamiliar

Aparato	Temperatura uso	Frecuencia uso (Usos/persona/día)	Duración media (min/uso)
Lavabos	AF	1,03	0,44
	ACS	0	0
	Mezcla AF + ACS	3,29	1,03
	TOTAL usos	4,32	0,49
Ducha	Mezcla AF + ACS	0,93	8,25
Baño*	Mezcla AF + ACS	0,12	
Inodoro	desc. completa	2,85	
	1/2 descarga	2,64	
	TOTAL usos	5,48	
Fregadero	Mezcla AF + ACS	1,39	4,45
Lavadora		0,59**	
Lavavajillas		0,68**	
Lavadero		0,78	1,11

\* Frecuencia entre los usuarios que utilizan el baño.

\*\* frecuencia: usos/día/vivienda. No se tiene en cuenta el número de usuarios que lo utilizan

En la Tabla 2.4 se presenta el global de las medidas. En el análisis de los resultados llama la atención el elevado tiempo de duración de las duchas. Hay que tener en cuenta que durante la ducha se consume agua caliente sanitaria, luego, además del consumo de agua, su uso supone un importante consumo energético.

Se ha consultado en la encuesta, si bien no se ha obtenido una respuesta significativa que pudiera ser tenida en cuenta, si el hábito de ducha del usuario lleva consigo que se cierre el grifo durante el enjabonado. Es una práctica que puede ahorrar una gran cantidad de agua y energía pero que no siempre se realiza.

Tabla 2.4. Patrón de consumos global para todas las tipologías de vivienda

Aparato	Temperatura uso	Frecuencia uso (Usos/persona/día)	Duración media (min/uso)
Lavabos	AF	1,40	0,56
	ACS	0,10	0,29
	Mezcla AF + ACS	3,11	1,11
	TOTAL usos	4,62	0,65
Ducha	Mezcla AF + ACS	0,93	8,11
Baño*	Mezcla AF + ACS	0,12	
Inodoro	desc. completa	2,78	
	1/2 descarga	2,64	
	TOTAL usos	5,42	
Fregadero	Mezcla AF + ACS	1,38	4,80
Lavadora		0,65**	
Lavavajillas		0,73**	
Lavadero		1,05	1,21

\* Frecuencia entre los usuarios que utilizan el baño.

\*\* frecuencia: usos/día/vivienda. No se tiene en cuenta el número de usuarios que lo utilizan

Medidas de ahorro indirecto, que no tengan que ver directamente con el consumo de agua, pueden ser aquellas que vayan destinadas a evitar que el usuario deje el grifo abierto durante el enjabonado. Por ejemplo, una adecuada temperatura en el local que garantice que el usuario tenga confort térmico sin necesidad de dejar correr el agua caliente que lo mantenga.

### 3. DEMANDA DE AGUA EN EDIFICIOS DE VIVIENDAS

---

La demanda de agua representa el volumen total consumido en el aparato sanitario, o en el conjunto de ellos, o en toda la vivienda.

Si bien los patrones de consumo son importantes para realizar los análisis del potencial ahorro que se puede obtener con un determinado sistema de hidroeficiencia, también

es posible utilizar la información correspondiente a la demanda de cada uno de los aparatos en la vivienda para valorarlo.

A la hora de extrapolar resultados para el estudio de una determinada implantación, la información no es tan precisa como en el caso de los patrones, y se puede prestar más a una manipulación, no siempre intencionada, de resultados. Sin embargo, es más fácil disponer de unos datos de consumos totales, demandas, que de los patrones de dichos consumos.

Los datos sobre la demanda de agua de una vivienda se pueden presentar en valor absoluto de cada uno de los aparatos o como el porcentaje de consumo de cada uno de los aparatos con respecto al volumen total demandado en la vivienda.

Para el análisis de la viabilidad de implantación de un determinado sistema, la presentación a través de porcentajes no es significativa, y debe ser traducida siempre a valores absolutos de consumo de aparatos.

Hay que tener en cuenta que si el porcentaje de consumo de un aparato hidro-sanitario, con respecto al consumo total de la vivienda, antes de implantar un sistema de hidroeficiencia es un determinado valor, después de la implantación del sistema de hidroeficiencia ese porcentaje no se va a mantener. Eso distorsiona los ahorros globales que se obtienen en la vivienda.

No obstante, gran parte de los datos disponibles están en forma de porcentajes. Lo que representa son hábitos de consumo, independientemente del volumen total consumido o del número de ocupantes de la vivienda.

Lo que se hará, en su momento, cuando se realice la valoración de la viabilidad de cada sistema de hidroeficiencia es pasar porcentajes a valor absoluto.

Se presentan a continuación algunas referencias, bibliográficas o resultado de mediciones, que sirven como base para el caso en que no se disponga de información suficiente para el análisis de viabilidad de una implantación.

La Tabla 2.5 muestra el resumen de varios estudios publicados en el que se hace referencia al reparto de consumos por aparatos, todos los de un mismo tipo, para diferentes países.

El estudio denominado AWWA se corresponde con el publicado por la American Water Works Association (AWWA, 1999) en su referencia "Residential End uses of water". Es un estudio realizado en los Estados Unidos. Aunque es un estudio que tiene un cierto tiempo, es el primero de este tipo que se realizó y está referenciado en numerosas contribuciones posteriores. Marcó la pauta de cómo deben hacerse los estudios para determinar los patrones y demandas de consumo doméstico.

El denominado POST es un estudio realizado en Inglaterra (POST, 2000), por la Parliamentary Office of Science and Technology. Se plantea como una primera aproximación a la demanda de agua de los británicos para, desde su análisis, poder promover medidas de eficiencia en el consumo de agua que incluso permitan hacer frente a situaciones de sequía.

El denominado EAA (Lallana et al., 2001) es un estudio de la Agencia Europea del Medio Ambiente, ejecutado por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) sobre los hábitos de consumo de los europeos. Los datos están obtenidos a partir de otros informes o estadísticas existentes.

En la Tabla 2.5 se observa cómo, en la mayor parte de los casos, el consumo más importante de la vivienda lo representan los inodoros, y el conjunto de baño y ducha.

Tabla 2.5. Reparto porcentual del consumo total de agua en viviendas por dispositivos

DISPOSITIVO / FUENTE	AWWA	POST	EAA (Inglaterra)	EAA (Finlandia)	EAA (Suiza)
Inodoros	28%	31%	33%	14%	33%
Lavabos	14%	9%			
Duchas	17%	5%	20%	29%	32%
Baños	2%	15%			
Lavadora	22%	20%	14%	30%	16%
Lavavajillas	1%	1%			
Fregadero	15%	15%			
Cocinar			3%	4%	3%
Uso externo			3%	2%	2%
Otros	2%	4%	27%	21%	14%

En la Tabla 2.6 se presentan los datos de volumen consumido y caudales suministrados a viviendas domésticas recogidos en el informe EPA/600/R-06/003 de la EPA (Wilkes et al., 2005). Esta información se complementa con la correspondiente al patrón de

consumo, indicado en la Tabla 2.1, para obtener el consumo diario de cada uno de los aparatos por persona y día.

Tabla 2.6. Volumen y caudal de los consumos domésticos (Wilkes et al., 2005)

Aparato/uso	Características	Volumen consumido			Caudal medio	
		US.gal/uso	l/uso	l/persona/día	US.gal/min	l/min
Lavabo		0,7	2,6	45,24	1,2	4,5
Ducha		18,6	70	68,6	2,4	9
Baño		40	151	48,32	4,9	18,5
Inodoro		3,5	13,2	72,6		
Lavadora	Carga superior antigua	41	155	50,9		
	Carga superior moderna	33	124	40,7		
	Carga frontal	27	102	33,5		
Lavavajillas		8	30	42		

Tabla 2.7. Demandas en viviendas multifamiliares entre medianeras (Molina et al., 2004)

Aparato	Volumen consumido	
	l/uso	l/persona/día
Lavabo	4	23
Ducha	50	41
Inodoro	6	27
Fregadero	5	5
Lavadora	60	13
Lavavajillas	30	7
TOTAL		126

Se observa cómo el consumo principal, al igual que en el caso anterior, sigue siendo el correspondiente al inodoro, seguido por el de ducha.

Se recogen ahora los datos porcentuales de demanda del estudio elaborado por la Generalitat de Catalunya (Molina et al., 2004). En la Tabla 2.7 se presentan los correspondientes a las viviendas multifamiliares entre medianeras, sin zonas ajardinadas. Se observa como el mayor de los consumos corresponde a las duchas. Hay que tener en cuenta que el estudio se basa en encuestas de consumo realizadas a los usuarios. Por tanto, el valor de consumo por uso es un valor estimativo. En este caso, se ha estimado un valor por uso en cisternas de 6 litros, muy inferior al estudio de la EPA, que lo situaba en 13 litros por uso.

En la Tabla 2.8 se presentan los resultados para las viviendas multifamiliares exentas. En ellas se ha estimado una superficie ajardinada de 300 m<sup>2</sup>, con un 50% de césped y un riego adecuado del mismo.

No se observa una gran diferencia con respecto al caso anterior en lo que se considera consumo en el interior de la vivienda. La diferencia en el volumen total consumido es justamente el riego de jardines de las zonas comunes. Si bien, hay que hacer notar que los valores de demandas por uso son estimadas.

Tabla 2.8. Demandas en viviendas multifamiliares exentas (Molina et al., 2004)

Aparato	Volumen consumido	
	l/uso	l/persona/día
Lavabo	5	39
Ducha	50	43
Inodoro	6	30
Fregadero	5	5
Lavadora	60	16
Lavavajillas	30	8
Jardín*		9
TOTAL		160

En cuanto a las viviendas unifamiliares, del cualquier tipo, los resultados se presentan en la Tabla 2.9. En este tipo de viviendas el consumo de agua para riego de jardines, se ha estimado una superficie media ajardinada de 200 m<sup>2</sup> con una ocupación de

zonas regables del 50%, supone una parte considerable del consumo total. Si no se tiene en cuenta este consumo, el correspondiente al interior de la vivienda resulta ser menor que en los edificios multifamiliares, consecuencia de una mayor eficiencia de los aparatos hidro-sanitarios.

Tabla 2.9. Demandas en viviendas unifamiliares (Molina et al., 2004)

Aparato	Volumen consumido	
	l/uso	l/persona/día
Lavabo	4	23
Ducha	50	43
Inodoro	6	27
Fregadero	5	5
Lavadora	23	16
Lavavajillas	11	7
Jardín*		75
TOTAL		207

Tabla 2.10. Distribución de demanda en aparatos (Cubillo, 2008)

Aparato	Vivienda plurifamiliar	Vivienda unifamiliar	
		incluyendo jardín	Solo consumo interior
Grifos	35%	31%	42%
Duchas	27%	20%	27%
Inodoros	23%	12%	17%
Lavadora	11%	6%	9%
Lavavajillas	19%	1%	1%
Fugas	3%	3%	4%
Exterior	-	27%	-

En el estudio desarrollado por el Canal de Isabel II (Cubillo et al., 2008) la información es más fiable y discriminada puesto que, en su segunda etapa, los datos se extrajeron directamente de medidas en las viviendas controladas.

En la Tabla 2.11 se presenta los valores de demanda por persona y día, para cada tipología de aparato y de vivienda.

Tabla 2.11. Demanda diaria por habitante/día (Cubillo et al., 2008)

Aparato	Vivienda plurifamiliar	Vivienda unifamiliar
	l/hab/día	l/hab/día
Grifos	30,1	46,8
Duchas	22,5	30,1
Inodoros	19,4	18,9
Lavadora	9,6	9,6
Lavavajillas	0,9	0,3
Fugas	2,4	4,5
Exterior	-	41,2

Igualmente, se presentan los datos por vivienda y día en la Tabla 2.12.

El último caso que se presenta es el estudio realizado por el autor sobre las encuestas de los alumnos, comentado en apartados anteriores.

Los alumnos, con un nivel de formación de grado, han realizado medidas del caudal suministrado por cada uno de los grifos de su vivienda habitual. Se les ha adiestrado previamente sobre la forma más precisa de realizar las medidas.

En general las medidas de caudal se han realizado registrando el tiempo que tarda en llenarse un recipiente cuyo volumen está cubicado previamente. En algunos casos, la medida del volumen se ha realizado, indirectamente, a través de la pesada del volumen captado en el recipiente.

Los diferentes resultados se muestran en las Tabla 2.13, 14 y 15 correspondientes a las viviendas de tipo unifamiliar, multifamiliar y al resultado global de todas ellas, respectivamente.

Tabla 2.12. Demanda diaria por vivienda/día (Cubillo et al., 2008)

Aparato	Vivienda plurifamiliar	Vivienda unifamiliar
	l/viv/día	l/viv/día
Grifos	103,1	194,4
Duchas	77,2	124,9
Inodoros	66,5	78,9
Lavadora	32,9	40
Lavavajillas	3,1	4,7
Fugas	8,3	18,9
Exterior	-	171,4

Tabla 2.13. Caudales y demandas diarias por persona y día. Tipología unifamiliar

Aparato	Frecuencia uso (Usos/persona/día)	Duración media consumo (min)	Caudal (l/min)	Volumen consumido (litros/persona/día)
Lavabos	5,28	0,74	5,15	20,1
Ducha	0,93	7,63	9,81	69,9
Baño (1)	0,03		8,78	1,5
Inodoro (2) (desc. completa)	2,57			23,2
Inodoro (3) (1/2 desc.)	2,66			9,3
Fregadero	1,35	5,86	8,54	67,6
Lavadora (4)	0,25			15
Lavavajillas (5)	0,14			2,1
Lavadero	1,50	1,53	10,73	24,6

- 1) Estimando volumen bañera 50 litros
- 2) Estimando volumen descarga en 9 litros
- 3) Estimando el volumen de descarga en 3,5 litros
- 4) Estimado un consumo por uso de 60 litros
- 5) Estimando un consumo por uso de 15 litros

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES INTERIORES DE SUMINISTRO DE AGUA  
DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL AHORRO**

Tabla 2.14. Caudales y demandas diarias por persona y día. Tipología plurifamiliar

<b>Aparato</b>	<b>Frecuencia uso (Usos/persona/día)</b>	<b>Duración media consumo (min)</b>	<b>Caudal (l/min)</b>	<b>Volumen consumido (litros/persona/día)</b>
Lavabos	4,32	0,44	6,69	12,8
Ducha	0,93	8,25	8,92	68,2
Baño	0,12		6,00	6,0
Inodoro (desc. completa)	2,85			25,6
Inodoro (1/2 desc.)	2,64			9,2
Fregadero	1,39	4,45	8,35	51,5
Lavadora	0,19			11,4
Lavavajillas	0,15			2,3
Lavadero	0,78	1,11	8,27	7,2

Tabla 2.15. Caudales y demandas diarias por persona y día. Todas las tipologías

<b>Aparato</b>	<b>Frecuencia uso (Usos/persona/día)</b>	<b>Duración media consumo (min)</b>	<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Volumen consumido (litros/persona/día)</b>
Lavabos	4,61	0,56	6,0	15,5
Ducha	0,93	8,11	9,1	68,6
Baño	0,12		7,9	6,0
Inodoro (desc. completa)	2,78			25,0
Inodoro (1/2 desc.)	2,64			9,2
Fregadero	1,38	4,80	8,4	55,5
Lavadora	0,2			12
Lavavajillas	0,15			2,3
Lavadero	1,05	1,21	9,1	11,5

Con la finalidad de correlacionar el caudal suministrado con la presión en los grifos, en la encuesta se preguntaba la planta, con respecto al nivel de calle, en que se encuentra la vivienda, si la vivienda es alimentada por grupo de presión o no, y la planta más elevada alimentada por grupo de presión, si ese era el caso.

En la Figura 2.4 se muestra la relación existente entre el caudal entregado en la ducha con respecto a la planta en la que se encuentra la vivienda, para el caso en que las viviendas son alimentadas en directo desde la red general de distribución, es decir, sin grupo de presión que les de servicio.

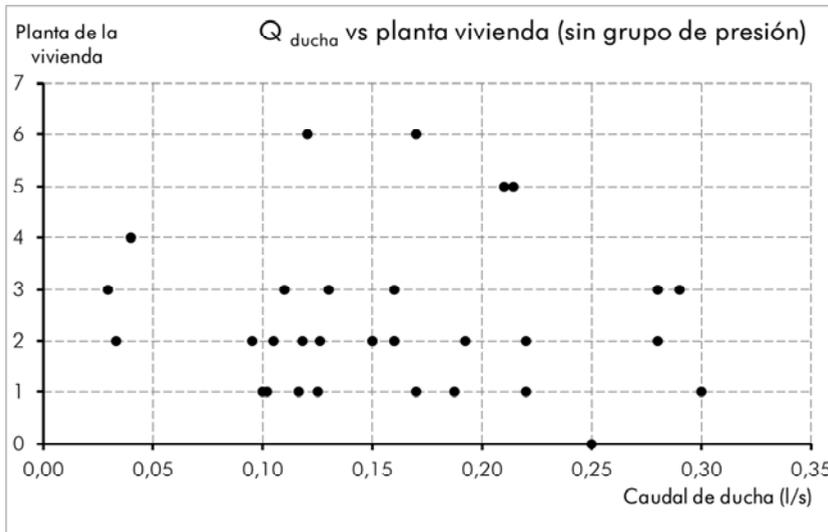


Figura 2.4. Influencia de la altura de la vivienda en el caudal entregado.  
Viviendas alimentadas en directo

Se ha tomado la ducha como referencia porque en otros aparatos hidrosanitarios, como el lavabo, el usuario adapta el grado de apertura de su grifo para evitar salpicaduras. En la ducha no se da esa situación.

Se pueden observar cómo no existe una relación clara entre caudal entregado y altura de la vivienda.

Igualmente se ha hecho el análisis para las viviendas alimentadas desde grupo de presión, Figura 2.5. Tampoco se puede concluir que las viviendas, más bajas, con mayor presión de bombeo, tengan un caudal suministrado mayor.

La falta de correspondencia entre el caudal y la presión de alimentación para el caso de las duchas se explica porque, a pesar que no existe necesidad de regular el cierre de

los grifos por salpicaduras, el usuario regula el caudal suministrado hasta sus condiciones de confort, que como se observa son muy variables.

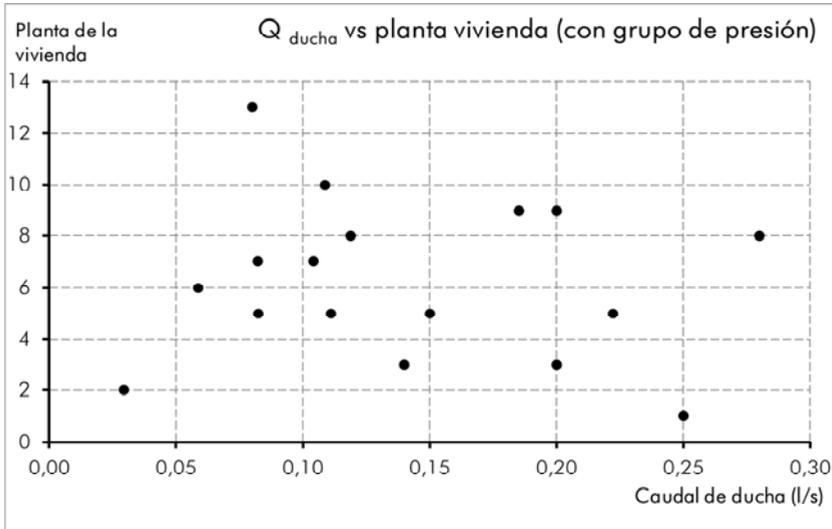


Figura 2.5. Influencia de la altura de la vivienda en el caudal entregado.  
Viviendas alimentadas desde grupo de presión

#### 4. OBTENCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN EDIFICIOS

A lo largo de este capítulo se han presentado datos sobre demandas de consumo, patrones, caudales suministrados obtenidos de fuentes propias o de estudios realizados por terceras partes.

Estos estudios se han realizado bien a base de mediciones directas en los puntos de consumo, o a partir de encuestas directas sobre los usuarios de los edificios.

Este proceso, obtenido con el suficiente detalle y garantía de representatividad, es largo en el tiempo.

Lo que se propone a continuación es el desarrollo del procedimiento para obtener estos datos a partir de las fuentes de información habituales: la auditoría de consumo de agua de un edificio, y la encuesta de consumo de agua.

#### 4.1. AUDITORIA DEL CONSUMO DE AGUA DE UN EDIFICIO

---

Realizar una auditoría del consumo de agua de un edificio es, en esencia, conocer de forma directa cómo se producen las demandas en el edificio, tanto a nivel de patrones como a nivel de caudales.

El proceso resulta similar al que se desarrollaría para conocer el consumo energético del edificio, tan de moda actualmente. Sin embargo, así como existe normativa con respecto al caso de las auditorías energéticas (AENOR, 2012), no hay normativa que regule el procedimiento a seguir para el caso de las auditorías del consumo de agua.

En cualquier caso, el proceso que hay detrás de todo ello es muy costoso, requiere de numerosos equipos de medida que son caros, y es sumamente complejo por las fases que implica.

El que se va a desarrollar en este capítulo es el que se ha seguido para realizar las auditorías de un edificio de uso oficina y un hotel.

La auditoría del edificio de oficinas se corresponde con la realizada en el edificio 7D de la Universidad Politécnica de Valencia (Galindo, 2014). La realizada en el edificio con tipología de hotel es la realizada por este autor en el Hotel Rey Don Jaime de la ciudad de Valencia dentro del proyecto AECO2 (López-Patiño et al., 2005b).

La base de este procedimiento es el ya manifestado por Viñuales (Viñuales et al., 2001) que ha sido mejorado incluyendo la trazabilidad de las demandas para caracterizar patrones de consumo.

En general, el procedimiento para desarrollar la auditoría del consumo de agua de un edificio es el siguiente.

En primer lugar hay que caracterizar el edificio. Se trata de determinar todos los aspectos propios del edificio que pueden influir en el consumo de agua o en el posterior análisis de viabilidad de la implantación de sistemas de hidroeficiencia.

Hay que conocer el emplazamiento del edificio, entre otras cuestiones para determinar la pluviometría de la zona, o el aporte energético solar del consumo de agua caliente sanitaria. La distribución de todos los espacios en el edificio, identificando aquellos que dispongan de puntos de consumo de agua. También es necesario conocer la ocupación y los hábitos, y horarios, de los ocupantes del edificio.

A continuación, hay que inventariar cada uno de los puntos de consumo de agua en el edificio: descripción, tipo de aparato hidrosanitario, marca, modelo, estado de conservación, y espacio en el que se ubica

Con la finalidad de simplificar el análisis posterior, los equipos que sean de un mismo tipo y tengan las mismas características se pueden agrupar. Por ejemplo, los grifos de lavabo de un determinado núcleo húmedo, de una misma marca, modelo, y fecha de instalación se pueden agrupar bajo una misma caracterización.

Cada uno de los grupos de hidrosanitarios resultante debe ser caracterizado. Se medirá el caudal que entrega cada uno de ellos, la presión estática que hay en el grifo, tanto para la situación de suministro de agua fría exclusivamente, agua caliente sanitaria exclusivamente, o suministro en condiciones de uso con mezcla de aguas a temperatura de utilización.

Así mismo, es necesario caracterizar la curva de demanda del aparato, es decir, cómo consume el aparato a lo largo del tiempo. En un grifo de llenado de un inodoro, el patrón de demanda indica que hay un fuerte caudal, de sólo agua fría, demandado inicialmente que dura unos segundos, para finalizar con una reducción asintótica hacia un consumo nulo como consecuencia del cierre gradual de la válvula de estrangulamiento, como se puede observar en la Figura 2.6. En una grifería de ducha existen una demanda de caudal de agua fría y agua caliente más o menos constante y persistente en el tiempo, como se puede observar en la Figura 2.7.

La caracterización del aparato tiene 4 elementos fundamentales: caudal máximo, caudal medio, duración del consumo, y modulación temporal.

Cuando cada uno de los aparatos esté caracterizado, en un análisis posterior sería posible asociar cada uno de los eventos de consumo con uno de los aparatos instalados. Es lo que se conoce como la trazabilidad del consumo. De esta forma, con una medida lo suficientemente precisa del caudal global consumido por el núcleo húmedo, o el conjunto de ellos, es posible conocer el patrón de consumos de cada uno de los aparatos sanitarios. Así se evita tener que instalar un caudalímetro en cada aparato, lo que se sumamente costoso.

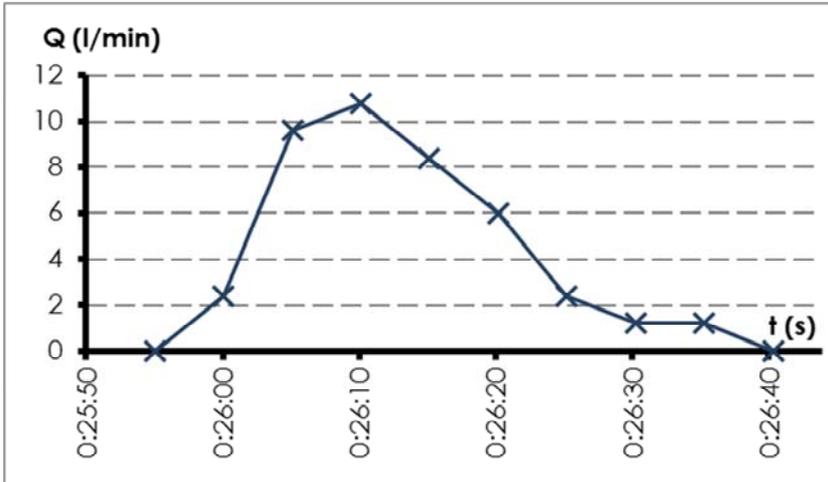


Figura 2.6. Evento de demanda de inodoro

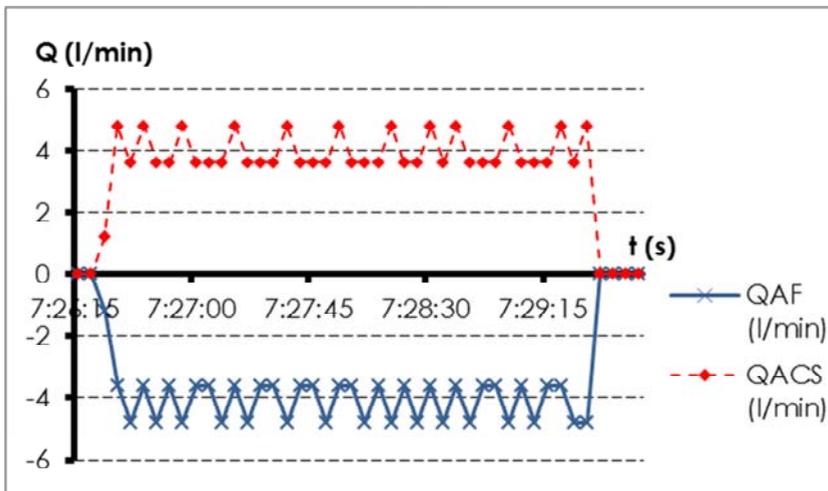


Figura 2.7. Evento de demanda de ducha

Con toda la información recabada hay que elaborar una ficha del dispositivo, a modo de identificación única del mismo. A partir de la experiencia de las auditorías realizadas, se propone como ficha tipo la indicada en la Figura 2.8.

IDENTIFICADOR	DENOMINACIÓN	
IMAGEN/FOTO	DESCRIPCIÓN	
	TIPOLOGÍA	
	MARCA	
	MODELO	
	Nº EQUIPOS	
	ESTADO CONSERVACIÓN	
CAUDAL SUMINISTRADO AF: ACS: USO:	PRESION EN APARATO	
UBICACIÓN		
OBSERVACIONES		

Figura 2.8. Ficha tipo de caracterización del aparato hidrosanitario

Las siguientes fases en el proceso de auditoría van encaminadas a conocer el patrón de consumo del edificio, necesario para realizar la selección de equipos de hidroeficiencia a implantar.

Es necesario desarrollar una serie de mediciones de demandas en el edificio. Posiblemente la fase más larga y costosa del proceso. Para la fase de mediciones hay que establecer una planificación y una programación que comprenda:

- Localización de los puntos de medición. Se localizarán los equipos en función de la disponibilidad en el número de ellos. Cuanto mayor es el número de equipos de medida con los que se cuenta, menor es el tamaño de la zona de consumo a controlar. La situación ideal se presenta cuando se puede medir en cada uno de los núcleos húmedos con los que cuenta el edificio.
- Selección de equipos de medida. Para la selección de los equipos de medida, hay que tener en cuenta la localización de los mismos, y el rango de caudales que van a circular por el punto de medida.



Figura 2.9. Equipo de medida de caudal de un núcleo húmedo

En general, se van a disponer de contadores volumétricos o de caudalímetros instantáneos. Tanto en un caso como en otro, se requiere del volcado de datos a un registrador, ya sea datalogger o directamente a un ordenador (solución poco habitual)

Cuanto más localizada es la medida, más fiables son los resultados de la medición, pero mayor coste de inversión supone, no siempre asumible. Es por ello que hay que encontrar un compromiso entre coste en equipos y precisión en los datos.

Si la medida se produce para controlar un núcleo húmedo, lo más habitual es disponer de contadores volumétricos con salida de pulsos que controlen el volumen consumido en todo el local húmedo, como se puede observar en la Figura 2.9 y en la Figura 2.10. Con posterioridad, y puesto que los aparatos hidrosanitarios están caracterizados, se realizará un análisis de trazabilidad para localizar cada uno de los eventos de consumo en cada uno de los aparatos.



Figura 2.10. Contadores instalados en la alimentación de un núcleo húmedo

El contador volumétrico estará dimensionado para el caudal nominal del núcleo húmedo, pero la emisión de pulsos debe ser al menos de 1 pulso por cada décima de litro consumido, teniendo en cuenta que el caudal suministrado en lavabos, por ejemplo, estará del orden de magnitud de 0,1 l/s, lo que dará un valor de 1 pulso por segundo.

Para mediciones que abarquen mayores zonas de consumo en el edificio se dispondrán de caudalímetros, generalmente de tipo portátil y con tecnología ultrasónica, como se puede ver en la Figura 2.11.

- Programación de las lecturas. Cuanto mayor sea el número de datos disponibles, mayor será la fiabilidad de las mediciones, pero más tiempo se requiere para disponer de la auditoría de consumos.

La duración de las series de medidas debe contemplar todos los posibles estados de consumo y evitar las posibles anomalías provocadas por un comportamiento inusual de los ocupantes del edificio.

Es por ello que debe contemplar, al menos la medición en todos los días de diario y en fin de semana, y prolongarse al menos durante 2 semanas. Es conveniente repetir esta secuencia, si fuera posible, en periodo estival y en periodo invernal.



Figura 2.11. Equipo de medida para el conjunto de un edificio

La cantidad de datos que se pueden registrar durante este periodo de tiempo, con medidas cada segundo, puede resultar ingente. Dependiendo de la capacidad de almacenamiento de los registradores de datos, así deberá establecerse el periodo de volcado de datos.

En general, conocida la capacidad de almacenamiento del registrador,  $NM_{log}$ , y la periodo de muestreo,  $t_{med}$ , expresado en segundos por dato, el periodo de volcado de datos,  $t_{log}$ , es:

$$t_{log}(h) = \frac{NM_{log}}{t_{med}(s)/3600} \quad \text{Ec 2.1}$$

- Identificación de eventos de consumo. Los ingentes datos que se obtienen de las medidas, como los de la Figura 2.12, deben ser transformados a información útil que se pueda analizar y procesar posteriormente.

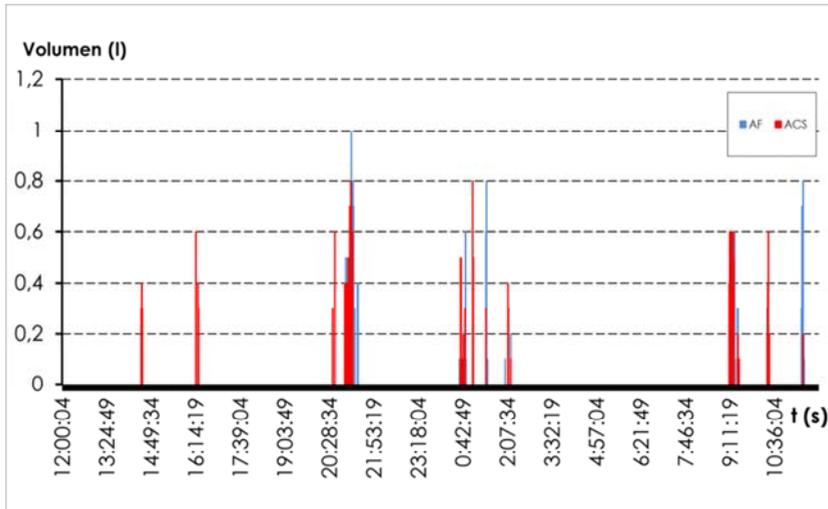


Figura 2.12. Registro de datos de medidas en un núcleo húmedo

Para ello hay que identificar cada uno de los eventos de consumo asociarlos a uno de los aparatos hidrosanitarios que hay en el edificio. Es lo que se denomina el estudio de trazabilidad de los consumos.

Para ello, hay que utilizar la caracterización previamente realizada de cada uno de los aparatos, comparando valores de caudal máximo del evento, caudal medio y duración con los conocidos de cada uno de los aparatos.

Mientras que el evento registre el uso de un único aparato la identificación es sencilla. La dificultad radica cuando en un evento de consumo se registra el consumo simultáneo de varios aparatos. En tal caso, hay que establecer una comparación con la curva característica de comportamiento de una combinación probable de utilización de aparatos hidrosanitarios.

El proceso se puede automatizar por cuanto hoy en día hay disponible de forma comercial software que realiza dicha identificación (Meter Master, 2015).

- Análisis de demandas registradas. El último paso de la auditoría es el análisis de la información procesada. Se trata de obtener la frecuencia de uso, la duración, el caudal suministrado, y el volumen de consumido, tanto de agua fría como de agua caliente sanitaria de cada uno de los aparatos que forman parte de la instalación del edificio.

Con el resultado de este análisis se pueden obtener datos como los presentados en apartados anteriores en las tablas 2.10, 2.11 y 2.12.

Tras este proceso, la auditoría queda finalizada. La información así obtenida debe resultar de utilidad para desarrollar el proceso de selección del sistema de hidroeficiencia más adecuado para el edificio que se ha auditado.

## 4.2. ENCUESTA DE CONSUMO DE AGUA

---

Cuando no es posible realizar mediciones, por el elevado coste que ello supone, o por la envergadura del estudio sobre demandas que se quiere afrontar, se recurre a la realización de encuestas de consumo.

La encuesta es un elemento de menor fiabilidad, por cuanto no deja de ser una estimación realizada por los propios usuarios sobre sus hábitos de consumo. En la medida en que los propios usuarios estén más concienciados sobre la validez y utilidad de la encuesta, mejores serán los resultados obtenidos.

La que se muestra a continuación son conclusiones que se han obtenido de las encuestas realizadas por el autor sobre el consumo doméstico de agua.

La encuesta en cuestión se ha realizado con la colaboración de los alumnos del Máster en Edificación y del Máster en Construcciones e Instalaciones Industriales de la Universidad Politécnica de Valencia desde el curso 2010-2011 hasta el 2014-2015.

Al tener carácter voluntario solo los alumnos verdaderamente motivados la han realizado. Esto unido a cierta destreza en la medida de caudales, al ser técnicos graduados en todos los casos, le da cierta fiabilidad a los resultados.

No se pretende en este punto volver a mostrar los resultados, que ya han sido objeto de estudio en este capítulo.

La encuesta, desde sus versiones iniciales, ha ido mejorando la información disponible. Lo que se presenta a continuación es el resultado final de la experiencia final del autor. En ella se recaban tanto aspectos de caudales demandados como patrones de consumo medidos a lo largo de 14 días de registros, con la ayuda de unos formularios colocados en los núcleos húmedos.

Los principales campos consultados se refieren a:

- los caudales de cada uno de los aparatos, tanto en agua fría como en agua caliente sanitaria, como en condiciones normales de uso, mezcla de ambas;
- la frecuencia de utilización;
- la duración media de cada uso;
- la forma de tomar la ducha (cerrando el grifo durante el enjabonado o no)

- la presión de alimentación en la vivienda (de forma indirecta, a través de la planta en la que se encuentra, o de la información sobre si se alimenta desde grupo de bombeo o no)
- número de ocupantes de la vivienda
- demanda en zonas ajardinadas

La encuesta se puede mejorar con aspectos como la clasificación energética de los electrodomésticos, o el volumen de descarga de los inodoros. Esta información ayudaría a calcular los volúmenes totales consumidos en la vivienda, pero en algún caso es más compleja de obtener.

## 5. CONCLUSIONES

---

Como primer paso para la selección de los sistemas de hidroeficiencia más adecuados para equipar un edificio, es necesario conocer cuál es el patrón de consumos de dicho edificio para, a partir de él, poder determinar los potenciales ahorros de agua.

Los patrones de consumo pueden ser muy diferentes de un edificio a otro, según su tipología, morfología, ubicación, ocupación, etc.

Algunos estudios realizados, principalmente sobre edificios de tipo residencial vivienda, demuestran que los hábitos de consumo son muy diferentes de unos edificios a otros.

Para desarrollar un proceso de selección lo más fiable posible es necesario disponer de la información más real posible sobre el patrón de consumos del edificio en cuestión.

Hay diferentes formas de conseguirlo. La más económica consiste en extrapolar el patrón conocido de un edificio de las mismas características, en el mismo emplazamiento. Ello implica disponer de una muy amplia base de datos. Sin embargo, actualmente, no hay suficientes experiencias para ofertar una fuente de información tan extensa.

Se hace necesario completar los estudios existentes, principalmente desarrollados sobre tipologías de tipo residencial y en emplazamientos muy concretos, con otros que se realicen sobre otro tipo de edificios, y de un ámbito geográfico mucho más amplio.

En este sentido, y para esta tesis, se ha realizado un estudio del patrón de consumos sobre edificios de viviendas en el área metropolitana de Valencia. Con los resultados del estudio, se puede concluir que el mayor consumo se produce en las duchas, y fregaderos de cocina, independientemente de si la morfología del edificio es unifamiliar o plurifamiliar.

Puestos a desarrollar medidas de eficiencia, en un primer proceso de pre-selección de sistemas de hidroeficiencia, se postulan como más adecuados los que actúan sobre estos aparatos hidrosanitarios.



### 3. ANALISIS DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Uno de los objetivos generales de este trabajo es la de seleccionar, de entre los muchos equipos que ahorran agua en el edificio, aquellos que resulten más ventajosos, atendiendo a una serie de criterios.

La necesidad de disponer de elementos para la gestión de la demanda de agua y los avances técnicos han favorecido el desarrollo, en los últimos años, de numerosos equipos comerciales que permiten el ahorro de agua.

Debido a la gran cantidad de equipos, realizar una primera preselección para establecer cuáles son los mejores equipos candidatos para mejorar la hidroeficiencia de un edificio es fundamental.

En este capítulo, se van a presentar las principales tecnologías en ahorro de agua y energía asociada que existen, indicando el potencial de ahorro de cada una de ellas, y estableciendo una primera comparación, sólo desde el punto de vista del ahorro de agua, entre las mismas.

Los equipos de ahorro de agua se van a clasificar según dos criterios: la complejidad y número de elementos que lo forman, y la forma de ahorro de agua que se consigue.

Así, según la complejidad del equipo, se van a distinguir los dispositivos de ahorro de agua, y los sistemas de ahorro de agua.

Un dispositivo de ahorro de agua es un equipo sencillo y específico para una aplicación concreta, que suele consistir en un único aparato instalado. Así por ejemplo, un reductor de caudal de ducha es un dispositivo que sólo puede ser instalado en una ducha. Aquellos edificios en los que no existan duchas, no pueden montar este dispositivo.

Un sistema de ahorro de agua es un conjunto de elementos, no específicos, pero que montados todos juntos según un determinado orden y funcionalidad consiguen el efecto de ahorro que se busca. Por ejemplo, un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia está formado por filtros, depósitos y bombas, no necesariamente específicos, pero que logran el objetivo final marcado.

En este trabajo se va a analizar tanto dispositivos como sistemas de ahorro de agua. Para unificar una nomenclatura, se van a denominar en general "sistemas de hidroeficiencia", lo que englobaría a ambos.

De otro lado, se puede establecer una clasificación según la forma de ahorro que se consigue, distinguiendo los sistemas de hidroeficiencia que reducen la demanda, y los sistemas de hidroeficiencia que suponen una fuente alternativa de agua.

Los sistemas que reducen la demanda van destinados a reducir el caudal suministrado a través de los aparatos sanitarios, o a reducir el tiempo de consumo de los mismos, o su frecuencia de uso. Dentro de los que reducen el caudal se encuentran los aireadores y reductores de caudal, que se comentarán más adelante. En el grupo de los que reducen el tiempo de uso están los sistemas de recirculación de agua caliente sanitaria. En cualquiera de los casos, el gestor del edificio ve reducida la cuantía que debe abonar por el uso del agua, al reducir su demanda. El sistema será más a menos rentable según sea su coste de inversión y operación.

Las fuentes alternativas de agua proporcionan un volumen de agua, generalmente no para consumo hidrosanitario, aprovechando aportaciones no convencionales: agua de lluvia, aguas usadas,...

En realidad no son un mecanismo de ahorro de agua en sí mismo. Lo que se busca con ellas es reducir la demanda de agua de las redes generales de distribución, y por tanto la disminución del uso de los recursos naturales.

Pero la demanda específica de un edificio no tiene porqué disminuir.

Para el gestor del edificio la ventaja reside en reducir la factura que paga por el servicio general de distribución cuando la tarifa de éste es elevada. Para lograrlo, el coste unitario de la producción de agua desde la fuente alternativa, incluyendo amortizaciones, debe ser inferior al coste unitario del agua que se consume desde la red general de distribución.

Cuanto mayor sea el precio del agua de distribución, más interesante y rentable será utilizar estas fuentes alternativas de producción. Un precio técnico y razonable, en lugar de un precio político y subvencionado, propicia el uso de éstas tecnologías.

En cualquier caso, y aunque para el abonado pueda no resultar rentable, la sociedad en general sí que se beneficia de la disminución en el uso de los recursos naturales, por lo que la implantación de este tipo de medidas debería estar fomentada por las administraciones con competencias medioambientales.

A continuación se presentan los sistemas de hidroeficiencia más representativos, aquellos cuyos resultados de ahorro potencial están contratados y su aceptación por el usuario está suficientemente acreditada.

## **2. SISTEMAS DE AHORRO DE AGUA**

---

Como se ha comentado los sistemas de ahorro de agua van destinados a reducir el caudal suministrado, la duración del consumo, o su frecuencia de uso. Pueden ser tanto dispositivos específicos, la mayoría, como sistemas complejos.

## 2.1. AIREADORES/PERLIZADORES

---

Los denominados aireadores o perlizadores son dispositivos cuya función es mezclar el agua a presión procedente de la instalación con aire exterior para generar una vena de agua que, manteniendo la apariencia y la consistencia de un potente chorro, suministre mucha menos agua de la que entregaría un grifo equipado con un regulador de chorro estándar.

Lo que hace el aireador es mezclar, justo en la salida del grifo, el agua procedente de la tubería de alimentación con aire y así generar un chorro más “emulsionado”. Al contacto con cualquier cuerpo se observa sobre su superficie unas pequeñas perlas de agua, lo que da nombre al dispositivo, que están llenas de aire en su interior.

El efecto conseguido al mezclar el aire con el agua es que se entregue mucho menos volumen de agua sin que el usuario perciba una merma en la cantidad de fluido que sale por el grifo.

Técnicamente, la forma de mezclar el aire y el agua se da gracias al denominado efecto Venturi. En un punto del aireador se genera un estrechamiento que aumenta la velocidad del fluido y se produce una depresión. Al estar tan cerca de la salida del grifo, y gracias a la cavidad que queda entre la parte exterior del perlizador y su soporte, el aire entra en el perlizador por efecto de la depresión producida. Dentro del perlizador, el aire se mezcla con el agua saliendo de una forma homogénea. En la Figura 3.1 se puede observar la sección de un perlizador. El aire que penetra entre el aireador y su soporte se introduce y mezcla a través de los orificios rectangulares.

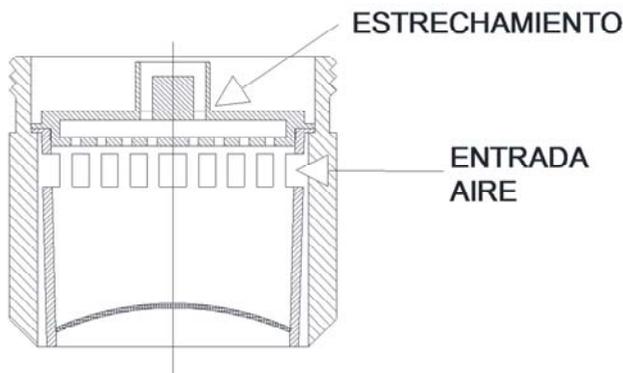


Figura 3.1. Sección de un perlizador

Aunque a primera vista pueda parecer que el tipo de aireador elegido no es condicionante, lo cierto es que existen diferentes tipologías de aireadores y que es muy importante seleccionar la más adecuada dependiendo de la aplicación.

La primera clasificación que puede realizarse depende del tipo de rosca del soporte del aireador. Si bien, existen aireadores sin soporte, que se montan sobre soportes de griferías ya existentes, lo normal es que el aireador vaya con su propio soporte. Así, el soporte puede ser de rosca macho o de rosca hembra. El tipo de rosca lo condiciona la grifería sobre la que va instalada. En los grifos de lavabo y bidé la rosca es de tipo hembra generalmente, lo que obliga a que el aireador sea de tipo macho. En cambio, en los grifos de fregadero, la rosca del grifo es normalmente de tipo macho, lo que obliga a la situación alternativa.

Los aireadores también pueden distinguirse por el caudal máximo entregado. En el mercado existen aireadores de 5; 6; 7,8; 8 y 12 l/min. Cada uno de ellos es adecuado a un tipo de grifo. Evidentemente, cuanto menor es el caudal máximo que entregan, más costoso es el aireador. De ahí que sea interesante ajustar la preselección del dispositivo al grifo en el que va ir montado.

En general, los aireadores de entre 5 y 6 l/min son adecuados para lavabos y los aireadores entre 7,8 y 12 l/min para fregaderos, vertederos o duchas (las bañeras no suelen montar aireadores porque lo que se pretende es llenar un volumen de agua, independientemente de si se llena a más o menos caudal).

En cualquier caso, hay que hacer notar que estos valores corresponden a caudales máximos entregados por el grifo en condiciones de presión elevada (a partir de 2,5 bares) como se puede observar en la Figura 3.2. Si la presión a la entrada del grifo está por debajo de esos valores, los caudales entregados se reducen. Es posible que haya instalaciones en las que la baja presión disponible, permita unos consumos de agua ajustados sin la necesidad de instalar aireadores.

El aireador presenta una ventaja sobre otros sistemas reductores de caudal y es su gran versatilidad. Un aireador se puede colocar en cualquier grifo, independientemente de su diseño, sin que modifique su apariencia, siempre y cuando sea un grifo normalizado. Además, es fácilmente instalable por cualquier persona sin tener conocimientos de fontanería y su limpieza se puede realizar de la misma forma que la de cualquier homogenizador de chorro.

A la hora de implantarlo sólo hay que tener en cuenta que en las viviendas, que es la tipología de edificación más estándar, es habitual que haya dos lavabos, cuando no tres si uno de los baños cuenta con lavabo doble. En cada grifería de lavabo se instala un perlizador. El consumo en lavabos en la vivienda se puede realizar en cualquiera de

ellos pero es único. Por lo tanto a la hora de valorar este sistema, hay que considerar el coste de inversión de todos los que hay instalados en la vivienda pero considerar sólo una vez su consumo. De esta forma los costes de inversión duplican o triplican los del equipo para un mismo consumo.

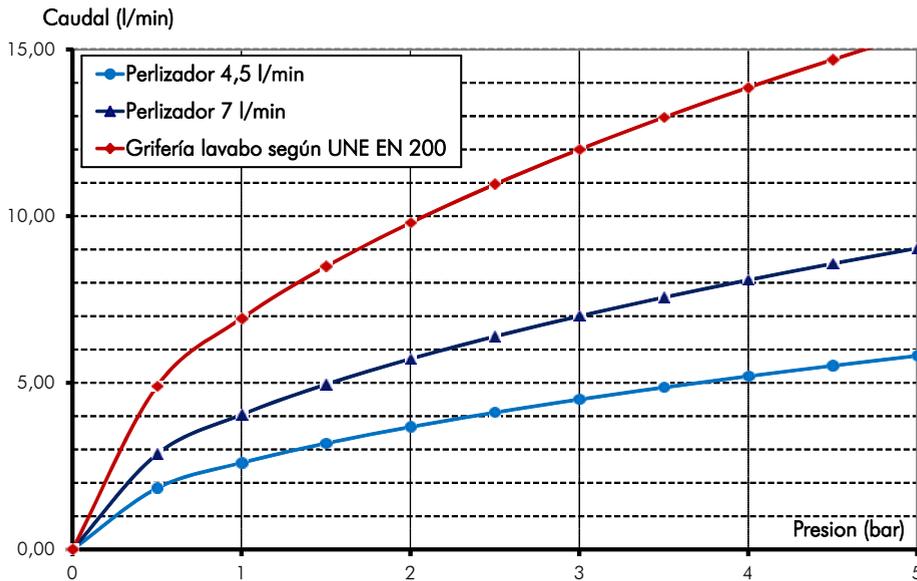


Figura 3.2. Consumos de diferentes modelos de aireador en función de la presión en el grifo

Los potenciales ahorros obtenidos con este dispositivo en comparación con un grifo estándar que cumpla la norma europea de grifos UNE-EN 200 (AENOR, 2008) tomando como referencia los de un fabricante de garantía (RST, 2015) son:

Tabla 3.1. Ahorros específicos de varios modelos de perlizadores

	Perlizador 8 l/min	Perlizador 7 l/min	Perlizador 5,5 l/min	Perlizador 4,5 l/min
Ahorro teórico	33 %	42 %	54 %	63 %

Los ahorros absolutos o reales son menores que los ahorros específicos o teóricos, por varias razones.

En primer lugar porque el propio ahorro específico está sobredimensionado con respecto a los datos reales. Para definir el ahorro específico se ha tomado como

referencia un grifo normalizado para una presión de alimentación de 3 bar en el grifo, y/o un caudal suministrado de 12 l/min. En el capítulo 2 de éste trabajo se ha comprobado como ese valor de demanda en lavabo está por encima del real, que es algo menor.

En segundo lugar, porque el propio ahorro específico, y esto sucederá para todos los dispositivos, es el correspondiente a un dispositivo de hidroeficiencia con respecto al dispositivo convencional. Ahora bien, el ahorro absoluto o real es el correspondiente a dicha reducción de demanda con respecto a la demanda global del edificio. Para obtenerlo hay que ponderar el ahorro específico del dispositivo en cuestión por el porcentaje de demanda de dicho dispositivo en el conjunto del edificio.

A modo de ejemplo, si un perlizador de lavabo supone un ahorro del 54% y el lavabo supone un 15% del consumo total de una vivienda, el ahorro absoluto de la implantación del perlizador es de sólo el 8%.

## **2.2. REDUCTOR DE CAUDAL DE DUCHAS**

---

Existen varios sistemas de reducir el caudal entregado en la ducha. El que ahora se presenta es un dispositivo que se intercala en la conexión del flexo de la ducha al mando de la misma.

Consiste en una válvula reductora de presión que, como su nombre indica, reduce la presión con la que se alimenta el cabezal de la ducha, de tal forma que el caudal que ésta es capaz de entregar se reduce igualmente.

El caudal entregado está entre los 5 a 10 l/min, según modelo (RST, 2015). Se instala en duchas, cuyo caudal según la normativa nacional vigente (ESPAÑA, 2006) debe ser como mínimo de 12 l/min, si se entrega sólo agua fría, y 18 l/min si se suministra agua fría más agua caliente sanitaria. Se consiguen ahorros específicos de entre el 17% y un 58%, según modelos, como puede observarse en la Tabla 3.2, comparando con una grifería normalizada de ducha según UNE-EN 200, que debe entregar un caudal de 12 l/min a una presión de 0,3 Mpa.

El ahorro absoluto en volumen depende de la frecuencia y duración del uso del aparato. Un reductor de ducha que reduce el caudal en un 55% cuando el consumo en las duchas supone un 15% del total de la vivienda, supone un ahorro real del 8,25%.

Tabla 3.2. Ahorros específicos de reductores de caudal de ducha

	Reductor ducha 10 l/min	Reductor ducha 8 l/min	Reductor ducha 7 l/min	Reductor ducha 5 l/min
Ahorro teórico	17 %	33 %	42 %	58 %

Presentan la ventaja, junto con otros sistemas de hidroeficiencia que se implantan en duchas que, como gran parte del caudal suministrado lo es de agua caliente sanitaria, también reducen significativamente el consumo de energía de la utilizada para calentarla.

Otra gran ventaja estriba en que se trata de un dispositivo estándar que puede ser instalado en cualquier tipo de ducha que disponga de flexo. Es por ello que es apto para rehabilitaciones de instalaciones, por cuanto que no hay que sustituir la grifería existente.



Figura 3.3. Reductores de caudal de ducha (Fte: TEHSA)

Su ventaja es a su vez su principal desventaja. Al tratarse de un dispositivo estándar se pueden instalar con cabezales de ducha que no están diseñados para una presión baja. La sensación de chorro que se consigue en la ducha es muy pobre, pareciendo que no sale caudal, como efectivamente sucede.

Para su selección, además de la limitación de caudal, hay que tener en cuenta el tamaño:  $\frac{1}{2}$ " o  $\frac{3}{4}$ ", según sea la conexión al grifo de ducha. Las operaciones de mantenimiento necesarias se dan en el desacople de la pieza a la grifería para la limpieza de filtros.

### **2.3. CABEZAL DE DUCHA CON REDUCTOR DE CAUDAL**

---

Otro de los sistemas de reducción de caudal en duchas son los cabezales de ducha con reductor de caudal. Como en el caso anterior, el sistema consiste en un mecanismo reductor de la presión de alimentación, en este caso, al cabezal de la ducha. Al reducirse la presión de alimentación, se reduce el caudal entregado.

La diferencia con los reductores de caudal está en el hecho de que el cabezal de ducha se ha diseñado para trabajar con la presión reducida, por lo que el chorro que se proyecta es homogéneo y tiene consistencia como para que el usuario perciba una sensación agradable de ducha.



Figura 3.4. Cabezal de ducha de pared con reductor de caudal incorporado (Fte: TEHSA)

Por el contrario presentan la desventaja que no son un elemento estándar, sino que tienen cierta componente de diseño. En algunas implantaciones donde este criterio de selección, como se comentará más adelante, tenga un cierto peso, los cabezales antiestéticos o estéticos pueden tener una desventaja a la hora de ser preseleccionados.

Para su selección hay que tener en cuenta que existen modelos para duchas de pared, como el de la Figura 3.4, y otros para incorporarse a flexos móviles, como el de la Figura 3.5.

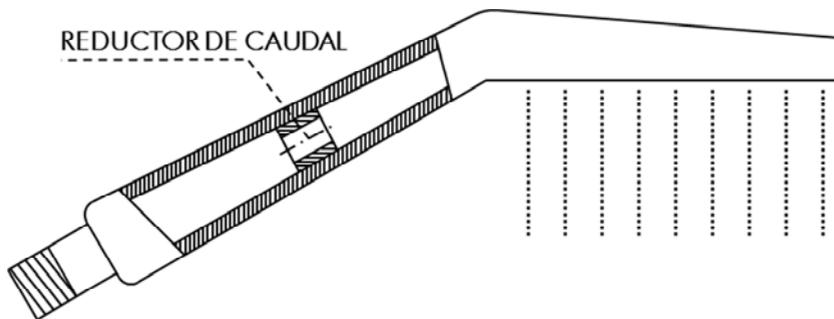


Figura 3.5. Cabezal de ducha para acoplamiento a flexo, con reductor de caudal incorporado

El rango de suministro de caudal, y por tanto de reducción del mismo, que permiten se sitúa entre los 6,3 a 10 l/min. Al igual que en otros dispositivos, estos caudales se corresponden con valores finales del ahorro para presiones de entrada superiores a 3 bares, cuando la presión disminuye los caudales entregados son menores.

Desde el punto de vista del ahorro, los conseguidos son equivalentes a los que se obtienen con reductores de caudal de ducha del mismo rango, puesto que el equipo con el que se comparan es el mismo.

Sin embargo, a diferencia de los reductores de ducha, el coste de inversión de los cabezales de ducha es mayor, y no sólo depende del ahorro de agua y energía que se obtienen con ellos. El diseño y los materiales con los que está construido condicionan el coste.

A igualdad de ahorro de agua que un reductor, el cabezal resulta más costoso. Por otro lado, si la ducha donde se incorpora un reductor de caudal no está preparada para la reducida presión, la sensación es que no cae agua y puede generar rechazo la implantación de este sistema. A priori no se puede calificar uno mejor que el otro.

## **2.4. GRIFOS DE INODORO DE BAJO CONSUMO**

---

El grifo de inodoro es el mecanismo de descarga de agua desde la cisterna hasta la taza del inodoro para su limpieza después de cada uso. El consumo del grifo de inodoro es el volumen de agua que se libera en cada descarga.

El volumen de descarga requerido depende de dos factores; por un lado está el propio diseño de la taza, para que el agua produzca la limpieza deseada es necesario que se genere un flujo a cierta velocidad y con capacidad de arrastre; por otro lado está el propio diseño de la instalación, para conseguir el efecto de transporte necesario de modo que los sólidos alcancen las bajantes se requieren unos volúmenes mínimos de agua.

El diseño de los inodoros ha ido mejorando de forma continua, de tal forma que hoy en día los volúmenes que se requieren para su limpieza son mucho menores de los 20 litros por descarga que eran necesarios hace unos años. Además, la normativa edificatoria ha limitado de forma progresiva la distancia máxima entre el inodoro y la bajante, por lo que también el volumen necesario para el transporte de los residuos sólidos en los colectores de los inodoros se ha reducido.

Otro factor a tener en cuenta es la mejora de la gestión del agua que ha evidenciado que las necesidades de volúmenes de descarga cuando no se produce la evacuación de sólidos son mucho menores.

Por todo ello, se han desarrollado grifos de descarga que utilizan menores volúmenes de descarga y que discriminan la evacuación de sólidos de la evacuación única de líquidos.

Se debe tener en cuenta que en instalaciones en las que no se cumplan las condiciones de funcionamiento con bajo consumo indicadas, la incorporación de grifos de descarga de bajo consumo puede provocar problemas de funcionamiento de la instalación de evacuación.

Los grifos de descarga de inodoro consumen un volumen de descarga completa entre 4 y 9 litros, según el modelo de taza. Los modelos de inodoro que consumen 4 litros se pueden permitir un consumo tan reducido porque han sido diseñados para descargas completas a distancias entre inodoro y bajante inferiores a 1 metro. El estándar hoy en día está en torno a los 9 litros por descarga. En descarga parcial, la que se produce cuando se evacuan líquidos exclusivamente, los volúmenes se pueden reducir al 50%.

Los inodoros de nueva generación ya equipan cisternas de bajo consumo, si bien coexisten en el mercado dos configuraciones: los mecanismos de doble pulsador, frente a los de descarga interrumpible.

Los mecanismos de descarga interrumpible permiten iniciar la descarga en el momento de su pulsación y ser interrumpida en cualquier momento al volver a pulsar el grifo; mientras en los de doble pulsador, el volumen de la descarga parcial no está fijado de antemano al variar de una descarga a otra debido a la acción voluntaria del usuario.

Este sistema presenta una desventaja por la falta de identificación que lo distinga de los mecanismos convencionales de descarga, que no son de bajo consumo. Sin embargo, como se comentará más adelante, tiene algunas ventajas que los hace más indicados en edificios privados.

El mecanismo de doble pulsador dispone de dos botones. Un botón produce la descarga completa de la cisterna y generalmente está reservado para la evacuación de sólidos, el segundo botón produce la descarga parcial de la cisterna y se reserva para la evacuación de líquidos.

El volumen de descarga parcial es fijo, aunque puede regularse. Presenta la ventaja de ser fácilmente identificable por los dos botones con los que cuenta el grifo, esto hace que esté especialmente indicado en edificios de pública concurrencia, frente a los mecanismos de descarga interrumpible.

Como desventaja, al tener fijo el volumen de descarga, en descargas parciales es muy posible que no se produzca la limpieza completa del inodoro. Es frecuente que al miccionar, el usuario utilice algún tipo de papel o toallita para su higiene personal que después arroja al inodoro. Al tratarse de una descarga parcial pero en la que se arrastran sólidos, no se genera la limpieza deseada. En este caso el usuario vuelve a realizar una descarga parcial o finaliza con una descarga completa impidiéndose el ahorro de agua.

Para evitar esta situación son más adecuados los mecanismos de descarga interrumpible. El usuario inicia la descarga y, cuando observa que se ha limpiado el inodoro, la interrumpe. Se evita con ello la doble descarga.

Los potenciales ahorros específicos que se pueden obtener, según (ECODES, 2008) y (López-Patiño et al., 2012) varían según sea un mecanismo de descarga interrumpible o mecanismo de doble descarga. En la Tabla 3.3 se presentan algunos resultados.

Tabla 3.3. Ahorros específicos de mecanismos de cisterna

	Doble pulsador	Descarga interrumpible
Ahorro	44-70%	55-60%

## 2.5. GRIFERÍAS AUTOMÁTICAS

---

Las griferías automáticas son dispositivos que abren y/o cierran el paso de agua de forma autónoma sin la intervención directa del usuario. De esta forma, se puede controlar el tiempo de suministro de caudal en el aparato, ajustándolo al tiempo de uso del mismo. El ahorro en el volumen de agua consumida, no se produce por el caudal suministrado sino por el tiempo durante el cual se consume este caudal.

El uso de este sistema está indicado en edificios en los que los usuarios, bien por descuido o por dejadez, dejan las griferías en marcha, malgastando el agua al producirse un suministro continuo sin consumo. Por tanto, es en los edificios públicos donde se encuentra el principal campo de aplicación. De hecho, la legislación de ámbito nacional (ESPAÑA, 2006), a través del documento básico DB-HS4. Suministro de agua, obliga a instalar este tipo de equipos en todos los edificios de este tipo.

En un edificio privado en el que es el propio usuario el que atiende la factura de consumo de agua, éste se preocupa de que los grifos queden cerrados después de cada uso y por ello, el uso de griferías automáticas no tiene tanta utilidad. En general, tendrá sentido utilizar griferías automáticas allá donde el usuario no esté vinculado directamente al pago de los consumos de agua.

Existen diferentes morfologías de este sistema: las griferías temporizadas, cuyo accionamiento puede ser mecánico o electrónico; y las griferías de infrarrojos, individuales o colectivas.

En las griferías temporizadas mecánicas la apertura del grifo se produce de forma manual. El usuario pulsa el grifo para obtener caudal y al cabo de un cierto tiempo, y por efecto de un resorte, el grifo cierra de forma automática. El tiempo de apertura puede ser regulado actuando sobre el resorte.

El funcionamiento de las griferías temporizadas electrónicas es parecido al de las mecánicas, la apertura también es manual y activada por el usuario. El usuario activa el grifo y al cabo de un cierto tiempo, y por acción de un solenoide, se produce el cierre.

Este tipo de grifería, requiere de electricidad que actúe sobre el solenoide lo cual las encarece notablemente, ya que o bien se alimentan con baterías, o deben ser conectadas a la corriente eléctrica. Su ventaja con respecto a las mecánicas reside en la posibilidad de programar los tiempos de apertura según las circunstancias.

En las griferías de infrarrojos la apertura y el cierre están comandados por la interrupción de un haz de luz infrarroja, entre un emisor y un receptor. Al igual que los sistemas temporizados electrónicos requieren de la alimentación con electricidad, lo que también las encarece. En el mercado es posible encontrar tanto sistemas individuales como colectivos.

Los sistemas individuales se instalan en lavabos, inodoros y urinarios. El usuario al utilizar el aparato interrumpe el haz de luz infrarroja; en los lavabos esto provoca la apertura del grifo que vuelve a cerrar en el momento que cesa la interrupción del haz; en inodoros y urinarios, el haz se restaura al finalizar el uso y es entonces cuando se produce la descarga de agua.

Los sistemas colectivos dan servicio a varios urinarios instalados en un mismo núcleo húmedo, instalándose de esta forma para reducir el coste del sistema. Su aplicación no es tanto para reducir el consumo de agua sino para garantizar la limpieza del urinario ya que, con el hecho de que sólo uno de los aparatos sea utilizado se activan todos los que son controlados por el sistema de infrarrojos, multiplicándose así el consumo de agua por el número de aparatos que gobierna el sensor de infrarrojos.

Como la reducción del volumen consumido que se consigue no está tanto en la demanda sino en el despilfarro de agua, el ahorro obtenido con los sistemas individuales varía mucho con el emplazamiento, con la concienciación de los usuarios, etc. Es por ello que es muy difícil de evaluar.

No obstante, en la Tabla 3.4 se indican algunos valores tomados de la bibliografía (ECODES, 2008)

Tabla 3.4. Ahorros específicos de sistemas temporizados

Aparato	Urinario	Fluxor	Lavabo	Lavabo	Lavabo
Regulación	Temporizado mecánico	Temporizado mecánico	Temporizado electrónico	Temporizado mecánico	Infrarrojos
<b>Ahorro</b>	75%	50%	70%	70%	70%

## 2.6. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

---

Una válvula reductora de presión (VRP) es una válvula automática que mantiene constante la presión en su extremo de salida siempre que la presión en su extremo de entrada sea superior a ella. La presión a la salida que hay que mantener puede ser fijada por el usuario o estar predefinida de fábrica, y es lo que se conoce como presión de tarado de la válvula.

La forma en que la válvula reduce la presión es cerrando parcialmente para provocar una pérdida de carga (pérdida de presión) puntual en su interior. Si la presión a la entrada es mayor cerrará más para que caiga más la presión. Si la presión a la entrada es menor, cierra menos y produce menos pérdida de carga. En caso que la presión a la entrada sea inferior a la presión de tarado, la válvula abre completamente y apenas produce pérdida de presión.

En un edificio, la válvula reductora de presión se instala a la entrada de la vivienda, en edificios residenciales o en la derivación desde la montante a cada planta, en edificios colectivos. Al reducir la presión al inicio de la instalación, el caudal entregado, a igualdad de condiciones, se reduce según la relación:

$$Q_{HW,max} = Q_{0,max} \sqrt{\frac{P_{VRP}}{P_{VIV}}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

- $P_{VRP}$  es la presión de tarado a la salida de la válvula reductora, inicio de la instalación;
- $P_{VIV}$  es la presión a la entrada de la vivienda (o en la derivación de la montante) que habría si no se instala la válvula reductora de presión
- $Q_{0,max}$  es el caudal que se suministra en cualquier grifo o combinación de ellos si la presión a la entrada de la vivienda es  $P_{VIV}$
- $Q_{HW,max}$  es el caudal que se abastece en el mismo grifo o combinación de ellos con la incorporación de la válvula reductora

Normativamente, el Código Técnico de la Edificación, en su documento básico DB-HS4 obliga a que la presión máxima a la entrada de la vivienda sea de 500 MPa, ó 5 bar. La presión máxima de tarado de la válvula reductora será, por tanto, de este valor. Sin embargo, es posible reducir más la presión a la entrada de la vivienda, de tal forma que los ahorros de agua serán mayores. La mínima presión de debe existir a la entrada de la vivienda debe ser de 1,5 bar, impuesto también por el Código Técnico de la

Edificación. Por tanto, la válvula reductora de presión puede estar tarado entre una presión de 1,5 a 5 bar. A menor presión, mayores ahorros de agua.

De la ecuación 1 se obtiene el ahorro porcentual del caudal. Expresado en tanto por ciento, obedece a la relación:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \left( 1 - \sqrt{\frac{P_{VRP}}{P_{VIV}}} \right) 100 \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

- $\Delta Q$ , es la reducción de caudal como consecuencia de la regulación de presión en la vivienda.

A modo de ejemplo, para un edificio de viviendas de 14 alturas, con 3 metros de altura entre forjados, un único grupo de presión que abastece desde la planta 5, y para que en la planta más desfavorable dispongan de la presión mínima en la entrada a la vivienda (1,5 bar), la presión estática a la entrada de la vivienda de planta 5 es de 4,2 bar. Este valor se obtiene sumando a los 1,5 bar de presión mínima que hay en la planta 14, la presión debida a la columna de agua que hay entre la planta 5 y la planta 14, que es de  $9 \cdot 3 = 27 \text{ mca} = 2,7 \text{ bar}$ .

El edificio cumple con el código técnico de la edificación, por lo que realmente sólo requiere de un único grupo de bombeo, pero que tiene un consumo excesivo en las primeras plantas abastecidas desde el grupo de presión debido al exceso de presión. En la Tabla 3.5 se puede comprobar el porcentaje de ahorro de agua que se produce, para un mismo grifo o conjunto de grifos abiertos en las viviendas de cada planta, por el hecho de disponer de una válvula reductora de presión a la entrada.

Como se observa en la Tabla 3.5, la válvula reductora de presión no es necesaria si se produce un escalonamiento de presiones en el edificio. Una adecuada distribución sería disponer de un grupo de bombeo para cada cinco plantas.

La válvula reductora de presión actúa sobre el conjunto de toda la instalación, a diferencia de los reductores de caudal de los grifos que actúan de manera localizada y directa sobre el punto de consumo. Ambos tipos de dispositivos funcionan de la misma forma por lo que la colocación de las VRP es incompatible con la implantación de reductores de caudal en grifos.

Incluso con la instalación de VRPs, en instalaciones grandes de edificios colectivos, puede haber grandes diferencias de la presión de alimentación a los grifos dentro de

una misma planta si las distancias entre los que están más cerca de la montante y los más alejados son grandes. En general, la colocación de dispositivos de reducción de caudales individuales y localizados es siempre mejor que la instalación de válvulas reductoras, pero éstas resultan una solución más económica.

Tabla 3.5. Presiones y diferencias de consumos para un edificio de 14 alturas, sin y con válvula reductora de presión. Para presiones de tarado de 30 mca y 15 mca.

PLANTA	COTA (m)	PRESIÓN VIVIENDA (mca)	PRESIÓN VÁLVULA REDUCTORA (mca)	PORCENTAJE AHORRO CAUDAL	PRESIÓN VÁLVULA REDUCTORA (mca)	PORCENTAJE AHORRO CAUDAL
ÚLTIMA -9	19	42	30	15%	15	40%
ÚLTIMA -8	22	39	30	12%	15	38%
ÚLTIMA -7	25	36	30	9%	15	35%
ÚLTIMA -6	28	33	30	5%	15	33%
ÚLTIMA -5	31	30	30	0%	15	29%
ÚLTIMA -4	34	27	30	-	15	25%
ÚLTIMA -3	37	24	30	-	15	21%
ÚLTIMA -2	40	21	30	-	15	15%
ÚLTIMA -1	43	18	30	-	15	9%
ÚLTIMA	46	15	30	-	15	0%

Para la selección de la válvula hay que tener en cuenta el diámetro de la conducción sobre la que va ir montada y la presión de tarado de la misma. Hoy en día existen dispositivos para ser instalados en línea, como el de la Figura 3.6, y otros que van instalados a 90°. Estos últimos disponen de sistemas mecánicos, mediante tornillo, que permiten modificar la presión tarado. Para el resto la modificación de la presión tiene que efectuarse cambiando el muelle contra el que trabaja el obturador de la válvula.

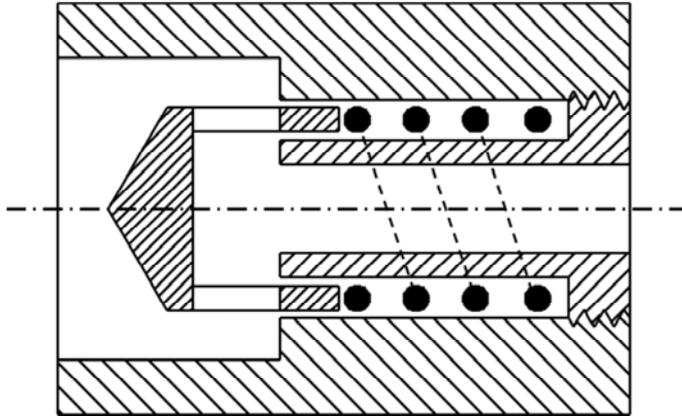


Figura 3.6. Válvula reductora de presión en línea

## 2.7. GRIFERÍA MONOMANDO DE APERTURA EN DOS POSICIONES

Es muy frecuente que, en griferías de tipo monomando, el accionamiento del mando sea todo o nada, aunque los carretes cerámicos que controlan la apertura están diseñados para regular el caudal en cualquier posición intermedia.

La grifería de apertura en dos posiciones dispone de un carrete cerámico que ofrece cierta resistencia a la apertura en una posición intermedia. Cuando el usuario abre el grifo sin control, la apertura no se produce al 100%.

El recorrido del carrete en la apertura intermedia es del 50% por lo que el caudal entregado en esta posición suele ser el 50% del caudal nominal del grifo.

Si el usuario realmente necesita un mayor caudal, por ejemplo para el llenado de un recipiente, entonces basta con ejercer una ligera presión sobre el mando para vencer la resistencia de la apertura en la posición intermedia. Así se puede abrir el grifo al máximo y conseguir que se entregue todo el caudal del que es capaz.

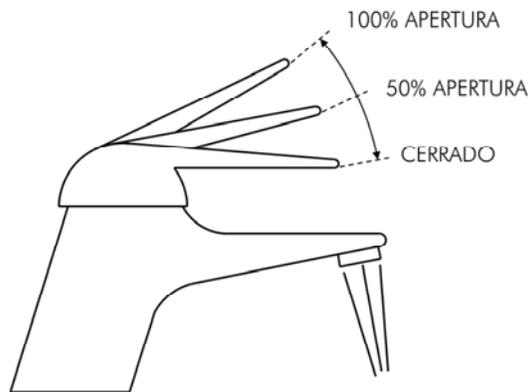


Figura 3.7. Grifo de apertura en dos posiciones

Su uso es adecuado en instalaciones donde haya personas con poca capacidad de control de sus movimientos como personas mayores o niños. Así, es adecuado para equipar residencias de ancianos o escuelas infantiles.

El porcentaje de ahorro específico que se consigue con este tipo de dispositivos es del 50% con respecto a una grifería estándar.

La reducción en el ahorro absoluto por motivos técnicos no es tan alta, puesto que los usuarios, de manera inconsciente, no abren los grifos monomando al 100%, sino que tienden a regular a una posición de confort en la que se suministra agua con la suficiente intensidad pero sin que produzcan salpicaduras. Este hecho se puede constatar de las encuestas de consumo realizadas para este trabajo y expuestas en el capítulo 2.

## **2.8. GRIFERÍA MONOMANDO DE APERTURA EN FRÍO**

---

En realidad no es un sistema de ahorro de agua como tal, sino que está diseñado para ahorrar energía de la destinada a producir agua caliente sanitaria.

En muchos grifos monomando es muy habitual que el usuario, por cuestiones estéticas, coloque el mando del grifo en posición central. En un grifo convencional, la apertura en posición central provoca que se ponga en funcionamiento el productor de agua caliente sanitaria aunque realmente no se requiere el uso de agua caliente.

El sistema consiste en un grifo monomando que sólo tiene un recorrido de 90° en lugar de los 180° grados habituales. La apertura en posición central corresponde a la posición de frío, mientras que la apertura en posición de 90° corresponde a la posición de caliente.

La forma de operar de la grifería monomando en posición fría se limita a zonas climáticas cálidas, donde no se requiere de agua caliente de forma generalizada. En zonas climáticas frías, el uso de agua caliente en los lavabos es frecuente, por lo que no se suele demandar agua sólo fría.

Este tipo de dispositivos tendrá más utilidad y será más interesante en ubicaciones de climas cálidos o templados.

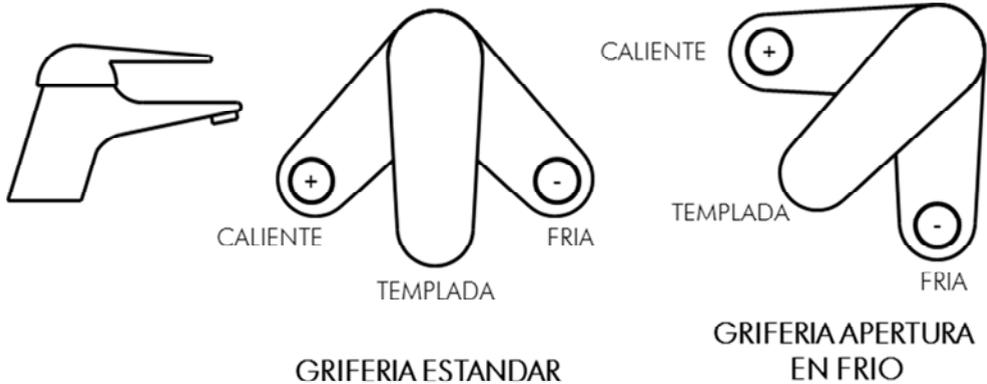


Figura 3.8. Grifería de apertura en frío frente a una apertura convencional

Según la bibliografía (ECODES, 2008), con este tipo de griferías se pueden obtener reducciones del 65% en el consumo de energía específica, la correspondiente al consumo del A.C.S. en el lavabo. Lo que sucede es que el ahorro real es mucho menos elevado por el escaso uso que se hace del A.C.S. en las zonas que se pueden considerar como de uso predominante de sólo agua fría, y el escaso uso que se puede hacer de una grifería de esta morfología en ubicaciones de clima frío.

En la Tabla 3.6 se ha añadido una comparativa del ahorro absoluto de diferentes dispositivos tomando como referencia la curva de reparto de demandas de la tabla 2.13 del capítulo 2.

Se puede observar como con el aireador de 5,5 l/min, a pesar de tener un buen ahorro específico del 45%, y al ponderar con el reducido porcentaje que supone el consumo en lavabos, se obtiene solo un 3,2% de ahorro global. Por el contrario, el mismo dispositivo instalado en un grifo de fregadero consigue ahorros del 10%.

Tabla 3.6. Comparativa de ahorros específicos y absolutos de diferentes dispositivos de ahorro, para demandas en vivienda

Dispositivo	Aireador 5,5 l/min	Reductor de ducha 7 l/min	Cabezal ducha 8 l/min	Grifo inodoro doble pulsador	Grifo apertura 2 posiciones
	Ahorro específico	45%	42%	33%	70%
Aparato	% demanda global	Ahorro absoluto			
Lavabos	7,1	3,2 %			3,6 %
Ducha	24,8		10,4 %	8,2 %	
Baño	0,5				
Inodoro	11,5			8,1 %	
Fregadero	24,0	10,8 %			
Lavadora	18,1				
Lavavajillas	5,1				
Lavadero	8,7				

Los dispositivos que mayor ahorro absoluto de agua consiguen son aquellos que se instalan en aparatos que consumen un gran porcentaje de la demanda total, más que aquellos que tienen grandes ahorros específicos.

### 3. FUENTES ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO

---

Se consideran en este grupo aquellos sistemas de hidroeficiencia que en lugar de reducir la demanda, aumentan la oferta de agua de una fuente alternativa a los recursos naturales convencionales.

En este grupo se consideran los sistemas de aprovechamiento de lluvia a nivel localizado, los sistemas de reutilización de aguas usadas, y los sistemas de recogida y aprovechamiento de condensados.

#### 3.1. SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA

---

El “sistema de aprovechamiento de aguas pluviales” (SAP) utiliza el agua de lluvia recogida en el edificio para su uso posterior en los aparatos que no requieran agua de calidad de boca (inodoros y riego)

Consiste en un conjunto de elementos que captan el agua de lluvia caída sobre una superficie, la almacenan, la bombean, y la distribuyen hasta los puntos de consumo.

No es una solución técnicamente novedosa ya que era utilizada en la antigüedad como fuente de recursos. Los romanos ya aprovechaban el agua de lluvia a través de sus *impluvium* (Thomas y Wilson, 1994). Lo que hoy en día se trabaja son soluciones más avanzadas técnicamente, sobre todo desde el punto de vista de la calidad del agua utilizada.

En países poco desarrollados o en regiones donde hay escasez de recursos hídricos, los SAP pueden seguir siendo una fuente importante de obtención de agua para consumo. En entornos desarrollados el aprovechamiento del agua de lluvia es una forma de mejorar la gestión de la demanda de agua. La aproximación al diseño y dimensionado de los elementos del sistema es muy distinta en ambos casos.

Mientras que en las zonas de escasez de recursos, lo que se pretende es captar el máximo de precipitación posible, en las aplicaciones donde se busca una mejora en la gestión de la demanda, se combina el aprovechamiento de los recursos hídricos con la optimización de los recursos económicos, buscando diseños óptimos y eficientes.

El planteamiento que se va a desarrollar en este trabajo es el más sencillo, en el cual se busca el máximo aprovechamiento sin entrar en la optimización de los equipos.

Si bien no existe una legislación nacional que regule la utilización de las aguas pluviales dentro del ámbito edificatorio, la propia calidad del agua obtenida limita sus usos (ESPAÑA, 2015). Aunque en origen la lluvia, generada por condensación del vapor de agua, es agua en estado puro, al precipitarse y atravesar la atmósfera reacciona con sus componentes para formar distintos ácidos. Con los óxidos de azufre, presentes en la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles, reacciona para formar ácido sulfúrico. Pero incluso en zonas poco contaminadas reacciona con el dióxido de carbono presente en el aire para formar ácido carbónico. De ahí que el agua de lluvia sea ligeramente ácida, lo que obliga a tener cierto cuidado en sus usos.

En general, las aguas pluviales son usadas en los edificios residenciales para el riego de jardines, y en la descarga de inodoros. En edificios de uso industrial para el agua de proceso, siempre y cuando no sea para la producción y tratamiento de alimentos, y en agua de limpieza.

Debido a la falta de calidad que tiene, es importante que no se produzca cruzamiento entre la red de distribución de agua de lluvia aprovechada y la red de agua potable del edificio. Para ello se diseñará la instalación adecuadamente para evitarlo, siendo éste uno de los principales condicionantes del diseño. Hay que tener en cuenta que es posible que en un momento determinado no existan remanentes de agua pluvial almacenada para dar servicio a un determinado uso y haya que utilizar agua de la red general. Por ello cada aparato que aproveche el agua de lluvia debe disponer de una

doble alimentación, y es ahí donde existe el riesgo de contaminación de la red de agua potable con la red de agua de lluvia.

Los edificios que aprovechen el agua de lluvia deben disponer de una doble red de suministro de agua: la red de agua potable que da servicio a todos los aparatos de consumo de agua, incluidos los aparatos que pueden utilizar el agua de lluvia; y la red de distribución de agua de lluvia. Esto encarece el sistema sólo por el hecho de existir, al margen de los costes propios de los elementos que formarán el sistema: depósitos, bombas, etc.

En general las aportaciones de los sistemas de aprovechamiento de pluviales, y por tal motivo el ahorro de la demanda de recursos naturales convencionales, depende mucho de las características del edificio en cuestión y los consumos que se producen en él.

En los edificios en altura el aprovechamiento de las aguas pluviales es poco aconsejable o, al menos, debe reducirse sólo a una parte del edificio. La inversión que supone las instalaciones adicionales que hay que realizar no compensa los pocos recursos hídricos que se obtienen.

El recurso obtenido es de coste nulo, y el precio del agua producida va a tener en cuenta solamente los costes de amortización de equipos y de operación, básicamente bombeo, del sistema.

Es por ello que un adecuado, y hasta cierto punto optimizado, dimensionado del sistema de aprovechamiento de pluviales al edificio en cuestión es fundamental para garantizar su implantación.

En general, debido a que es un sistema que sólo ahorra agua, y no energía, y a los actuales precios del recurso, son sistemas que se amortizan a muy largo plazo.

En cualquier caso, como el sistema es suficiente complejo, se le va a dedicar un capítulo específico dentro de este trabajo, en el que se incidirá en las diferentes tipologías del sistema y en el dimensionado de cada uno de sus elementos.

### **3.2. SISTEMAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS USADAS**

---

Se considera como agua residual la que ya ha sido utilizada en el edificio, sea cual sea su procedencia. Para ciertos usos en el edificio para los que no se requiere de una calidad de agua potable de boca, se puede volver a usar el agua ya utilizada y convenientemente tratada. Esto es lo que se considera, en general, un sistema de reutilización de aguas usadas o de reutilización de aguas residuales.

Para los edificios de tipo no industrial, el grado de contaminación es leve y el aprovechamiento que se realiza de las aguas usadas está más generalizado. Para los usos industriales, en los que no se pretende entrar en este documento, la reutilización de las aguas usadas es mucho más específica de cada industria porque lo es el tipo de contaminación, generalmente de tipo químico, al que se ven afectadas las aguas de suministro.

En edificios de uso no industrial, dependiendo del grado de contaminación de las aguas residuales se pueden distinguir las aguas negras y las aguas grises. En general, las aguas negras son las que contienen grasas o coliformes, producidos al transportarse aguas con contenidos fecales. Requieren de un tratamiento de depuración mayor y su reutilización es más complicada. Las aguas grises son las contaminadas sin residuos fecales. Debido a la menor contaminación es más fácil depurarlas y volverlas a utilizar, aunque ésta observación requiere de ciertas puntualizaciones como se comentará más adelante.

En España, el uso de las aguas residuales regeneradas está regulado por el R.D. 1620/2007 (ESPAÑA, 2007b). En dicho Real Decreto se establece, entre otras cosas, qué es lo que se considera como aguas reutilizables, los usos admitidos, y la calidad de agua exigible a las aguas regeneradas.

No obstante, la interpretación exhaustiva de la legislación deja fuera del ámbito de aplicación la regeneración de aguas dentro del edificio para consumo propio. A pesar de ello, resulta una buena práctica seguir las exigencias legislativas del Real Decreto.

En el edificio, y en un sentido amplio, se consideran aguas grises las procedentes de los lavabos, duchas, bidés, y de las lavadoras. En la mayoría de casos, el agua procedente de las lavadoras no se considera como agua gris, más por cuestiones técnicas al encontrarse en un núcleo húmedo distinto de las demás, que por motivos reales. El agua consumida en el resto de aparatos se considera como aguas negras.

La contaminación de las aguas grises es básicamente química debida a los contenidos de los jabones, y es más fácil de tratar.

No obstante, en determinados momentos puntuales, las aguas procedentes de las duchas pueden transportar material fecal que no es eliminado en los procesos de depuración más simples. Cualquier persona que haya duchado a un bebé se puede imaginar tal situación. Este hecho se puede constatar observando los datos reales de DBO<sub>5</sub>, demanda biológica de oxígeno a los 5 días de tratamiento. Indica el contenido de materia orgánica que hay en un agua residual, de la Tabla 3.7. Esta es la razón por la cual, algunos sistemas de reutilización de aguas grises incluyen los mismos tratamientos a los que se someterían las aguas negras.

Tabla 3.7. Composición de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

	AGUAS FECALES (suponiendo 210 l/hab·d)	CONTENIDO TEÓRICO DE LAS AGUAS GRISES	CONTENIDO REAL DE LAS AGUAS GRISES*
DBO5	392 mg/l	-	102 mg/l
SS (sólidos en suspensión)	436 mg/l	150 mg/l	256 mg/l
NH3	14 mg/l	1,1	0,4 mg/l
N ORGÁNICO	43 mg/l	-	-
P ORGÁNICO	7 mg/l	-	-
P INORGANICO	12 mg/l	15 mg/l	14 mg/l
GRASAS	70 mg/l	-	32 mg/l
COLIFORMES	108 ud/100 ml	1·10 <sup>5</sup> ud/100 ml	15·10 <sup>5</sup> ud/100 ml

\* (Friedler y Galil, 2003)

El proceso de depuración de aguas utilizadas se puede resumir en una serie de etapas:

- Pretratamiento: Es un proceso físico de filtración mediante el cual se eliminan los objetos gruesos, y las grasas.
- Tratamiento primario. Es un proceso físico y químico en el que por decantación, con la aportación de coagulantes y floculantes, se eliminan los restos orgánicos más pesados. La legislación española (ESPAÑA, 1995) establece que el tratamiento primario debe eliminar el 20% de la DBO5 y un 50% de los sólidos en suspensión
- Tratamiento secundario. Un proceso biológico y físico mediante el cual se eliminan la materia orgánica que contiene disuelta el agua. El proceso biológico es la acción de determinados tipos de bacterias que actúan sobre la materia orgánica consumiendo oxígeno en el proceso. La demanda de oxígeno consumido por las

bacterias en un determinado periodo de tiempo manifiesta el contenido de materia orgánica presente en el agua residual, es el denominado DBO.

Para mantener el proceso es necesario aportar el oxígeno necesario mediante sistemas de aireación.

Como resultado de la acción de las bacterias se generan fangos que se decantan en un proceso físico. Parte de estos fangos son eliminados y parte, debido a su elevado contenido en bacterias, son devueltos al proceso.

- Tratamiento terciario. Es un proceso fisicoquímico con posterior desinfección para conseguir un efluente de mejor calidad. El agua "regenerada" es ahora apta para ser reutilizada. La desinfección se realiza con aporte de cloro, o mediante tratamientos con ultravioleta UV, o con membranas filtrantes.

Las aguas regeneradas mediante tratamiento pueden ser utilizadas para consumos que no sean de boca. La legislación (ESPAÑA, 2007b) permite el uso de aguas regeneradas en el ámbito residencial para el riego de jardines y para la descarga de inodoros, exclusivamente, y siempre y cuando la instalación de depuración de aguas esté sometida a un correcto mantenimiento.

No todos los equipos de depuración disponen de todas las etapas y de hecho ahí radica la diferencia entre ellos.

En el mercado coexisten varias tipologías de sistemas de reutilización de aguas grises. De un lado, los equipos más simples incorporan sólo un tratamiento primario mediante filtración física. Los equipos complejos incorporan tratamiento secundario con aireación. De entre ellos, los más sofisticados disponen, además, de un tratamiento con membranas de ultrafiltración MBR en el depósito de aireación que aumentan la eficiencia de la depuración y reducen el tamaño del equipo. En todos los casos los equipos deben incorporar, y de hecho lo hacen, desinfección final, bien mediante cloro o mediante ultravioleta.

La diferencia en coste de inversión de los sistemas es muy notable, pero también su capacidad de depuración.

Los sistemas con filtración física no garantizan la eliminación de la materia orgánica que contienen las aguas residuales. En teoría, como se indicó en la Tabla 3.7, las aguas grises no contienen materia orgánica, en forma de DBO<sub>5</sub>, por lo que los sistemas con filtración física son teóricamente válidos. Su coste es muy inferior al de otros sistemas.

Los sistemas con ultrafiltración mediante biorreactores tienen una eficiencia bastante más elevada, como se puede comprobar en la Tabla 3.8, pero por el contrario tienen unos costes de inversión, instalación y mantenimiento también más elevados.

En el mercado existen otro tipo de sistemas de reutilización de aguas grises que vierten directamente el agua evacuada en la ducha al inodoro. El sistema es muy económico pero carece absolutamente de ningún tipo de tratamiento. En teoría, las aguas residuales no se descomponen inmediatamente después de su vertido y es por ello que estos sistemas no incorporan tratamiento alguno. Si toda el agua recogida en la ducha (entre 30 y 60 litros) se va a utilizar inmediatamente en los inodoros (entre 5 y 8 descargas) no hay problema en que se utilicen estos sistemas. El problema reside en la dificultad de verificación de este patrón de consumo.

A la hora de evaluar un sistema de reutilización de aguas residuales hay que tener en cuenta que al coste de inversión hay que sumar el coste de mantenimiento y el coste de operación del sistema.

El mantenimiento de la instalación depende del tipo de depurador que se haya instalado.

En el caso de depuradores simples con filtración física, hay que proceder a una limpieza de filtros cada 2 o 3 meses.

Para los filtros biológicos hay que proceder a la retirada de fangos que se generan en el proceso de oxidación biológica. Además, en algunos casos se debe realizar la reposición de las bacterias que son muy sensibles a determinados productos de limpieza. El uso de lejías en la limpieza de las duchas llega hasta el biorreactor y elimina las bacterias que allí se encuentran. Es necesario realizar un mantenimiento continuo del equipo para verificar su correcto funcionamiento.

Por otro lado están los costes de operación. En todos los casos hay un coste asociado al bombeo del agua regenerada hasta los puntos de consumo. Este bombeo depende del tipo y altura del edificio en cuestión.

Por otro lado, existe un coste del proceso de desinfección. Si se realiza con cloro, hay que dosificar de forma continua en función de la demanda. El cloro consumido tiene un coste relativamente alto. En el caso que se realice con UV, el equipo consume energía eléctrica también de forma continua.

Además, en los sistemas con reactor biológico es necesario introducir aire de forma continua para que se realice el proceso de oxidación. El aire se introduce mediante un aireador que consume energía eléctrica de forma periódica.

Tabla 3.8. Eficiencia de los sistemas de depuración (%)

PARÁMETRO	DEPURACIÓN FÍSICA (SÓLO PRIMARIO)*	BIORREACTOR DE MEMBRANA MBR**
BOD5	40	99
TOC (Carbono Orgánico Total)		93
SS	70	100
T-N		79
NH4-N		-
NOx-N		-
T-P		74
COLIFORMES	55	100

\* (URALITA, 2005)

\*\* (Ueda y Hata, 1999)

### 3.2.1. MORFOLOGÍA DE LA INSTALACIÓN

Independientemente del sistema de depuración que se vaya a utilizar, la instalación del edificio debe estar preparada para poder aprovechar las aguas residuales.

En primer lugar se requiere de un triple sistema de evacuación: sistema de evacuación de las aguas pluviales (porque así lo exige el código técnico de la edificación), sistema de evacuación de aguas fecales, y sistema de evacuación de aguas grises, como puede verse en la Figura 3.9.

Las aguas fecales serán conducidas a la red general de saneamiento. Las aguas pluviales serán conducidas a la red general de pluviales, si la hubiere, o a la red general, o a un sistema de aprovechamiento de aguas pluviales, si se aprovechan. Las aguas grises deben conducirse hacia el equipo de depuración.

Al margen de los costes de inversión del sistema de depuración, la necesidad de una tercera red de evacuación también aumenta los costes de inversión, y éstos no son menores precisamente.

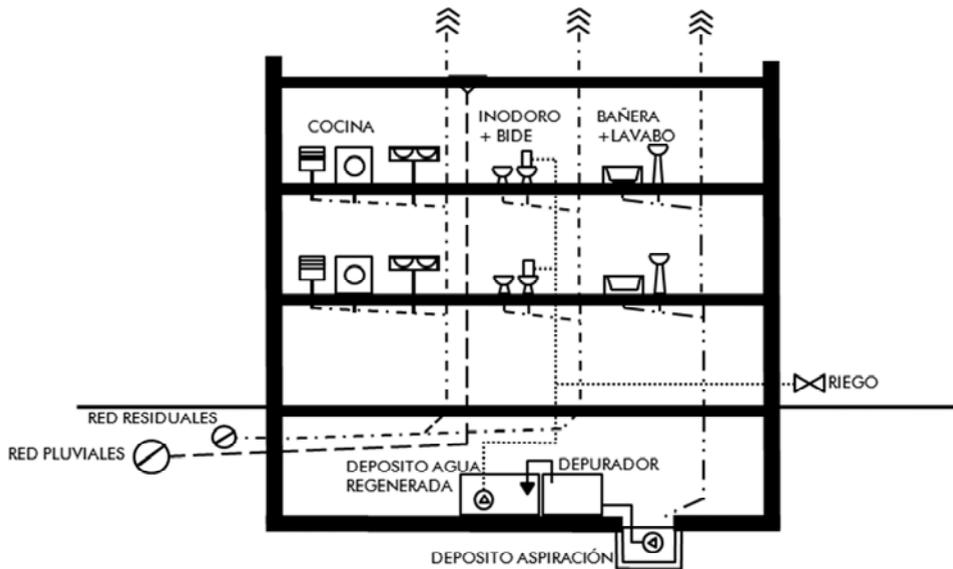


Figura 3.9. Esquema de una instalación de reutilización de aguas grises

El agua regenerada debe suministrarse de forma independiente al resto del agua potable. Por ello se requiere una doble red de suministro de agua, que también encarece el sistema.

Por último, hay que tener en cuenta que si el sistema de depuración falla o no hay disponibilidad de agua regenerada, para que los aparatos que se abastecen de ella puedan seguir funcionando debe existir un sistema de control que permita al abastecimiento de los inodoros con agua potable. Algunos equipos simples de reutilización de aguas grises no cuentan con este sistema y debe ser tenido en cuenta.

Para que el depurador funcione correctamente es recomendable que la entrada de caudal se produzca de una forma gradual. Es por ello que a la entrada del mismo dispone de un depósito de aspiración al que se vierten las aguas grises evacuadas. El depurador se alimenta desde ese depósito, bien a través de bomba, o por gravedad si el depósito está situado sobre el mismo.

### **3.2.2. DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN**

---

A diferencia de las grandes estaciones depuradoras de aguas residuales de las redes generales de saneamiento, que sí se dimensionan, los depuradores de aguas grises que dan servicio a los edificios son equipos compactos. En ellos están incluidas todas las etapas de tratamiento que requiere una estación depuradora, según la eficiencia para la que está diseñada. Es por ello que, más que un dimensionado de la instalación lo que se realiza es un proceso de pre-dimensionado y selección de entre los equipos comerciales que existen.

La norma europea EN-12566-3:2005 (CEN, 2005), adoptada en España como UNE-EN 12566-3:2006 (AENOR, 2006), establece los parámetros que deben utilizarse para el dimensionado de los equipos de depuración. Aunque no es de obligado cumplimiento, es la base que se toma para el pre-dimensionado de este tipo de instalaciones.

Los equipos comerciales refieren su capacidad de tratamiento a lo que denominan "habitantes equivalentes". El concepto que está perfectamente definido en el RD 11/1995 (ESPAÑA, 1995) donde un habitante equivalente se define como el correspondiente a una carga orgánica biodegradable con un DBO5 de 60 gramos de oxígeno por día. Sin embargo, hay fabricantes que no utilizan los valores legislados como referencia, sino que utilizan los suyos propios. En tal caso, todo el proceso indicado en este documento no es de aplicación por cuanto la referencia del fabricante y la estandarizada aquí referida no son lo mismo.

Así, pues, el proceso de pre-dimensionado consiste en determinar el número de habitantes equivalentes que tiene un edificio. Una vez se ha realizado el pre-dimensionado, se selecciona el equipo comercial cuyo valor nominal de habitantes equivalentes más se aproxime, por encima, al calculado.

Es por ello que, para realizar el pre-dimensionado de los equipos hay que conocer:

- la carga contaminante de las aguas residuales, (se pueden tomar como valores de referencia los indicados en la Tabla 3.7); y
- la eficiencia de la depuración.

### **3.2.3. DIMENSIONADO PARA AGUAS GRISES**

---

En este caso, el sistema de depuración que se va a implantar está diseñado para trabajar sólo con aguas grises. El cálculo de las dimensiones del equipo, en términos de habitantes equivalentes, sigue el proceso que se indica a continuación

La carga contaminante de DBO5 es la indicada en la Tabla 3.7 en la columna correspondiente a los valores reales. Se puede suponer de unos 100 mg/l.

Como quiera que un habitante equivalente genera una tasa de DBO5 de 60 gramos/día, operando, el volumen diario de depuración de aguas grises correspondiente a un habitante equivalente es de 600 l/día, como se justifica en la siguiente expresión:

$$V_{HE,GRIS} = \frac{60 \text{ g/día}}{100 \text{ mg/l}} = \frac{60000 \text{ mg/día}}{100 \text{ mg/l}} = 600 \text{ l/día} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde  $V_{HE,GRIS}$  es el volumen diario de depuración de aguas grises correspondiente a un habitante equivalente.

Para saber el número de habitantes equivalentes es necesario conocer el caudal de aguas grises que se genera en todo el edificio. Para ello hay que determinar el que se evacua en lavabos, duchas o bañeras, y bidés.

Denominando  $D_{Wd,T}$ , expresado en m<sup>3</sup>/día/persona, a la demanda total en todos los aparatos de la vivienda o edificio por persona, y conocido el porcentaje de uso en cada uno de los aparatos, por ejemplo el indicado en la Figura 3.10, se obtiene el volumen diario evacuado en lavabos y duchas.

El número de habitantes equivalentes del edificio para la reutilización de aguas grises,  $N_{HE,GRIS}$ , se calcula con la expresión:

$$N_{HE,GRIS} = \frac{(\%LAVABOS + \%DUCHAS + \%BAÑOS + \%BIDÉS) \cdot D_{Wd,T}}{600} \cdot N_{\text{personas edificio}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

A modo de ejemplo, para una vivienda unifamiliar habitada por 4 personas, suponiendo el consumo medio en España de una vivienda ( $D_{Wd,T} = 156$  l/persona/día), y los por porcentajes de uso de la Figura 3.10, se obtienen 0,4 habitantes equivalentes para el edificio. Evidentemente, los porcentajes de la Figura 3.10 son sólo valores de referencia para el ejemplo. En la realidad se tomaría cualquiera de las referencias apuntadas en el capítulo 2, o los datos más fiables que se pudieran obtener como consecuencia de una auditoría del consumo en el edificio.

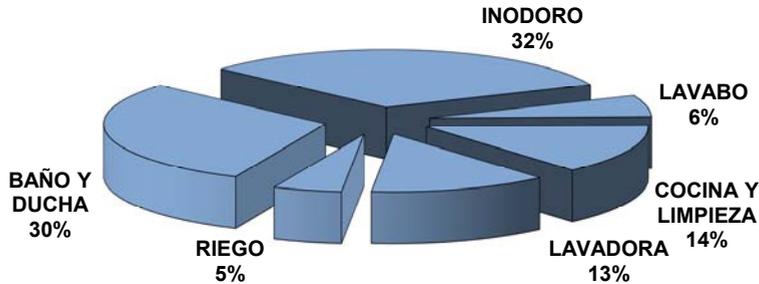


Figura 3.10. Distribución de consumos en una vivienda tipo (Fte: Hydro-water)

El proceso se puede calcular al revés. Si lo que se conoce del equipo de depuración es el volumen diario que es capaz de depurar, se obtienen los habitantes a los que da servicio calculando el número de habitantes equivalentes y procediendo al revés. En muchos casos, se utiliza como comprobación para verificar si los habitantes equivalentes que declara un fabricante en la documentación de su equipo se corresponden con la definición establecida en la legislación

El número de habitantes equivalentes en la relación entre la capacidad de depuración de aguas grises de un equipo comercial,  $V_{DEP}$ , y el volumen de depuración de aguas grises por habitante equivalente,  $V_{HE,GRIS}$ , es:

$$N_{HE,GRIS} = \frac{V_{DEP}}{V_{HE,GRIS}} = \frac{V_{DEP} \left( \frac{l}{\text{día}} \right)}{600 \left( \frac{l}{\text{día}} / \text{hab. equiv.} \right)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde  $N_{HE,GRIS}$  es el número de habitantes equivalentes de depuración de aguas grises. Los habitantes que pueden ser servidos por un determinado equipo se calcula como:

$$N_{\text{personas edificio}} = \frac{600}{(\%LAVABOS + \%DUCHAS + \%BAÑOS + \%BIDÉS)} \cdot D_{Wd,T} \cdot N_{HE,GRIS} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Para que el sistema de reutilización de aguas grises funcione correctamente es necesario que el porcentaje de usos de las aguas grises sea superior al consumo en inodoros. En muchos edificios esto no sucede de esta manera. Si el edificio no dispone de duchas, por ejemplo los edificios de oficinas, administrativos, docentes, etc., los volúmenes evacuados en lavabos no son suficientes para alimentar a los inodoros.

Entonces parte de la demanda de los inodoros hay que suministrarla desde la red de agua potable, en condiciones normales. El elevado coste de inversión del sistema de reutilización de aguas residuales no sirve, ni siquiera, para atender todo el consumo de los inodoros. Por ello es muy probable que en este tipo de edificios no sea rentable la implantación de un sistema de éste tipo.

Por el contrario, allá donde existe un gran consumo en duchas y un relativamente bajo consumo en inodoros puede resultar más rentable. Es el caso de los gimnasios.

### 3.2.4. DIMENSIONADO PARA AGUA NEGRAS

---

Cuando se ha optado por un sistema de depuración que trabaje con todas las aguas usadas, el dimensionado de la instalación resulta ser bastante similar al caso anterior, si bien la carga contaminante es distinta y condiciona los valores.

La carga contaminante de DBO5 para las aguas residuales es la indicada en la primera columna de la Tabla 3.7. A los efectos se simplifica a un valor de 400 mg/l. En tal caso, el volumen depurado de aguas residuales correspondiente a un habitante equivalente,  $V_{HE,FECAL}$ , es de 150 l/día.

Para saber el número de habitantes equivalentes es necesario conocer todo el caudal de aguas residuales que se genera en todo el edificio.

Se considera que el caudal de aguas residuales es toda la demanda de agua,  $D_{Wd,T}$ , descontando el volumen de agua destinado al riego de jardines, que no se desagua.

El número de habitantes equivalentes del edificio para la reutilización de aguas fecales,  $N_{HE,FECAL}$ , se calcula con la expresión:

$$N_{HE,GRIS} = \frac{D_{Wd,T} \cdot (1 - \%RIEGO)}{150} \cdot N_{personas\ edificio} \quad \text{Ec. 3.7}$$

En el mismo ejemplo anterior, tomando un 5% de consumo destinado a riego de jardines (tomado de la distribución de consumos de la Figura 3.10) y para la demanda,  $D_{Wd,T}$ , de 156 l/persona/día, resulta ser, prácticamente, de 1 habitante equivalente por persona que habita el edificio.

El mayor número de habitantes equivalentes obliga a que el equipo tenga mayores dimensiones, y sea más costoso. Por el contrario, el volumen de agua que se reutiliza es mayor y, al reutilizarse toda la que se demanda, se garantiza siempre la disponibilidad de volúmenes para la reutilización. El problema está en el elevadísimo coste del sistema, tanto en inversión, como en operación, por cuanto el tratamiento de las aguas fecales resulta más dificultoso que el de las aguas grises, lo que lo hace prácticamente inviable en edificios estándar.

Este sistema de reutilización tiene su sentido de ser donde la disponibilidad de recursos naturales sea muy difícil o éstos sean muy escasos.

### **3.2.5. POTENCIAL DE AHORRO DE AGUA EN LOS SISTEMAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS USADAS**

---

A la hora de valorar un sistema de reutilización de aguas usadas, como se verá en capítulos posteriores, el coste de inversión del equipo, seleccionado como se ha indicado en los apartados anteriores supone sólo uno de los criterios a aplicar.

Como con otros dispositivos, es importante conocer el ahorro que se obtiene aplicando este tipo de tecnología.

Se va distinguir, básicamente por las aportaciones que se obtienen, el ahorro que se puede lograr con un sistema de reutilización de aguas grises y con uno de aguas negras.

En los sistemas de reutilización de aguas grises, las aportaciones se corresponden con las demandas que se producen en los lavabos, duchas, bañeras, y bidés que equipa el edificio en cuestión.

Los consumos de aguas grises regeneradas son los que permite la legislación española a través de su R.D. 1620/2005. Para "uso urbano" de tipo residencial, el Real Decreto sólo permite el uso en el suministro de inodoros y para el riego de jardines privados.

De este modo, a la hora de valorar el ahorro se pueden dar dos situaciones, que variarán según la tipología del edificio.

El primer caso se produce cuando las aportaciones son superiores al consumo. En tal situación, el ahorro que se obtiene por el uso de las aguas grises regeneradas se corresponde con el porcentaje de consumo en inodoros y riego de jardines del edificio.

El segundo caso es el contrario, cuando las aportaciones son menores al consumo. En este caso, el ahorro que se logra con el sistema de reutilización de aguas grises regeneradas se corresponde con el porcentaje de consumo resultante de la suma del de lavabos, duchas, bañeras y bidés, en el edificio.

Esta es una situación típica en edificios públicos con aseos: centros comerciales, cines, etc., donde sólo existe aportación de aguas grises procedentes de lavabos, al carecer prácticamente de duchas o bañeras, pero sí que hay un consumo importante en inodoros.

Sucede, además, que al ser menores las aportaciones que los consumos de aguas regeneradas, debe disponerse un sistema de suministro de agua potable desde la red,

que no se permita bajo ninguna circunstancia la mezcla con el sistema de regeneración de aguas.

A modo de ejemplo, tomando como patrón de demandas las indicadas en la Figura 3.10, correspondiente a una vivienda, las aportaciones al sistema de reutilización de aguas usadas suman un 36% de la demanda total. Por el contrario, el consumo en inodoros y riego suman un 37% del total. Como las aportaciones son algo menores que el consumo de aguas regeneradas, el ahorro que se consigue con la implantación de este sistema es del 36%.

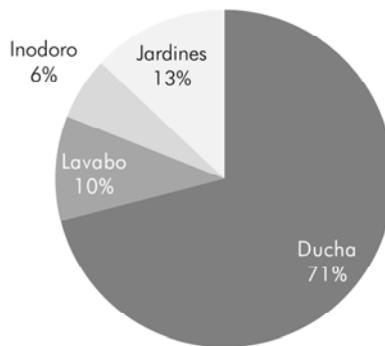


Figura 3.11. Demanda de agua en gimnasios (Molina et al. , 2004)

En un gimnasio, tomando como patrón de demanda el indicado en la Figura 3.11, las aportaciones suman un 81% del consumo total del edificio. Por otro lado, el consumo de aguas grises regeneradas suma sólo un 19%. En este caso, el ahorro que se obtiene como consecuencia de la implantación de un sistema de reutilización de aguas grises es del 19%, quedando sin aprovechar para su uso un 59% del agua utilizada. La legislación permite “vender” esa agua a un tercero, que pueden ser los ocupantes de un edificio anexo al del gimnasio.

Más adelante, cuando se aborde el tema de la selección de equipos se comentará que este ahorro no tiene porqué ser tal, puesto que si se implantan sistemas de hidroeficiencia que afecten a la reducción de la demanda en duchas, se verán reducidas las aportaciones, y con ello el ahorro que se consigue con el sistema de reutilización de aguas grises.

Desde el punto de vista de la viabilidad de la implantación del sistema, cuanto menores sean las aportaciones menos viable es, lo que lo hace incompatible con la implantación de otras medidas de ahorro.

En los sistemas de reutilización de aguas negras las aportaciones son cuanto menos iguales que los consumos. En este caso, el ahorro que se obtiene se corresponde con todo el consumo global en inodoros y riego del edificio.

El problema reside, como se ha comentado, en la dificultad y elevado coste del tratamiento, más que en el ahorro que se puede llegar a obtener.

### **3.3. SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS DE CONDENSACIÓN**

---

El sistema consiste en un conjunto de elementos que recogen el agua de condensación que se produce en los sistemas de acondicionamiento de aire para posteriormente almacenarlos y utilizarlos en el edificio para usos no hidrosanitarios.

El agua de condensación se produce al enfriar el aire que circula a través de los intercambiadores de calor que equipan los climatizadores de aire. Principalmente en su funcionamiento en modo refrigeración.

Debido a esto, el sistema se complementa con el de aprovechamiento de aguas pluviales, puesto que el régimen de lluvias es menor en verano, que es precisamente cuando más condensación se produce en los sistemas de climatización.

La procedencia del agua de condensación es la humedad que contiene el aire húmedo. Si el aire tratado es el aire húmedo exterior antes de impulsarse a un local acondicionado, la humedad es la propia de ese aire. Más abundante en zonas próximas a la costa, ríos o lagos.

Si el aire tratado es el aire húmedo del interior de un local, en sistemas de recirculación de aire por ejemplo, la humedad es debida la respiración y transpiración de sus ocupantes, junto a las infiltraciones desde el exterior. En este caso, cuanto mayor sea la ocupación y su actividad física, mayor condensación se va a producir.

La cantidad de condensado que se puede llegar a obtener es:

- si el aire tratado proviene del ambiente exterior, unos 0,7 l/h/kW de refrigeración de la máquina climatizadora.
- si el aire tratado es aire interior de recirculación, se obtiene 0,39 l/h/kW de refrigeración de la climatizadora.

Estos datos han sido obtenidos por el autor a través de una serie de medidas reales que se han realizado como desarrollo de este trabajo.

El análisis de las mediciones realizadas, así como todo el procedimiento para la determinación del potencial de producción de agua de condensación en un sistema de

nueva implantación va a ser desarrollado en un capítulo específico dentro de este trabajo.

#### **4. CONCLUSIONES**

---

Para seleccionar los sistemas de hidroeficiencia más adecuados para equipar un edificio es necesario conocer los que existen de forma comercial y que puede ser preseleccionados en un análisis previo.

Los principales sistemas de ahorro de agua existentes de forma comercial, cuyo comportamiento está suficientemente contrastado, son: los aireadores-perlizadores, los reductores de caudal de ducha, los cabezales de ducha de bajo consumo, los grifos de descarga de inodoro de bajo consumo, las griferías de apertura o cierre automatizado, las griferías de doble apertura, las griferías de apertura en frío, las válvulas reductoras de presión, los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, los sistemas de aprovechamiento de aguas usadas, y los sistemas de aprovechamiento de condensados.

Los ahorros teóricos que se pueden obtener con los diferentes sistemas de ahorro de agua, funcionando de forma individual, y aisladamente del edificio en que se va a instalar, pueden variar desde entre 10% y el 70% del consumo que se produce con un dispositivo convencional.

Sin embargo, los ahorros reales dependen del porcentaje de uso de cada uno de los aparatos hidrosanitarios sobre los que actúa el sistema de ahorro de agua. En general, resultan menores que los ahorros teóricos.

Como los usos varían notablemente de un edificio a otro, tal y como se ha visto en el capítulo anterior, se hace necesario realizar un proceso de análisis en cada una de las implantaciones para determinar qué sistema es el más adecuado para el edificio en cuestión.

## 4. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE PLUVIALES EN EDIFICACIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia es captar agua proveniente de las precipitaciones naturales sobre el emplazamiento donde se ubica la edificación, almacenándola después para destinarla a su uso, con los tratamientos necesarios, en la propia edificación.

Como sistema de suministro de agua no es una solución tecnológicamente novedosa, ya que eran utilizados con anterioridad a la era moderna por griegos, romanos y árabes. Para esas civilizaciones, que no disponían de un verdadero sistema de distribución hasta las viviendas, era una de sus formas de proveerse de agua para consumo humano. El agua de lluvia se almacenaba en cisternas y aljibes para ser utilizada sin ningún tratamiento posterior.

La concepción actual de este sistema como elemento de suministro de agua admite una doble aproximación.

Por un lado, el sistema puede estar concebido como único elemento de abastecimiento en edificaciones en las que no existe posibilidad de obtener agua distribuida ni procedente de pozos subterráneos, lo que se podría llamar un sistema de abastecimiento total. Este concepto es muy próximo a las soluciones clásicas y no se plantea como una forma de mejorar la gestión de la demanda de agua sino como un sistema de abastecimiento en sí mismo.

En un entorno socioeconómico desarrollado, un sistema de abastecimiento que sirva de solución a edificaciones aisladas que la utilizan como única fuente de suministro es poco habitual, además de presentar diversos problemas hidrosanitarios. Si el agua de lluvia va a ser destinada a uso bebible, la legislación en materia sanitaria (ESPAÑA, 2015) obliga a que cumpla determinados parámetros de potabilidad, lo que supone un tratamiento adicional que encarece el sistema. Como quiera que el problema al que se da solución no es estrictamente una cuestión de mejora de la eficiencia, sino simplemente de falta de recursos, no se va a abordar en este trabajo de una manera específica.

No obstante, los equipos, el diseño y el dimensionado que se va a desarrollar en este capítulo es de igual utilidad para este planteamiento que para cualquier otro en el que se utilice agua de lluvia como recurso. Lo único es que deberá ser completado con los elementos necesarios que le den la exigida calidad al agua para un uso bebible.

De otro lado, el sistema se puede utilizar como elemento de apoyo a los sistemas convencionales de suministro mediante agua distribuida, lo que se va a dar en llamar sistema de abastecimiento de apoyo. En este caso, se trata de mejorar la gestión

evitando consumir de fuentes de suministro convencionales el agua que se pueda obtener por otra vía.

La solución como sistema de apoyo es utilizada para dar suministro a servicios que no requieren de agua totalmente potable, como es el uso para riego, baldeo, o arrastre (en inodoros siempre que se garantice la imposibilidad de cruzamiento con la red convencional).

El uso como sistema de apoyo se podrá aplicar sólo a edificaciones que dispongan de este tipo de servicios, y no tiene sentido utilizarlos en edificios que no los dispongan.

Existe una cierta tendencia a utilizar sistemas de abastecimiento total con agua de lluvia incluso en edificios que pueden ser abastecidos por canalización. Se trata de edificaciones a las que se quieren calificar como medioambientalmente respetuosas, o sostenibles. Para ello se renuncia a un suministro con agua canalizada en favor de un único suministro con agua de lluvia.

Si esta filosofía del abastecimiento se aplicara a todo el conjunto de edificios que puede formar un área urbana o industrial se daría la paradoja de que cada edificación dispondría de su propio sistema de captación, de su propio almacenamiento, de su propio sistema de tratamiento y de su propio bombeo.

La "sostenibilidad" que se consigue aprovechando el agua de lluvia se pierde por el tratamiento individualizado que se hace de las instalaciones. Resulta más "sostenible" disponer de unos equipos centralizados que disponer de muchos equipos individuales, puesto que las repercusiones ambientales de un único producto (fabricación, distribución,...) son menores que las de muchos equipos.

Este beneficio de la centralización se puede observar en una tendencia que se está produciendo a nivel europeo en el desarrollo de lo que se llama "district heating". Se trata de disponer de estaciones de producción de energía para calefacción centralizada en áreas o distritos, en lugar de producir la energía de forma individualizada. Se busca con ello reducir el consumo energético al lograr mayor eficiencia.

Claro está que para que la centralización sea beneficiosa en los sistemas de distribución de agua, las redes generales de abastecimiento deben tener unos rendimientos energéticos e hidráulicos elevados y así se les debe exigir.

Una solución de futuro a la que se debería apuntar sería conseguir sistemas generales de abastecimiento de agua que aprovechan y reutilizan las escorrentías de lluvia de las grandes zonas urbanas.

Dentro de los objetivos del presente trabajo se van a desarrollar los sistemas de aprovechamiento de lluvia como elementos de apoyo. Las soluciones centralizadas se dejan para ser desarrolladas en futuras investigaciones.

Existen varios enfoques a la cuestión del aprovechamiento de agua de lluvia para abastecimiento.

En muchos casos, el aprovechamiento de lluvia es una solución a la falta de posibilidades de abastecimiento de agua en países subdesarrollados. En estos países, se ha llegado a esta solución, no tanto por la falta de recursos hidrológicos, como por la falta de infraestructuras que permitan el almacenamiento, tratamiento y distribución de agua potable canalizada.

Varios son los organismos que en el Reino Unido han optado por este enfoque. La Universidad de Warwick y Loughborough, a través de sus DTU (Development Technology Unit) (Still y Thomas, 2002) y del WEDC (Water Engineering Development Centre) respectivamente (Martison y Thomas, 2002), tienen publicados varios trabajos centrados en la aplicación de soluciones constructivas tremendamente sencillas adaptadas al escaso nivel tecnológico de estos países.

Sin embargo no es éste el enfoque que se pretende dar al trabajo que aquí se desarrolla, ubicado en un entorno socio-económico más desarrollado.

En países desarrollados los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia se deben plantear como una solución de eficiencia hídrica y sostenibilidad ambiental. En muchos países se han desarrollado soluciones aisladas e individuales, sin un tratamiento generalizado.

Sin embargo, si que existen casos en los que los sistemas de aprovechamiento de lluvia pretenden ser una solución generalizada. Es la situación que se presenta en el sur-centro de los Estados Unidos de América, y con mayor extensión en toda Australia.

En el estado de Texas (EEUU), su normativa de aguas, en su artículo 36.1071 (Texas, 2005a), reconoce los sistemas de aprovechamiento de lluvia como una forma de obtención de recursos hídricos para consumo humano en las situaciones en que sea apropiado y rentable. Incluso en su artículo 11.036 (Texas, 1997) permite la comercialización del agua así obtenida a terceros. La concepción de estas instalaciones sigue el concepto de "distribución por distritos" que se ha comentado en apartados anteriores más que un aprovechamiento individualizado, aunque éste no se descarta.

Viendo la necesidad de legislar las posibilidades de aprovechamiento y las características de las instalaciones, se ha reglamentado en el art. 341.042 del Texas Health and Safety Code (Texas, 2005b), el estándar para el aprovechamiento de lluvia.

Estos estándares se han desarrollado en una guía (Texas Rainwater Harvesting Committee, 2006). La guía establece las posibilidades de aprovechamiento del estado de Texas, en donde se ha desarrollado. La extrapolación a otros emplazamientos es difícil por las distintas características de las precipitaciones. Sin embargo, en la guía se establecen ciertos criterios y parámetros de consumo que sí son exigibles al resto de instalaciones. Sobre todo se incide en los parámetros de calidad mínimos exigibles al agua de lluvia destinada a consumo humano. También se indican varios procesos para su tratamiento, y cómo deben ser las instalaciones que funcionen en conjunción con las redes generales de agua distribuida. Estas cuestiones sí son de aplicación a todos los casos.

En Australia la legislación ha llegado un poco más lejos incluso. El uso de sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia está bastante extendido por lo que el gobierno nacional se ha visto en la necesidad de redactar una guía para regular este tipo de instalaciones (enHealth Council, 2011)

En algunos estados se ha legislado en el sentido de obligar a la instalación de sistemas de aprovechamiento de lluvia. Así, en South Australia, el estado donde mayores sequías se registran, es necesario disponer de un sistema de aprovechamiento de lluvia con al menos un depósito de 1000 litros para los edificios de clase 1 con superficies de cubierta de más de 50 m<sup>2</sup> (South Australia Government, 2006a) . Las características y el diseño de la instalación están recogidos en un documento del organismo que gestiona el agua canalizada en dicho estado (South Australia Water, 2006b).

## 2. ANALISIS GENERAL DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA

---

Antes de abordar el diseño de la instalación para el aprovechamiento de lluvia se va a realizar un análisis del sistema como solución de hidroeficiencia, estudiando el sistema en sí mismo, comparándolo con otros sistemas de hidroeficiencia, y presentando sus principales características.

Lo que se busca es establecer una serie de factores que sirvan para tomar una decisión "a priori" sobre si considerar esta solución o no, a la hora de elaborar una auditoria o de desarrollar un proyecto de hidroeficiencia sobre una edificación, sin tener que entrar en todo el laborioso proceso de diseño y cálculo que valoren si va a resultar rentable o no el sistema.

En primer lugar hay que indicar que los sistemas de aprovechamiento de lluvia han demostrado sobradamente su aplicabilidad por cuanto que como solución para el abastecimiento de agua a edificios que tiene más de dos mil años de existencia.

La gran ventaja que presentan es la de utilizar un recurso que es sumamente barato. En tanto en cuanto que se rechace el volumen de primera lluvia, que contiene un alto grado de contaminantes, siguiendo el procedimiento que se describirá más adelante, el agua de lluvia resulta tener una buena calidad en la mayoría de situaciones, lo que implica que no requiere de una depuración posterior. La ausencia de tratamiento, y el hecho de que es un recurso natural hacen que su coste sea tan reducido. No obstante, en algunas regiones con elevada contaminación atmosférica, la lluvia puede tener un comportamiento muy agresivo como consecuencia de su acidez, obtenida al reaccionar con los contaminantes atmosféricos durante su formación y precipitación. No es ésta una situación generalizada y, en cualquier caso, no es deseable por otras razones, por lo que donde se produce se realizan esfuerzos para evitarla.

Sin embargo el sistema tiene ciertas limitaciones: la cuantía de las lluvias, su frecuencia y ubicación, y su calidad.

La cuantía de las lluvias, su pluviometría, deberán ser suficientes para atender todos los consumos suministrados desde el SAP. Sin embargo, no es una situación habitual, por lo que sólo es posible abastecer una fracción de la demanda. La eficiencia del sistema se reduce al reducirse la demanda atendida, y ello incide en su rentabilidad económica.

No obstante, una elevada pluviometría tampoco garantiza que el sistema sea económicamente rentable. Allí donde las lluvias no son frecuentes, aún cuando sean de un volumen suficiente, obliga a un sobredimensionado del depósito de almacenamiento para retener la elevada pluviometría puntual, y ello encarece la instalación.

En comparación con otros sistemas de suministro alternativo a la red, el tamaño del depósito de almacenamiento de agua para consumo en el SAP es mayor que en el resto. Esto es así porque el recurso se obtiene de una forma más intermitente en el tiempo que en el resto de sistemas y ello exige mayores volúmenes de regulación, como se va a detallar más adelante.

Afortunadamente el mayor coste del depósito de almacenamiento se ve compensado con la ausencia de un elemento de depuración de las aguas, que reduce los costes de manutención.

En general, la calidad del agua obtenida es buena pero no lo suficiente como ser destinada a consumo humano. Por ello el tipo de edificación en la que se puede aprovechar el agua de lluvia viene condicionado por los usos no bebibles con los que cuenta. A continuación se va a realizar un análisis más exhaustivo.

Además de las ventajas y limitaciones, para abordar el proceso de desarrollo de una solución de hidroeficiencia con este sistema hay que tener en cuenta una serie de aspectos que se pueden agrupar en tres apartados: aplicaciones donde utilizar el sistema, costes y cuestiones generales de diseño.

## 2.1. APLICACIONES DEL SISTEMA

---

Como se ha comentado, es la calidad del agua disponible la que va a condicionar las aplicaciones en las cuales se va a poder utilizar el SAP.

La calidad del agua en el consumo va a depender de la que se disponga en los tres puntos del proceso de aprovechamiento: precipitación, captación, y en el almacenamiento y distribución.

La calidad del agua de precipitación es la que tiene el agua de lluvia antes de que llegue a las superficies de captación. El agua de lluvia se obtiene por condensación natural del vapor de agua que contiene el aire atmosférico. En origen se obtiene H<sub>2</sub>O puro. La presencia de CO<sub>2</sub> en el aire y su reacción con el H<sub>2</sub>O obtenido hace que se genere ácido carbónico lo que produce que la lluvia sea ligeramente ácida. Si bien no es apta para el consumo humano, tampoco puede decirse que esté contaminada.

No obstante, durante el proceso de precipitación hacia la superficie, el agua arrastra y reacciona con las partículas contaminantes que existen en el ambiente lo que empeora su calidad. Cuanto menor sea el grado de contaminación ambiental, mejor será la calidad del agua obtenida.

En zonas donde se generan humos procedentes de la combustión de productos del petróleo, con contenidos en dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), su reacción con el agua produce ácido sulfúrico y ácido nítrico, que se precipita y recoge junto con el agua de lluvia. En este caso, no sólo resulta desaconsejable, sino hasta peligroso, el aprovechamiento de agua de lluvia.

El agua precipitada es recogida en las superficies de captación. Allí se produce una segunda contaminación debido a los contaminantes atmosféricos depositados sobre la propia superficie. En este caso se trata más bien de diminutas partículas contaminantes, que pueden llegar a ser hasta metales pesados, de imposible eliminación por cualquier sistema de depuración, y que son arrastradas por la lluvia al escurrir por la superficie.

Como se comentará a la hora de describir y dimensionar elementos, se va a prever un dispositivo que evite que el agua que arrastra estas partículas contaminantes pase a ser aprovechada por el sistema y, directamente, se va a enviar a la red de evacuación. Si este dispositivo está correctamente instalado y dimensionado, el efecto de la

contaminación en superficie no debe empeorar la calidad del agua procedente de la precipitación.

Finalmente el agua “limpia” recogida es almacenada en depósitos atmosféricos. En este caso se puede producir una contaminación debido a la proliferación de insectos sobre una agua que puede pasar largos periodos estancada. En determinadas zonas cálidas, la contaminación por mosquito puede ser el mayor condicionante de diseño del sistema.

De esta forma, analizando la calidad del agua obtenida se puede establecer una serie de aplicaciones:

- Baja calidad. Será el caso en que se obtiene agua con un pH muy bajo o con partículas contaminantes arrastradas. Para esta situación el uso que se puede hacer de la lluvia es el mismo que se haría si no existiera un sistema de aprovechamiento, es decir, para riego de jardines.
- Calidad normal. La obtenida con lluvia con un pH superior a 5.6 y sin partículas contaminantes. Su uso se extiende, además, para usos en limpieza (lavadoras, lavaderos), para baldeos, y para saneamiento en inodoros (Fewkes, 1999).
- Calidad elevada. Es el agua obtenida después de un proceso de potabilización del agua de calidad normal. En este caso el uso puede ser cualquiera dentro del ámbito doméstico. Esta es una solución que encarece el sistema notablemente y se reserva a los consumos en los que no exista otra fuente alternativa de suministro.

## **2.2. COSTE DEL SISTEMA**

---

Para analizar el coste global de implantación de un sistema de aprovechamiento de lluvia hay que tener en cuenta el coste de inversión en equipos y elementos, pero también el coste de mantenimiento y el coste de explotación, o de explotación, del sistema (Coombes, 2007). Es la suma total de todos ellos la que permitirá comparar la bondad de este sistema frente a otras soluciones.

En el apartado de coste de inversión hay que distinguir tres grupos de elementos: Los que forman parte del sistema de captación de lluvia, el sistema de almacenamiento, y los elementos del sistema de abastecimiento.

Los elementos del sistema de captación no son exclusivos del sistema de aprovechamiento como tal, puesto que de todas formas hay que instalarlos para evacuar las aguas pluviales de la edificación. Es por ello que su coste no debe ser tenido en cuenta en el análisis del SAP al tener que estar presente de todas formas.

Como elementos del sistema de almacenamiento de lluvia estarán los filtros y el depósito de almacenamiento de lluvia.

Los filtros son, en comparación con otros sistemas, de menor coste que en un sistema de aprovechamiento de aguas grises, pues el agua de lluvia no requiere, normalmente, de un sistema de depuración.

Sin embargo, el coste del depósito de almacenamiento es superior al de un sistema de aguas grises por cuanto que la intermitencia de las lluvias obliga a disponer de un depósito de mayor volumen que almacene el agua caída entre dos precipitaciones.

Los elementos del sistema de abastecimiento son prácticamente iguales a los de otros sistemas que utilizan depósitos atmosféricos (aguas grises y recuperación de condensados). Sus características y dimensiones dependen de lo que sucede en el lado de la demanda y no de la aportación y por tanto, para todos ellos serán prácticamente iguales (existirán ligeras diferencias si en unos sistemas la disposición del depósito es enterrado y en otros aéreo)

Para evaluar el coste de explotación del sistema hay que tener en cuenta que las aguas pluviales tienen una calidad suficiente como para no necesitar de un tratamiento posterior de depuración. Es por ello que los costes de explotación son notablemente menores que en los sistemas de aguas grises.

De igual forma sucede en cuanto a los costes de mantenimiento. Al no disponer el sistema de equipos electromecánicos (salvo en la parte de abastecimiento, pero en ese caso serán los mismos equipos que en otros sistemas) el mantenimiento que hay que realizar sobre el sistema es mínimo, y se limita a realizar una limpieza sobre el depósito atmosférico de almacenamiento, que por otro lado es similar al que hay que realizar en los depósitos del resto de sistemas.

Englobando los costes de explotación y mantenimiento se puede resumir que éstos van a ser inferiores a los de un sistema de reutilización de aguas grises y similares a los de un sistema de recuperación de condensados. Incluyendo los costes de inversión, los sistemas de aprovechamiento de pluviales resultan una solución de coste reducido en comparación con otros.

### **2.3. CUESTIONES GENERALES DE DISEÑO**

---

De cara a completar el análisis del sistema, existen una serie de aspectos relacionados con la configuración y el diseño del sistema que condicionan su implantación.

Para poder obtener una cantidad suficiente de aportación que permita rentabilizar el sistema, la relación superficie frente al consumo debe ser elevada.

Las tipologías de edificación que mayor rentabilidad van a aportar son aquellas en las que los edificios tienen una baja relación superficie de parcela vs superficie de techo, y además tienen un nivel de consumo de agua de moderado a bajo.

Para edificios en altura ubicadas en medianera, el sistema no va a resultar muy rentable. Las superficies de captación son pequeñas y sin embargo los consumos son importantes. Por muy grandes que se dispongan de los elementos de almacenamiento, la limitación en las aportaciones recogidas por las superficies de captación produce que sólo se pueda atender la demanda durante un corto espacio de tiempo. Si las lluvias no son muy frecuentes los equipos están infrutilizados durante mucho tiempo y su amortización resulta difícil, y con ello un sistema poco rentable.

Cuando las edificaciones en altura se desarrollan como edificación exenta, en una parcela de importantes dimensiones, si los elementos de captación son de tipo superficial o de pavimento, entonces el valor de las escorrentías recogidas aumenta, y con ello la rentabilidad del sistema.

### **3. ELEMENTOS QUE FORMAN EL SISTEMA**

---

El sistema de aprovechamiento de lluvia no sólo lo compone el depósito mencionado en repetidas ocasiones. Son partes del sistema los siguientes elementos:

- Elemento de captación
- Filtros primarios de retención
- Conducciones: canalones, bajantes, y tuberías de impulsión
- Filtros separadores de primera lluvia
- Depósitos
- Grupo de bombeo
- Depurador y/o potabilizador

No todos los sistemas de aprovechamiento de lluvia tienen porque disponer de todos los elementos o incluso la disposición y el tipo de cada elemento puede variar de un sistema a otro. Es por ello que se van a analizar por separado.

#### **3.1. ELEMENTOS DE CAPTACIÓN**

---

Los elementos de captación son las superficies destinadas a recoger el agua de lluvia que cae sobre el edificio y que canalizan, en un primer momento, hacia los filtros primarios, si existen, o hacia las conducciones que transporten el agua hacia el resto del sistema.

El objetivo del elemento de captación es poder conducir la mayor cantidad de agua de calidad posible hacia el sistema. La cantidad de lluvia recogida dependerá del tamaño de la superficie de captación, pero también de las pérdidas por permeabilidad del material, por evaporación, y por falta de capacidad de conducción del flujo de agua hacia el resto de la instalación. También debe ser un objetivo garantizar una calidad suficiente del agua, o que no se altere la calidad de la que cae en forma de lluvia. Como quiera que el agua puede ir destinada a uso hidrosanitario (aunque no necesariamente al consumo humano), la recogida no debe contener sustancias tóxicas que puedan después ser almacenadas y supongan un riesgo para la instalación de suministro a los aparatos sanitarios. Aun cuando se pueda hacer un tratamiento y filtrado posterior al sistema de captación, estos contaminantes podrían requerir de una depuración específica que podría no implantarse.

Sobre el tamaño de la superficie, tal y como se ha comentado, no es posible intervenir puesto que es un condicionante arquitectónico al que hay que adecuarse. Sin embargo sí que es posible influir en las pérdidas y en la garantía de calidad del agua a través de una correcta elección del material que forma parte de la cubierta.

Desde el punto de vista de la calidad, existen materiales más propensos al desarrollo de hongos o bacterias, básicamente por su elevada porosidad que permite el mantenimiento de las condiciones de humedad suficientes para la proliferación de este tipo de organismos. En aplicaciones de uso hidrosanitario, este tipo de materiales no estaría indicado.

En cuanto a las pérdidas, determinados materiales poseen un cierto grado de permeabilidad que reduce la escorrentía natural hacia los elementos de almacenamiento y por tanto la eficiencia de la instalación, haciéndola menos rentable.

Atendiendo a la eficiencia y a calidad del agua obtenida se puede establecer la siguiente relación de materiales para la captación de agua de lluvia (Krishna et al., 2005), (Persyn et al., 2004), (Méndez et al., 2011)

Tabla 4.1. Materiales para superficies de captación

Material	Escorrentía *	Calidad**	Observaciones
Acero galvanizado	Elevada	Adecuada	
Cobre	Elevada	Precaución	- El óxido de cobre puede generar manchas en los aparatos sanitarios de tipo porcelánico
Teja arcilla	Baja	Apta	- Debido a la permeabilidad del material, se puede perder hasta un 10% en volumen. Se mejora sellando la superficie - Pueden proliferar bacterias debido a la porosidad del material. Se mejora la calidad si el sellante es antibacterias.
Lamina asfáltica	Baja	Inadecuada	- Contiene toxinas - Pueden tener pérdidas de hasta el 10%
Gravas	Baja	Inadecuada	- Material permeable con difícil escorrentía. - Según la procedencia, pueden contener sustancias tóxicas. - Favorece la proliferación de bacterias
Alquitrán	Elevada	Inadecuada	- Contienen sustancias tóxicas
Pizarras	Elevada	Adecuada	- Si no se utilizan selladores contaminantes son adecuadas para consumo humano
Baldosa arcilla	Elevada	Apta	
Cubierta vegetal	Baja	Inadecuada	- Muy permeable - Puede arrastrar sustancias químicas

\* En la escorrentía se tiene en cuenta la permeabilidad del material y la evaporación natural.

\*\* Se valora la adecuación para un uso hidrosanitario. El uso para riego exclusivamente es siempre adecuado.

### **3.2. FILTROS PRIMARIOS DE RETENCIÓN**

---

La función del filtro primario de retención es evitar que la hojarasca y suciedad que está depositada sobre la superficie de captación sea arrastrada hacia el resto del sistema.

La solución constructiva puede ser muy diferente según el tipo de elemento de captación pero en esencia se trata de rejillas con una reducida sección de paso que impida la circulación de cualquier sólido de tamaño mayor que la cuadrícula.

En las superficies de cubierta inclinada, la rejilla se dispone por encima del canalón de tal forma que el agua pueda escurrir hacia el interior del canalón pero la hojarasca resbale por encima, tal y como puede verse en la figura 4.1

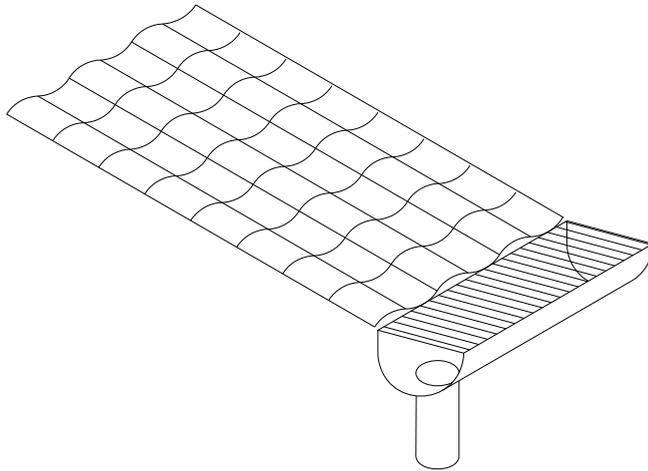


Figura 4.1. Filtro de rejilla sobre canalón en cubiertas inclinadas

Las superficies horizontales, tanto si son cubiertas planas de edificaciones como si son la propia rasante del terreno, conducen las aguas pluviales hacia sumideros para canalizarlos hacia el sistema de aprovechamiento de pluviales. Estos sumideros cuentan entre sus componentes con rejillas que actúan como filtros de primarios de retención de sólidos. Las tipologías pueden variar dependiendo de si los sumideros son puntuales, o son lineales.



Figura 4.2. Diferentes tipos de rejillas de sumidero (Fotos: JIMTEM, ACO)

Los materiales de los que están hechas las rejillas deben ser compatibles, desde el punto de vista sanitario, con el uso que se va a realizar de la instalación.

Es frecuente que los filtros sean de materiales plásticos (PVC, PE, PP), acero galvanizado o acero inoxidable.

En cualquier caso, un requerimiento que deben cumplir los filtros primarios es su fácil mantenimiento por cuanto en ellos se van a depositar elementos sólidos que pueden reducir el rendimiento del SAP. En los casos en que el acceso para mantenimiento de los filtros sea difícil, éstos se dispondrán para una limpieza de forma automática. Es el caso de las rejillas de cubierta. Su disposición debe permitir que la propia lluvia escurra los sólidos hacia el exterior de la instalación del SAP.

### 3.3. CONDUCCIONES

---

La función de las conducciones es canalizar la lluvia entre las diferentes partes que componen el SAP. Desde los elementos de captación hasta el depósito, el flujo de agua circulará en régimen de lámina libre o en presión según si el sistema de recogida de pluviales es atmosférico o en presión, respectivamente. Sin embargo, desde el depósito todas las conducciones serán a presión. Las características y el dimensionado, como se verá más adelante, será muy distinto.

Los materiales a emplear son muy variados pero, al igual que sucede con las superficies de captación, deben ser compatibles en calidad con el aprovechamiento que se va a realizar del agua de lluvia. Como criterio sirven las mismas consideraciones en cuanto a la naturaleza del material que se ha realizado para las superficies de captación.

En este sentido, hay que tener en cuenta que el principal problema puede provenir de la conversión de un sistema tradicional de evacuación de pluviales a un sistema de aprovechamiento de pluviales.

Los sistemas tradicionales de evacuación no van destinados al consumo humano. De ahí que sus conducciones, y con el fin de reducir costes, no tengan características hidrosanitarias. Al convertirlo en un SAP, el agua recogida sí que pasa a ser parcial o totalmente destinada a consumo humano. Algunos materiales empleados podrían no ser compatibles. Estos materiales son sobretodo el plomo, la fundición gris, el acero sin protección anticorrosivo, y el cobre no sanitario.

### **3.4. SEPARADORES DE PRIMERA LLUVIA**

---

Los elementos de captación, están en contacto directo con la atmósfera y por ello está sometida a una contaminación, que puede ser simplemente por el depósito de polvo en suspensión hasta el desarrollo bacteriano como consecuencia de las adecuadas condiciones ambientales.

Al caer la lluvia, esta carga contaminante, por efecto de arrastre se va a transportar hacia el resto del SAP. Cuando llegue a los depósitos, va a contaminar éstos impidiendo que se pueda hacer un uso sanitario de su contenido. Los filtros primarios de retención no consiguen capturar esta carga contaminante porque su tamaño es muy inferior el que los filtros pueden retener. Es por ello que se necesita de algún elemento que impida que la carga contaminante de carácter ambiental pase el sistema de distribución de agua. Este elemento es el “separador de primera lluvia”.

Su función consiste en conducir la primera lluvia caída, y todo el contenido contaminante que transporta, hacia la red de evacuación sin que pase por el resto del SAP y, una vez que el agua no lleva carga contaminante, derivar el flujo hacia el depósito de almacenamiento.

El elemento debe contar con algún sistema de discriminación de flujo. El sistema de discriminación puede ser por caudal, por volumen o por carga contaminante (Coombes, 2002).

El sistema de discriminación por carga contaminante debe ser capaz de medir instantáneamente el grado de contaminación que lleva el agua y en función de ello

actuar sobre una válvula de dos vías que dirige el flujo hacia un punto u otro. El sistema resulta excesivamente caro y complejo por lo que no resulta de aplicación.

El sistema de discriminación por caudal consiste en dirigir el flujo hacia la red de evacuación o el depósito en función del caudal de lluvia que se recibe. El mayor o menor caudal se utiliza como elemento de control para accionar una válvula que sirve como discriminador. El sistema está basado en el supuesto de que al principio la lluvia comienza cayendo de forma lenta para ir aumentando de forma progresiva. Sin embargo, el tiempo que transcurre entre lo que se puede considerar un caudal pequeño y otro grande depende mucho del tipo de lluvia, su estacionalidad, lo que obliga a calibrar la válvula de separación de un emplazamiento a otro y para un periodo u otro.

El sistema de discriminación por volumen deriva una cantidad constante de lluvia hacia el sistema de evacuación. Cuando ese volumen "contaminado" ya ha sido evacuado, un actuador deriva la lluvia hacia el SAP. Este sistema requiere de un correcto cálculo del volumen de lluvia contaminado por cuanto que, alcanzado ese valor, el actuador va a derivar el agua, independientemente de si todavía está contaminado o no, hacia el depósito. Un error en la determinación del volumen contaminado hará que se contamine todo el SAP. Por otra parte, una estimación excesiva del volumen contaminado reduce la eficiencia del SAP al perder parte de la lluvia que se podría aprovechar.

El dimensionado del separador será, por tanto, un aspecto importante a tener en cuenta para que el sistema sea rentable y funcione adecuadamente. En el apartado destinado al dimensionado de elementos se desarrollará la forma de calcular dicho volumen.

### **3.5. DEPÓSITOS**

---

Los depósitos son los elementos que almacenan el agua filtrada que se recoge durante las precipitaciones y que será consumida al cabo del tiempo.

Desde el punto de vista constructivo existen muchas tipologías. En implantaciones en países subdesarrollados o en vías de desarrollo los depósitos pueden ser verdaderamente rudimentarios (Ghisi, . Sin embargo, en el caso que se desarrolla en este trabajo, los depósitos son elementos tecnológicos que se comportan como aljibes atmosféricos que no almacenan presión.

Es importante que, independientemente del material, no permitan el paso de luz ultravioleta en su interior para evitar la proliferación de algas. Del mismo modo deben evitar, a pesar de su comportamiento atmosférico, la entrada y desarrollo de insectos,

sin renunciar a una adecuada ventilación que evite las depresiones y sobrepresiones durante los procesos de vaciado y llenado.

Según el tipo de instalación es posible encontrar depósitos aéreos, y enterrados o semienterrados.

Los depósitos aéreos son aquellos cuyas paredes laterales están en contacto directo con el aire. Pueden estar dispuestos sobre solera, a la intemperie, o bajo solera, en el interior de sótanos. Como consecuencia de su emplazamiento no van a estar sometidos a cargas externas y el único esfuerzo que tienen que soportar en la presión hidrostática de su interior. El depósito descansa sobre el terreno bien de forma directa o apoyado sobre unas patas. En cualquier caso, la base sobre la que descansa el depósito o sus patas debe estar convenientemente cimentada para recibir el peso del agua que almacena, 1000 kg por cada m<sup>3</sup>.

Cuando los depósitos aéreos están emplazados a la intemperie, y debido a la exposición directa a la luz natural, deben disponer de un cerramiento externo opaco a los rayos ultravioleta que evite la proliferación de organismos vivos en el agua almacenada. Así mismo, el material en el que está fabricado el depósito debe soportar la acción prolongada de los rayos ultravioleta evitando su degradación con el paso del tiempo. Algunos materiales plásticos son sensibles a la acción de estos rayos por lo que deben ser protegidos.

Los depósitos enterrados o semienterrados están sometidos a la carga adicional del peso del terreno que lo circunda. Adicionalmente, sólo para los enterrados pueden tener que soportar tráfico rodado sobre ellos. Sus paredes están reforzadas para soportar la carga adicional (la situación más crítica de cálculo es cuando el depósito está vacío por cuanto no hay presión hidrostática que compense el empuje del terreno). El refuerzo del depósito lo encarece, así como la propia excavación necesaria para albergar el depósito.

Sin embargo esta configuración presenta importantes ventajas: su disposición enterrada evita que sean visibles, hecho que parece trivial pero es un importante condicionante de aplicación en edificios singulares con una cierta importancia arquitectónica. Aunque su principal ventaja reside en que permite el aumento de los volúmenes de aportación, ya que al estar dispuesto el depósito por debajo del nivel de solera del terreno permite aprovechar las escorrentías de las superficies de solera. Otra ventaja es que libera la superficie de solera que ocupa y permite su aprovechamiento como espacio de circulación. Al liberar espacio en superficie permite aumentar el volumen de almacenamiento, necesario para recibir las mayores escorrentías.

La ubicación enterrada permite tener un único depósito en un SAP en viviendas con disposición de cubiertas inclinadas, como se comentará al analizar las morfologías de la instalación.

El depósito enterrado se asienta sobre el propio terreno. Dependiendo de la geometría del depósito y la flexibilidad del material con el que está fabricado, así se debe proceder al rellenado y la compactación de la zanja.

En general los depósitos rígidos (hormigón) transmiten el peso del conjunto depósito más terreno más agua almacenada al terreno en la parte inferior del depósito. La compactación en esta zona debe ser de muy alta calidad, no requiriendo de una compactación especial en la zona de los riñones. Por el contrario, los depósitos flexibles (acero, plásticos,...) hacen trabajar al terreno en la zona de los riñones obligando a una muy buena compactación de las paredes laterales que rodean al depósito, lo que produce que el proceso de instalación dure más en el tiempo y, por tanto, sea más costoso.

Según su disposición los depósitos pueden ser horizontales o verticales. Atendiendo a su morfología puede tener forma cilíndrica, o hexaédrica (prisma rectangular), y pueden ser elementos compactos o modulares.

En general la disposición en vertical es mejor cuando los depósitos son aéreos por cuanto que el depósito apoya su base directamente sobre la cimentación, repartiéndose los esfuerzos. El depósito horizontal aéreo (suele tener una forma cilíndrica) requiere de patas de apoyo por lo que debe tener una rigidez estructural que transmita el esfuerzo debido al peso (tanto del agua como del propio depósito) hasta los puntos de apoyo.

Para la disposición en vertical aérea hay que tener en cuenta que la altura del depósito permite aprovechar las escorrentías de cubierta. Si la separación entre la parte superior del depósito y las canalizaciones de cubierta no es la suficiente, no se podrán instalar los filtros necesarios y el sistema no se podrá desarrollar.

Para la disposición horizontal aérea, la altura del depósito es menor (porque el depósito se desarrolla constructivamente en horizontal) lo que facilita el aprovechamiento de las escorrentías de cubierta, pero se pasa a ocupar más superficie en planta, y no siempre se dispondrá de ese espacio en la edificación.

Para la instalación enterrada, los costes de excavación de un depósito en horizontal son menores que para un depósito vertical. El apoyo del depósito horizontal se realiza sobre la propia superficie del depósito por lo que los esfuerzos mecánicos son menores que para la instalación horizontal aérea.

En cuanto a la morfología, los depósitos con forma circular tienen una mayor rigidez estructural por el mayor momento de inercia de su sección transversal, lo que hace que soporten mejor las cargas internas y externas a las que está sometido. Los depósitos hexaédricos presentan la ventaja de adaptarse mejor a los espacios arquitectónicos, tanto en el interior del edificio como en su exterior.

La morfología modular permite, siendo ésta una gran ventaja con respecto a los modelos compactos, que los depósitos se puedan instalar en el interior del edificio una vez que se han cerrado sus tabiques al poder circular a través de puertas y corredores. Su pequeño tamaño los hace ligeros y manejables. La modularidad hace que sean muy versátiles en cuanto a la disponibilidad de volúmenes, lo que permite un mayor ajuste en el dimensionado de los valores comerciales a los valores teóricos calculados.

Sin embargo, para soluciones enterradas, la morfología compacta es la única disponible debido a la dificultad de realizar operaciones de mantenimiento sobre las uniones entre depósitos modulares cuando éstos van enterrados.

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen de características para la correcta selección de los depósitos en función de sus condiciones de instalación.

Tabla 4.2. Selección de la morfología del depósito según su instalación

Superficie de captación	Instalación		Morfología	Disposición	Selección	Observaciones	
Cubierta	Aéreo	Intemperie	Cilíndrico Compacto	Vertical	Recomendado	Limitado por la altura del depósito y la de la cubierta	
				Horizontal	Apto	1) Cuando la altura de la cubierta no sea suficiente	
			Cilíndrico Modular	Vertical	Apto	3)	
		Prismático Compacto				Recomendado	Es una morfología de volúmenes limitados (hasta 3000 l.)
		Prismático Modular				Apto	3)
		En sótano	Cilíndrico Compacto	Vertical	Apto	4) 5)	
	Horizontal			Apto	1) 5)		
	Cilíndrico Modular		Vertical	Recomendado	2)		
			Prismático Compacto		Apto	5)	
	Prismático Modular				Recomendado	2)	
	Enterrado		Cilíndrico Compacto	Vertical	Apto	Encarece la excavación	
		Horizontal		Recomendado			
Prismático Compacto				No recomendado	6)		
Solera	Enterrado	Cilíndrico Compacto	Vertical	Apto	Encarece la excavación		
			Horizontal	Recomendado			
		Prismático Compacto				No recomendado	6)

- 1) Necesita patas de apoyo que encarece el producto final
- 2) En instalaciones en sótano, es necesario colocar el depósito con posterioridad al cierre de tabiques. La morfología modular permite montar grandes volúmenes a partir de la unión de pequeños depósitos que son fáciles de desplazar por corredores y puertas.
- 3) Cuando la altura de la cubierta no sea suficiente para un único depósito vertical, se puede recurrir a conectar varios depósitos pequeños en vertical.
- 4) Limitado por la disponibilidad de altura en el sótano
- 5) Limitado a pequeños depósitos que se quepan por puertas y pasillos.
- 6) La morfología prismática se comporta peor frente a las cargas del terreno

Desde el punto de vista constructivo, los depósitos pueden ser elementos comerciales fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, polietileno, o chapa de acero; o se pueden construir in-situ en hormigón hidrófugo o en fábrica con revestimiento impermeabilizante. También es posible crear depósitos de almacenamiento de agua con los elementos arquitectónicos del edificio, estableciendo disposiciones constructivas de los elementos de cubierta o de solera que creen espacios impermeables que retengan el agua de lluvia.

Los depósitos de polietileno están fabricados en polietileno de alta densidad mediante un proceso de extrusión por soplado sin ningún tipo de soldadura lo que los hace muy estancos. Las conexiones de entrada-salida pueden ser roscadas, lo que permite la conexión directa de las tuberías o la conexión a bridas para acoplamiento de otros elementos. Pueden construirse con geometría cilíndrica o hexaédrica, y pueden tener forma compacta o modular, para su instalación aérea o enterrada.

Se fabrican desde volúmenes de 300 litros hasta 30000 litros. En morfología modular la gama de volúmenes es la pequeña-mediana, con valores hasta 3000 litros. Los volúmenes de gama grande se fabrican con una morfología compacta.

Por el material se trata de depósitos ligeros con una relación peso volumen relativamente baja, tal y como puede verse en la Tabla 4.3, lo que los hace muy manejables y adecuados para su instalación en sótanos.

Tabla 4.3. Relación Peso vs Volumen en depósitos de PE

Instalación	Morfología	Peso/Volumen (kg/m <sup>3</sup> )
Aéreo	Rectangular	~ 40 ÷ 45 kg/m <sup>3</sup>
	Cilíndrica/Troncocónica	~ 30 ÷ 35 kg/m <sup>3</sup>
Enterrado	Rectangular	~ 45 kg/m <sup>3</sup>
	Cilíndrica/Troncocónica	~ 30 ÷ 35 kg/m <sup>3</sup>

Los depósitos de Poliéster reforzado con fibra de vidrio, PRFV, se construyen a partir de la polimerización de resinas de poliéster a las que se añade fibra de vidrio para rigidizar estructuralmente el depósito, y un catalizador que acelera el proceso de polimerización.

Debido a su proceso de fabricación pueden cubrir un amplio rango de volúmenes de almacenamiento, desde los 100 litros hasta los 100000 litros

Se fabrican en diferentes geometrías (cilíndricos, rectangulares, prisma ovalado) para ser instalados enterrados o aéreos. Admiten una morfología modular para pequeños volúmenes, aunque suelen ser modelos compactos. La configuración de sus paredes permite que se realicen conexiones in situ que son selladas con el mismo material que conforma el depósito, lo que da cierta versatilidad de trabajo en obra. Son muy ligeros con relaciones peso-volumen muy bajas, en comparación con otros materiales, por lo que son igualmente adecuados que los depósitos de PE para instalar en sótanos. Sin embargo no están fabricados de una sola pieza y, aunque su estanqueidad es buena, puede presentar problemas en el largo plazo.

Tabla 4.4. Relación Peso vs Volumen en depósitos de PRFV

Instalación	Morfología	Peso/Volumen (kg/m <sup>3</sup> )
Aéreo	Rectangular	~ 30 ÷ 35 kg/m <sup>3</sup>
	Cilíndrica/Troncocónica	~ 20 ÷ 25 kg/m <sup>3</sup>
Enterrado	Cilíndrica/Troncocónica	~ 20 ÷ 25 kg/m <sup>3</sup>

Los depósitos de acero están contruidos con chapas de acero galvanizado onduladas y curvadas que se unen entre sí. La base del depósito consiste en una cimentación que soporte el peso del agua, bien en hormigón armado o directamente el terreno compactado, que se impermeabiliza con una lámina de polietileno o de PVC atornillada a las paredes laterales. Se pueden cubrir pero lo más habitual es que el depósito se encuentra abierto por su parte superior.

Sus características constructivas hace que sean depósitos de elevada capacidad, desde 40 m<sup>3</sup> hasta 7500 m<sup>3</sup>, lo que provoca que su campo de aplicación sean las grandes instalaciones.

La geometría del depósito es circular y su morfología es aérea y, debido a su elevado tamaño, se construyen en superficie. Es por ello que el peso de sus componentes no es factor a tener en cuenta debido a que es posible el acceso de maquinaria pesada para proceder a su instalación.

La fabricación de las paredes con chapa modular permite que le sean conectadas todo tipo de derivaciones.

Los depósitos de hormigón son fabricados in-situ. No son elementos comerciales propiamente dichos sino que son encofrados en la propia edificación. Eso supone que no tienen problemas para su instalación en sótanos puesto que pueden ser ejecutados

durante la fase de construcción del edificio. Además pueden ser instalados en superficie o enterrados, con un buen comportamiento en el caso de circulación de tráfico rodado sobre su cubierta.

Su geometría suele ser hexaédrica, aunque es posible encontrar otras formas debido a la fabricación mediante encofrado. Sus dimensiones son muy variables debido a la versatilidad del proceso de ejecución. Sin embargo su coste de ejecución tiende a incrementarse para depósitos de pequeño volumen debido al espesor mínimo de sus paredes. Es por ello que se construyen en el rango de volúmenes medianos y grandes, entre 12 y 500 m<sup>3</sup>.

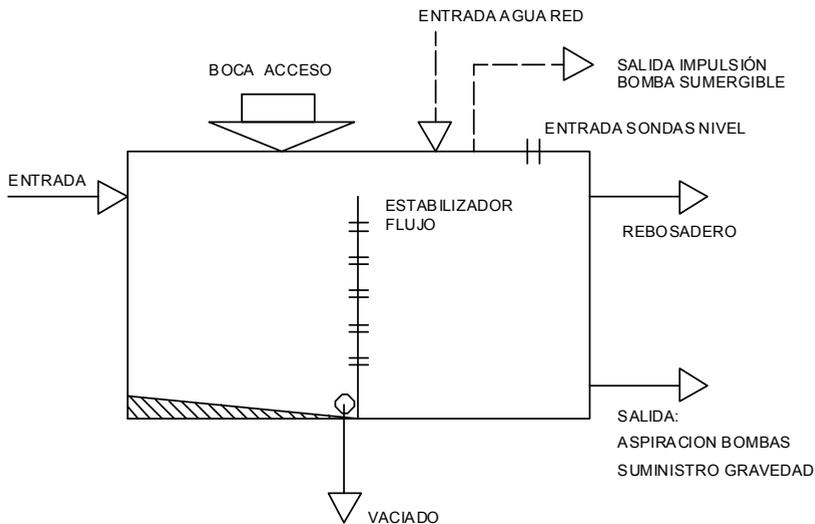


Figura 4.3. Esquema de un depósito de recogida de pluviales

Los depósitos deben disponer de una serie de conexiones, tal y como puede observarse en la Figura 4.3, que permitan una correcta operación del depósito y también su limpieza y mantenimiento. Dependiendo de la configuración y la morfología de la instalación, algunas de estas conexiones podrían variar en su disposición. De entre las que tienen una disposición fija están:

- Entrada de pluviales, provenientes del separador de lluvia. Conviene que la tubería de entrada se prolongue en el interior del depósito hasta su base, con una terminación que difunda el flujo y evite turbulencias en la salida.
- Rebosadero
- Boca de acceso. No tiene por qué ser una boca de hombre sino simplemente permitir el acceso para su limpieza desde el exterior y para introducir bombas o sondas en algunas morfologías.

Las conexiones que pueden variar con la configuración son:

- Salida para aspiración de bombas. Es la conexión donde se conecta la aspiración el grupo de bombeo en caso de que éste se sitúe fuera del depósito. Está dispuesta en la parte inferior del depósito para aprovechar al máximo la capacidad de almacenamiento del mismo. Así, el volumen útil será el definido por el nivel al que se encuentre la conexión del rebosadero y el de ésta salida (teniendo en cuenta la sumergencia mínima necesaria para la bomba). En el caso en que el suministro desde el depósito hacia la instalación se realice por gravedad, será ésta la conexión donde se empalme la tubería de abastecimiento.
- Salida de impulsión de la bomba sumergida. En las morfologías del SAP en las que se instala una bomba sumergida para dar presión a la red de abastecimiento, la salida de la bomba sumergible se coloca en la parte superior, por encima del nivel del rebosadero. De esta forma, la conexión en el depósito no tiene que ser estanca lo que facilita la instalación y unión de la tubería con la bomba.
- Tubería de vaciado. Instalada sólo en los depósitos que van en superficie. Estará situada en la parte inferior y permitirá el vaciado del depósito para operaciones de limpieza y mantenimiento. Dispondrá de una válvula de seccionamiento para su operación. En depósitos enterrados, la posición inferior de la tubería exige que el nivel de la red de saneamiento se sitúe por debajo del depósito para que pueda recibir las aguas durante el proceso de vaciado. Si ésta situación se produce, entonces la válvula de operación se situaría en una arqueta anexa y se podría instalar la conexión de vaciado tal cual. De no ser así, no existirá conexión de vaciado ( o estará cegada) y los procesos de vaciado se realizarán desde el interior del depósito con ayuda de una bomba de achique.
- Entrada desde la red. Cuando la configuración del sistema de abastecimiento dual sea a través del depósito (se comentará en el apartado de morfologías) se requiere de una entrada de agua alternativa a la proveniente del separador de lluvia. Si se opta por una morfología distinta, ésta entrada se anula.

- Conexión de sondas. En caso que el funcionamiento del SAP requiera de la existencia de sondas de nivel que controlen el arranque y paro de las bombas, se utiliza esta entrada para introducir y fijar las sondas a los niveles adecuados. Si no es necesaria, ésta conexión se anula.

### **3.6. EQUIPO DE BOMBEO**

---

El agua almacenada en el depósito se encuentra a presión atmosférica, y la única energía que dispone es la debida a la cota de la superficie libre de la lámina de agua. Para la mayoría de instalaciones, la energía potencial disponible no es suficiente para atender las demandas venciendo las inevitables pérdidas de carga de la instalación. Es por ello que es necesario presurizar el agua suministrada mediante un grupo de bombeo.

El funcionamiento del sistema de bombeo está totalmente independizado del propio sistema de captación y almacenamiento. Las características del grupo de bombeo, su forma de operación, su comportamiento, e incluso su dimensionado son similares a los de cualquier otro sistema de bombeo de un edificio que aspire desde un depósito atmosférico.

El equipo de bombeo lo formarán, por tanto, una o varias bombas, un depósito presurizado (calderín hidropresor) y los presostatos y equipos de maniobra que permitan de forma automática arrancar y parar la/s bomba/s según los niveles en el calderín.

El objeto de instalar un calderín acumulador es para evitar que la bomba arranque para dar presión cada vez que se produce un consumo. De ser así, los sobrecalentamientos que se producen, durante los arranques, en el motor eléctrico que acciona la bomba cuando éstos son muy consecutivos, pueden provocar la pérdida de protección en el bobinado del motor y su cortocircuito.

El modo de operación del equipo se corresponde con el de un sistema de bombeo con calderín acumulador (López-Patiño et al., 2003). De modo general es el agua presurizada del calderín la que atiende la demanda y lo que hace la bomba es reponer los volúmenes en el calderín cuando las condiciones de presión no son las suficientes.

El sistema de operación debe disponer de algún tipo de dispositivo que neutralice el funcionamiento de la/s bomba/s en el momento en que los niveles en el depósito de aspiración indiquen que el volumen de agua de lluvia disponible se ha agotado. Ese nivel mínimo se alcanza bien cuando se llega hasta el punto de sumergencia mínima o cuando comienzan a presentarse el fenómeno de cavitación en la bomba (López-Patiño, et al. 2003).

Como quiera que el funcionamiento del conjunto depósito atmosférico-bomba es propicio a que aparezca la cavitación, una cuestión relevante a la hora de elegir los equipos de bombeo es que estén diseñados para funcionar cerca de las condiciones de cavitación, disponiendo de curvas con bajos valores de NPSH.

#### **4. MORFOLOGÍA DEL SISTEMA**

---

La adecuación de soluciones durante la fase de diseño de los sistemas de aprovechamiento de lluvia va a depender en gran medida de la morfología de la instalación. Éstas se van a poder clasificar según varios criterios.

Atendiendo a la superficie de captación, se pueden clasificar en: sistemas de cubierta, sistemas de superficie ó pavimento, y sistemas mixtos.

Los sistemas de cubierta recogen el agua de lluvia desde las cubiertas del edificio. Debido a la impermeabilidad exigible a la cubierta, la escorrentía va a ser muy alta.

Los sistemas de superficie ó pavimento recogen el agua a nivel de la rasante del terreno. Se va a tratar de las superficies que rodean al edificio dentro de una parcela. Generalmente son soluciones en las que el terreno se encuentra pavimentado, pues en este caso la escorrentía es elevada y permite su aprovechamiento. Cuando la superficies son ajardinadas, la propia permeabilidad del terreno no permite la captación de lluvia para su aprovechamiento. Así pues, los sistemas de superficie se deben corresponder con parcelas duras desde el punto de vista urbanístico.

Los sistemas mixtos son aquellos en los que se aprovecha tanto las escorrentías que provienen de cubierta como las de superficie.

Un sistema de aprovechamiento de la escorrentía sobre el pavimento puede ir acompañado del aprovechamiento de la lluvia sobre cubierta, por lo que los sistemas de sólo pavimento no son muy frecuentes. Una solución con un sistema de cubierta permite trabajar con depósitos en superficie o semienterrados. Sin embargo, cualquier solución que incluya un sistema de pavimento obliga a enterrar el elemento de almacenamiento, con la que la instalación se encarece por el sobrecoste de la excavación del depósito. Es por ello que, dentro de toda la casuística, las soluciones de sólo cubierta son las más frecuentes.

Los sistemas de cubierta, por su parte, pueden tener varias configuraciones. Atendiendo a la solución arquitectónica del edificio es posible encontrar sistemas de cubierta inclinada y de cubierta plana. Según el sistema de recogida de aguas pluviales de cubierta existen sistemas de gravedad y sistemas por presión.

En las edificaciones de cubierta inclinada, la cubierta dispone de una cierta pendiente para facilitar la escorrentía de forma natural hacia su perímetro. El agua se canaliza después y se vierte directamente al suelo. En edificaciones aisladas de poca superficie de cubierta, y en zonas donde las nieves son frecuentes, para evitar un sobredimensionado del forjado de cubierta por el peso propio de la nieve acumulada, la cubierta inclinada es la solución constructiva más frecuente.

La construcción mediante cubierta plana se refiere a una superficie con poca inclinación que vierte las escorrentías a través de un paño hacia unos sumideros de pluviales distribuidos en toda la extensión de la cubierta. Es una solución constructiva que se utiliza cuando las superficies a recoger son grandes (en ese caso la cubierta inclinada adquiere una altura excesiva) y cuando las cubiertas deben ser transitables.

Los sistemas tradicionales de recogida de pluviales tienen un funcionamiento hidráulico por gravedad. El agua que escurre por la cubierta se canaliza en conducciones por la que va a circular como flujo en lámina libre. La energía necesaria para el desplazamiento del fluido se obtiene de la cota que va perdiendo. Para ello las canalizaciones tienen que tener una cierta pendiente. Desde el punto de vista constructivo, el sistema dispone de numerosas canalizaciones verticales, bajantes, que llevan el agua de cubierta para ser recogida por unos colectores horizontales que la conducen a los puntos de vertido de la edificación (conexión con la red general).

Existen otros sistemas más novedosos que trabajan en presión. El agua recogida en cubierta alcanza una cierta cota y se canaliza a través de conducciones como flujo turbulento en presión. La energía para el desplazamiento del fluido se obtiene de la presión acumulada en el sistema. Esto permite que existan colectores horizontales que recorren y recogen varios sumideros, situados próximos a la propia cubierta, y que reducen el número de bajantes. Así se focaliza la salida de pluviales del edificio en muy pocos puntos. Los sistemas en presión facilitan la conducción de agua en un sistema de aprovechamiento de lluvia hacia los depósitos de almacenamiento, por lo que son más recomendables que los sistemas de recogida por gravedad.

A pesar de existir cubiertas que son más adecuadas que otras para cada morfología del sistema de aprovechamiento de lluvia, la determinación del sistema constructivo de cubierta, tanto en su sistema de captación como de recogida, no viene condicionada por aquella sino que es una cuestión arquitectónica. Una vez establecida la tipología de cubierta, se establece el sistema de aprovechamiento de lluvia más adecuado.

Atendiendo a la forma de almacenamiento, los sistemas de aprovechamiento se pueden clasificar en aéreos, subterráneos o semisubterráneos.

Los sistemas aéreos disponen del depósito de almacenamiento ubicado por encima de la rasante del terreno. Desde el punto de la inversión a realizar, a igualdad de volúmenes con otras soluciones, es más económica puesto que no hay que realizar excavación alguna para instalar el depósito. No obstante presenta como desventaja que el espacio que ocupa el depósito en planta no es aprovechable para otros usos, y que sólo permite almacenar la lluvia recogida en cubiertas.

Los sistemas subterráneos disponen el depósito por debajo de la rasante, ya sea enterrado o ubicado en sótano dentro de las propias edificaciones. En cualquiera de las disposiciones, es necesario realizar una excavación para instalar el depósito, lo que aumenta su coste de inversión. Sin embargo, presenta la ventaja de poder aprovechar las escorrentías superficiales lo que aumenta también los volúmenes de lluvia aprovechables. El mayor coste de inversión puede ser compensado con el mayor ahorro de agua.

Los sistemas semisubterráneos disponen de la entrada al depósito ubicada por encima de la rasante del terreno pero la base se encuentra por debajo. La posición de la entrada de aguas al depósito impide que se puedan almacenar las aguas superficiales. La ubicación semisubterránea conlleva un cierto aumento del coste de inversión debida a la excavación necesaria para albergar la parte subterránea del depósito. La ventaja que presentan es que pueden tener un mayor volumen de almacenamiento utilizando una menor superficie en planta y con un coste de inversión menor que si se enterrara todo el depósito. En determinados tipos de edificación con poca superficie no edificada, con limitaciones, por tanto, para ubicar un depósito aéreo, puede resultar una solución adecuada.

Por último, atendiendo al tipo de servicio que se va a abastecer, los sistemas de aprovechamiento de lluvia pueden ser: para riego, para limpieza y arrastre, y para consumo humano.

El abastecimiento para riego está siempre garantizado, como es evidente. El agua de lluvia almacenada no requerirá ningún tipo de tratamiento posterior, salvo los propios para evitar la proliferación de insectos en el volumen almacenado.

El abastecimiento para limpieza y arrastre comprende el uso, además de para riego, en sistemas sanitarios de inodoro o similares. Su uso está limitado por las legislaciones sobre uso de agua del lugar donde se ubica la instalación. En caso que la legislación lo permita, el agua abastecida requiere de un tratamiento de filtración para garantizar unos mínimos de calidad. Debido a la falta de potabilidad del agua, la parte de la instalación de fontanería que puede ser abastecida por el sistema de lluvia debe

poderse identificar. En este sentido el agua así suministrada suele colorearse para ser fácilmente reconocible.

El abastecimiento para consumo humano, además de poder suministrar a los casos anteriores, da servicio de agua bebible en lavabos, duchas, fregaderos, lavavajillas y cualquier otro consumo en el que pueda existir la posibilidad de que una persona llegue a consumirla. El agua debe tener los parámetros de calidad que cada legislación le exija al agua potable. Es por ello que la suministrada debe disponer de un sistema que garantice la potabilidad.

Determinadas aguas de lluvia, en zonas agrícolas con poca polución, tienen suficiente calidad para ser usadas para consumo doméstico. Sin embargo, el hecho que el agua recogida tenga una calidad suficiente para ser potable no significa que después, durante su paso por el sistema de aprovechamiento de lluvia, no pueda degradarse. La calidad debe ser exigida al agua suministrada y no sólo a la recogida. De ahí la necesidad de disponer de sistemas de potabilización del agua de lluvia.

#### **4.1. ESQUEMA DE INSTALACIÓN**

---

Conocidos los diferentes elementos que componen el sistema, es necesario organizarlos para que el sistema cumpla con la finalidad para la cual se ha concebido.

Una limitación con la que se debe contar a la hora de disponer los elementos es que el sistema de aprovechamiento de lluvia podría no disponer de los recursos hidráulicos suficientes para atender la demanda. Eso conlleva que debe existir una doble alimentación, sistema de lluvia/red general, para la instalación alimentada por el SAP.

Disponer de una doble alimentación implica que debe existir un elemento que, de forma automática conmute entre la alimentación por lluvia o por red, según las disponibilidades del primero. Además, este sistema debe evitar en todo momento el cruzamiento entre las redes, es decir, que el agua de lluvia pueda pasar a la red general de distribución y viceversa.

Analizando las situaciones y distribuyendo los elementos de la instalación, se proponen diferentes esquemas, que incluso se pueden combinar en algunos aspectos entre sí.

Así, se van a hacer distinción entre el emplazamiento del depósito, aéreo o enterrado y semienterrado, y la morfología del conmutador de flujo sistema de lluvia/red general.

El primero de los esquemas que se presenta, Figura 4.4, consiste en una disposición con el depósito aéreo. En ese caso se puede colocar un equipo de bombeo que presurice el agua procedente del depósito de lluvia en disposición "en seco" en el exterior del depósito, lo que facilita las operaciones de mantenimiento.

El control del funcionamiento de la bomba del SAP se ejerce con un transductor de presión situado en la parte inferior del depósito y que sirve como medidor de nivel. Mientras el nivel esté por encima de la sumergencia de la bomba o de su nivel mínimo de cavitación, el conjunto bomba-calderín hidropresor funcionará de forma normal. En el momento en que el nivel en el depósito de lluvia no sea el suficiente, la bomba parará dejando actuar al sistema de conmutación de flujo.

En el esquema de la Figura 4.4 se muestra un conmutador de flujo por válvulas, si bien la misma disposición de depósito aéreo se podría haber ejecutado con un conmutador de flujo en depósito, Figura 4.6. Las figuras 4.5 y 4.7 muestran otras configuraciones posibles.

En el conmutador por válvulas el sistema de control actúa sobre un conjunto de válvulas de impide el paso de caudal proveniente del SAP y abre el flujo desde la red general de distribución. La forma efectiva de realizar la conmutación puede ser diversa, bien con válvulas de tres vías gobernadas por los propios medidores de nivel en el depósito de lluvia, o bien mediante el empleo de válvulas automáticas reductoras de presión.

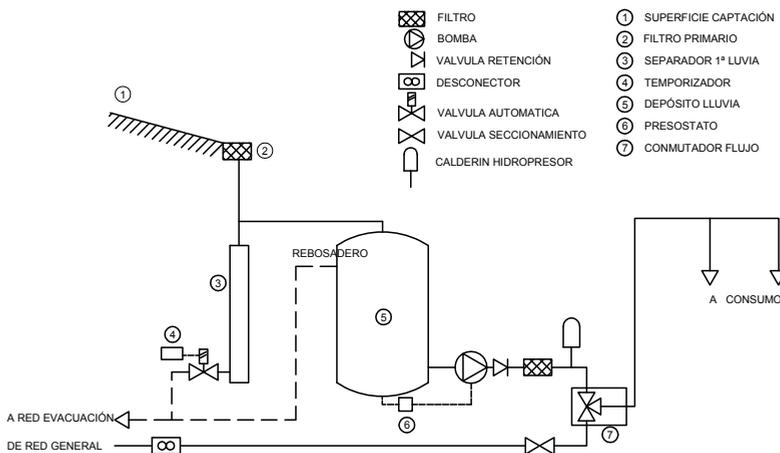


Figura 4.4. Esquema de un sistema con depósito aéreo

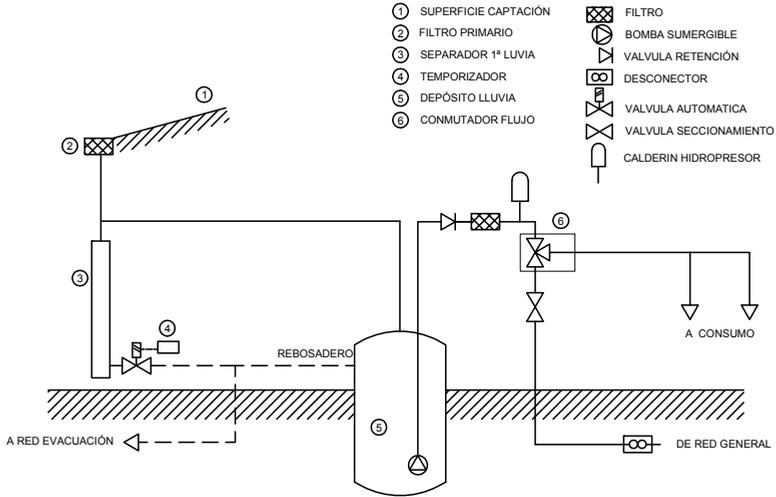


Figura 4.5. Esquema de un sistema enterrado o semienterrado

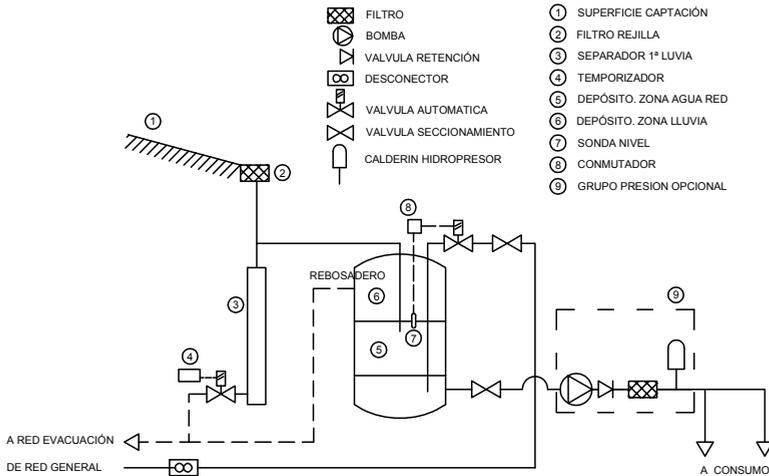


Figura 4.6. Esquema de sistema con conmutación en depósito

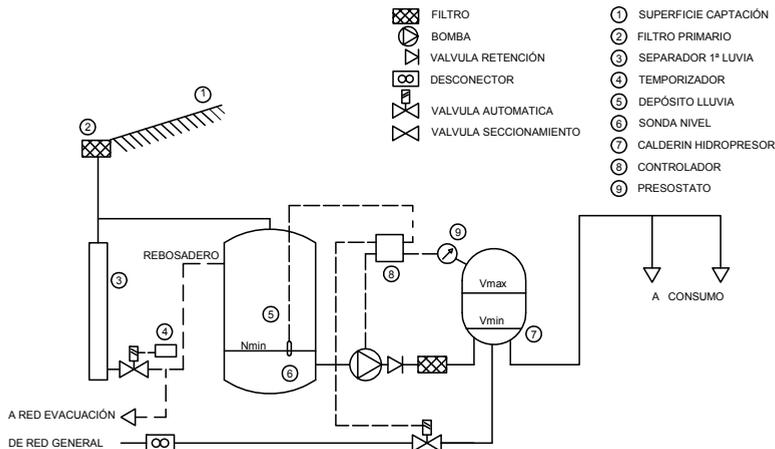


Figura 4.7. Esquema de sistema con conmutación en calderín

## 5. DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN

### 5.1. SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA

El dimensionado de los separadores de primera lluvia se realiza para garantizar que la calidad del agua que llega y se almacena en el depósito de pluviales es suficientemente buena como para el uso que se va a hacer de ella.

Según el estudio de campo realizado en Ruanda (Doyle, 2008) observando la calidad del agua recogida, se debe separar el primer milímetro de lluvia caída. Los resultados son difícilmente extrapolables a entornos urbanos, o con frecuencias de lluvia menores.

Los fabricantes de los equipos también disponen de sus ratios, muy simples, basados en sus experiencias. Estos volúmenes se definen en base al tamaño de la superficie de captación y la carga contaminante sobre dicha superficie.

Como quiera que los valores están basados en su experiencia práctica, su base científica es de difícil contrastación lo que los hace difícilmente extrapolables a aplicaciones que se encuentren fuera de su zona de influencia. Se establece, para separadores por discriminación de volumen, que el volumen del separador debe ser de 0,5 l/m<sup>2</sup> de superficie de captación si ésta se puede considerar como "limpia"

(RainHarvesting Ltd., 2015), es decir libre de vegetación alrededor, sin excrementos de pájaros, etc. Si la superficie de captación contiene hojarasca, excrementos o insectos, entonces el ratio aumenta hasta los 2 l/m<sup>2</sup> de superficie. Su criterio para dimensionar distingue únicamente el entorno donde se ubica la instalación y establece una proporcionalidad con el valor de la superficie de captación por cuanto que el volumen recogida depende de dicha superficie. Pero no establece ninguna relación con la intensidad de la lluvia, cuando es previsible que lluvias más intensas impliquen mayores volúmenes de separación, ni con el tipo de superficie, ni con su tamaño, por cuanto que a mayor tamaño de superficie, más contaminantes hay que arrastrar.

A continuación se va a establecer un procedimiento para el dimensionado intentando dotar de base científica al procedimiento. Habiendo varias morfologías de separadores de primera lluvia, sólo se va a desarrollar la aplicación para el dimensionado de los separadores con discriminación por volumen. Para esta morfología, el objetivo del dimensionado consiste en definir el volumen de agua que debe retener el separador de lluvia antes de derivar el agua, no contaminada, hacia el depósito principal de almacenamiento.

La carga contaminante es arrastrada, en un proceso de transporte, desde el punto de la superficie de captación donde cae una determinada partícula de agua hasta el separador.

De entre todos los puntos de la superficie de captación, existe uno para el cual la partícula de lluvia allí caída tarde más que las demás en llegar hasta el separador, es el punto más desfavorable.

Así, como planteamiento general, el volumen contaminado es el que pasa por el separador desde el instante en que se inicia la lluvia hasta el instante en que llega la partícula de agua de lluvia que se encuentra en el punto más desfavorable de la superficie de captación.

Para el proceso, debido a la aplicación del elemento que se está dimensionando, es necesario garantizar que nunca va a entrar carga contaminante en el depósito principal de almacenamiento. Como quiera que existan lluvias muy diferentes a lo largo de todo un año, y de un año a otro, es pues necesario dimensionar el equipo considerando la lluvia que mayor volumen de carga contaminante genere. Ello supone, que en las condiciones más favorables se rechaza un excesivo volumen de agua "no contaminada", que no se aproveche toda la lluvia aprovechable, y que la eficiencia de la instalación disminuye por todo ello.

La metodología que se propone consiste en:

- determinar el tiempo que tarda en llegar la lluvia, desde el punto más desfavorable hasta el separador,  $T_c$
- determinar la precipitación que se ha producido desde que se inició la lluvia hasta el instante " $T_c$ " anterior
- considerando las limitaciones geométricas que puedan existir por la posición que ocupe el separador, establecer el diámetro del separador y su longitud.

La determinación del tiempo que tarda la lluvia en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta un punto determinado es un concepto que en hidrología se conoce como el tiempo de concentración. Es un parámetro muy estudiado para el cual existen numerosas propuestas de formulación (Martínez-Solano et al., 2005). En su aplicación a la edificación, los tamaños de las superficies de captación no son muy grandes por lo que se propone para su cálculo la fórmula para flujo plano del Soil Conservation Service (USDA NRCS, 1986).

$$T_c = 5,476 \frac{(nL)^{0.8}}{\sqrt{p_2 S^{0.4}}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

En la que " $T_c$ " es el tiempo de concentración expresado en minutos; " $n$ " es el coeficiente de Manning de la superficie de captación; " $L$ " es la longitud máxima expresada m.; " $p_2$ " es la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 2 años expresada en mm.; y " $S$ " es la pendiente media de la superficie expresada en m/m.

El siguiente paso en el procedimiento consiste en determinar la precipitación caída desde el inicio de la lluvia hasta que la gota más alejada llega hasta el separador. La solución más sencilla consiste en disponer de un pluviograma de proyecto que nos indique la evolución temporal de la precipitación para una lluvia tipo y tomar la ordenada del pluviograma correspondiente a la abcisa del " $T_c$ ".

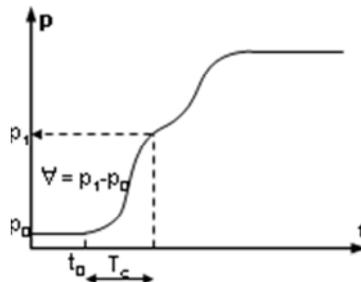


Figura 4.8. Cálculo del volumen del separador a partir del pluviograma

Sin embargo, no es frecuente disponer de históricos de información sobre pluviogramas en una determinada zona, lo que dificulta el proceso de cálculo. Es por ello que hay que adaptar la metodología a la información disponible.

La situación más frecuente es disponer de las llamadas curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en un determinado emplazamiento. La forma de obtener estas curvas a partir de históricos de intensidad media máxima anual para diferentes duraciones de lluvia se puede encontrar en Catalá Moreno (1989).



Figura 4.9. Mapa de isoyetas medias máximas en una hora y T = 10 años.  
(Fte: Catalá Moreno, 1989)

La expresión de la curva IDF se ajusta a una función exponencial del tipo:

$$\bar{I}_M = r_T \alpha (\Delta t + \beta)^Y \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

- " $I_M$ " es la intensidad media de lluvia, expresada en mm/h

- " $r_T$ " es un coeficiente de corrección que depende del periodo de retorno considerado para la lluvia,
- " $\Delta t$ " es la duración del intervalo para el que se quiere calcular el valor de la intensidad media, expresado en min
- " $\alpha$ ", " $\beta$ ", y " $\gamma$ " son parámetros característicos de cada emplazamiento.

En Catalá Moreno (1989) es posible encontrar algunas curvas IDF ajustadas, para lluvias de corta duración, según se indica en las tablas siguientes:

Tabla 4.5. Parámetros de ajuste de la curva IDF

Ciudad	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Valencia	2593,13	21	-0,83
Alicante	3532,55	24	-0,98

Tabla 4.6. Corrección curva IDF según periodo de retorno

Periodo de retorno	$r_T$ (Valencia)	$r_T$ (Alicante)
2	0,5	0,561
5	0,799	0,8239
10	1	1
20	1,1926	1,166
30	1,3022	1,263
50	1,4394	1,385

La utilización de una curva IDF para el cálculo en un determinado emplazamiento, fijados los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ , pasa a ser función del coeficiente " $r_T$ ", y por tanto, del periodo de retorno. La elección del periodo de retorno más adecuado se debe realizar en función del análisis económico de la solución. Utilizar periodos de retorno elevados implica que el valor de la intensidad media máxima será mayor, y por tanto el tamaño del separador. Un separador excesivamente grande, como se ha comentado, reduce la eficiencia de la instalación y por tanto aumenta su coste de explotación. Por el contrario, un periodo de retorno excesivamente pequeño provoca que exista una

probabilidad elevada de que se superen los valores de intensidad media máxima de lluvia de proyecto y por tanto el depósito quede infradimensionado. Ello implica que se puede producir contaminación con una probabilidad dada por el riesgo de fallo asociado al periodo de retorno considerado (Catalá Moreno, 1989). A falta de un estudio detallado de los periodos de retorno más adecuados, que se deja para una posterior investigación, se propone trabajar con un riesgo del fallo del 10% y 5 años de funcionamiento sin fallos lo que da un periodo de retorno de 50 años.

A partir de la curva IDF es necesario obtener un hietograma sintético. La integración de la función Intensidad a lo largo del tiempo da el pluviograma sintético que se requiere para el cálculo del volumen de retención.

Para calcular el hietograma sintético se propone utilizar el método de la intensidad instantánea (Chow et al., 1994). Se trata de obtener la función intensidad a partir del valor de intensidad máxima y de la relación de retardo:

$$r = \frac{t_A}{D} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Con “ $t_A$ ” el tiempo desde que se inició la lluvia hasta el instante de máxima intensidad, y “ $D$ ” la duración total de la lluvia.

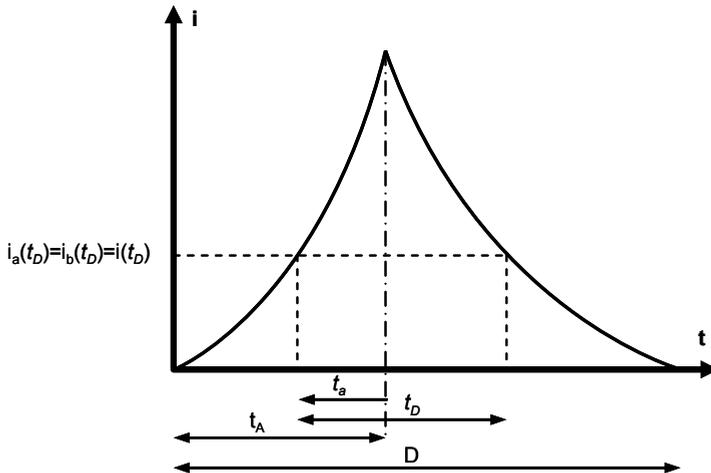


Figura 4.10. Distribución pluviométría mensual

Según Chow, el valor de “ $r$ ” se encuentra entre 0,4 y 0,5 y se mantiene constante durante toda la duración de la lluvia.

De este forma, en cualquier instante se puede establecer una relación:

$$r = \frac{t_a}{t_D} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Asumiendo que la intensidad media para una determinada duración de lluvia es la que proporciona la expresión de la ecuación 5.2, la expresión de la intensidad instantánea en función de "t<sub>D</sub>" es:

$$i_a(t_D) = i(t_D) = r_T \alpha (t_D + \beta)^{-\gamma} \left( 1 - (-\gamma) \frac{t_D}{t_D + \beta} \right) \quad \text{Ec. 4.5}$$

Si se tiene en cuenta que hasta el instante t=t<sub>A</sub>:

$$t_a = t_A - t \quad \text{Ec. 4.6}$$

se puede expresar tD en función del instante:

$$t_D = D - \frac{t}{r} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Lo que permite calcular la función intensidad para cualquier instante de tiempo, y en particular para el instante "tiempo de concentración, t<sub>C</sub>" en que llega el agua contaminada más alejada al separador.

$$i_a(t_C) = i(t_C) = r_T \alpha \left( \left( D - \frac{t_C}{r} \right) + \beta \right)^{-\gamma} \left( 1 - (-\gamma) \frac{\left( D - \frac{t_C}{r} \right)}{\left( D - \frac{t_C}{r} \right) + \beta} \right) \quad \text{Ec. 4.8}$$

La precipitación acumulada hasta ese instante, se obtendría por integración de la función intensidad instantánea desde el inicio de la lluvia hasta el instante "t<sub>C</sub>". Sin embargo, debido a las simplificaciones realizadas y la incertidumbre del ajuste, y con el objeto de garantizar una cierta mayoración del separador por seguridad, se va a aproximar la intensidad media de todo el intervalo 0-t<sub>C</sub> al valor de intensidad en el instante "t<sub>C</sub>". De este modo, la precipitación acumulada en el intervalo es:

$$p(\text{mm}) = i(t_C) \times t_C \quad \text{Ec. 4.9}$$

y el volumen necesario del separador de primera lluvia al valor de multiplicar la precipitación por la superficie de captación.

$$V(l) = p(\text{mm}) \times A(\text{m}^2) \quad \text{Ec. 4.10}$$

Para el caso de la ciudad de Valencia, una superficie de captación en cubierta plana de 100 m<sup>2</sup>, con una morfología cuadrada de 10x10, con unos paños de inclinación

del 0,5%, que se recogen en un único sumidero situado en una esquina de la superficie, asumiendo que el coeficiente de Manning se puede considerar malo (debido al necesario arrastre de suciedad) y de valor 0,03, se obtiene un tiempo de concentración de 3,63 minutos. Asumiendo que la relación de retardo de la intensidad máxima es 0,45, el volumen mínimo del separador es de 117 litros.

En comparación con los valores establecidos por RainHarvesting Ltd. ( $0,5 \text{ l/m}^2 - 2 \text{ l/m}^2$ ) se obtiene un volumen dentro del rango (50 l-200l). La adecuación del método depende en cierta medida del tratamiento que se haga de la superficie de captación y de los coeficientes de Manning de dicha superficie. Para superficies limpias hay que adoptar coeficientes de Manning bajos y con ello los volúmenes del separador lo serán también. Para superficies con abundante hojarasca, los coeficientes de Manning serán mayores y con ello el volumen del separador.

## 5.2. DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO

---

De todos los elementos que forman el sistema de recogida de agua de lluvia, el más importante, y que condiciona la instalación, es el depósito de almacenamiento.

Su importancia no radica exclusivamente en que es el elemento fundamental, sino en que es el que mayor coste supone para la instalación. Hay que tener en cuenta que, por las propias características de elemento de almacenamiento, va a requerir de la reserva de un espacio importante en el edificio.

Para una disposición en superficie, el volumen reservado al depósito es espacio que no se puede destinar a otro uso (comercial, habitacional,...) lo que conlleva en sí mismo un coste por el valor añadido de la edificación que se deja de obtener.

En una disposición enterrada del depósito, al propio coste del recipiente, hay que añadir el coste de la excavación.

Dado el importante coste que supone el depósito de almacenamiento, su correcto y ajustado dimensionado adquiere una cierta relevancia puesto que de ello puede depender que su instalación sea rentable o no.

Para dimensionar el depósito es requisito que se disponga de una serie de información previa:

- Datos temporales de pluviometría en el emplazamiento. Cuanto más extensas sean las series temporales con las que se cuente, mayor será la precisión con la que se puede dimensionar.

- Superficie de recogida de aguas. Tanto si es un sistema de recogida sobre cubierta o de recogida superficial, es preciso conocer las dimensiones de la “cuenca” receptora.
- Coeficiente de escorrentía. El coeficiente de escorrentía proporciona una relación entre la cantidad de agua caída y la canalizada hacia el depósito. Tiene en cuenta la permeabilidad de la superficie de recogida (entre otros por absorción de humedad del material que pueda haber depositado sobre dicha superficie o por la superficie en sí misma), el agua que se pierde porque excede la capacidad de los canalones o de las conducciones, el agua que es rechazada por ir excesivamente sucia y no ser aprovechable,...

Generalmente, dadas las características impermeables de las cubiertas de las edificaciones, el coeficiente de escorrentía para estos casos puede adoptar valores muy altos, 0,8 o 0,9.

- Volumen del separador de primera lluvia. Debido a que parte de la escorrentía no llega al depósito sino que es evacuada, es necesario dimensionar previamente el separador y descontar el volumen retenido en él.
- Modulación de la demanda. Generalmente los consumos no se producen de forma uniforme, sino que presentan una cierta variación temporal, ya sea diaria, semanal, o mensual o estacional.

Las variaciones diarias no serán significativas porque las aportaciones de lluvia van a ser supradiarias. El resto de periodos tendrán importancia, o no, según la frecuencia de las lluvias.

Si las lluvias son muy frecuentes a lo largo de todo el año, prácticamente diarias, una modulación semanal que tenga en cuenta la variación de días laborables a días festivos tiene cierta relevancia puesto que los depósitos tendrán un pequeño tamaño.

A medida que las lluvias sean menos frecuentes e irregulares, los periodos de modulación serán mayores mensuales o incluso estacionales para casos muy simples.

Existen dos aproximaciones para el dimensionado de los depósitos de almacenamiento:

A.- Dimensionado desde el lado de la demanda. Este criterio de dimensionado lo hace para satisfacer la demanda exclusivamente con el agua de lluvia aportada. Requiere que el volumen de lluvia aprovechado sea mayor que el volumen consumido.

B.- Dimensionado desde el lado de la aportación. Este criterio tiene en cuenta las limitaciones que pueden existir en la forma y cantidad de agua aportada.

Generalmente, se utiliza cuando el volumen de lluvia de aportación es menor que el volumen consumido.

### **5.2.1. DIMENSIONADO DESDE EL LADO DE LA DEMANDA**

---

En este criterio toda la demanda puede ser atendida con los volúmenes de agua recogidos, lo que obliga a que se cumpla el criterio de:

$$V_{\text{aportado}} \geq V_{\text{consumido}}$$

La condición se puede cumplir por dos razones:

- Aportación elevada debido a una régimen de lluvia abundante
- Consumos muy bajos por una demanda escasa o localizada en ciertos periodos del año

Aunque el balance de volúmenes sea positivo para la aportación, hay que tener en cuenta que las lluvias no son constantes en el tiempo.

El depósito de recogida de agua de lluvia se dimensiona atendiendo a la modulación de la demanda en el periodo del que se tenga datos de la aportación, ya sea diaria, o mensual.

Las dimensiones del depósito deben ser las suficientes para poder abastecer a la demanda durante los periodos en que no se producen lluvias. La máxima precisión para el dimensionado que permiten los históricos de información pluviométrica será para unas demandas y aportaciones diarias. De este modo, el volumen del depósito de lluvia se corresponderá con el de un depósito de regulación mensual que realice el balance entre las aportaciones (provenientes del agua de lluvia) y las demandas.

Como quiera que la situación en que la aportación supera a la demanda no es la más frecuente para superficies de captación tan pequeñas como las correspondientes a edificaciones, no es un caso que se vaya a desarrollar.

### **5.2.2. DIMENSIONADO DESDE EL LADO DE LA APORTACIÓN**

---

Este criterio tiene en cuenta las limitaciones que pueden existir imputables a la pluviometría: irregularidad temporal de las lluvias, diferente intensidad en cada una de las estaciones, escasez de aportaciones en general.

Por todo ello, el volumen aportado es inferior al volumen consumido. Esto provoca que no toda la demanda pueda ser satisfecha por el sistema de recogida de agua de lluvia. No obstante, se intenta aprovechar ésta al máximo haciendo que la demanda abastecida por el SAP sea igual a toda la aportación recogida. Así:

$$V_{\text{consumido del sistema}} = V_{\text{aportado}}$$

El resto de la demanda deberá ser atendida de fuentes convencionales de suministro.

En el caso más general, la demanda también va a experimentar una variación temporal. Esta puede ir simplemente desde un consumo continuo pero variable de un día a otro (régimen de consumo en días laborables y festivos, por ejemplo) hasta una variación estacional (por ocupación de la edificación sólo durante los periodos vacacionales, como puede ser el caso de muchas viviendas unifamiliares).

Habrán periodos en los que la aportación es mayor que la demanda, con un balance positivo en el volumen almacenado en el depósito de recogida de lluvia. En otros periodos el balance es negativo como consecuencia de que la demanda es mayor que la aportación. En cualquier caso, al final de periodo de estudio, generalmente un año, el balance neto debe ser cero, como consecuencia del máximo aprovechamiento de la aportación.

El depósito debe tener tal capacidad que sea capaz de almacenar el agua en los periodos en que el balance es positivo, que será igual al volumen extraído del depósito en los periodos con balance negativo.

Las dimensiones del depósito se corresponderán con las de uno de regulación para un régimen de funcionamiento anual. Se obtienen realizando un balance hidráulico entre la entrada (aportación) y la salida (demanda) del depósito. Su volumen es la diferencia entre el máximo y el mínimo volumen acumulado en el depósito, desde el inicio del periodo, siendo el volumen acumulado en cualquier momento el volumen inicial más la aportación instantánea menos la demanda instantánea.

$$V_{\text{acumulado}} = \sum_1^{i=i} (V_{\text{aportado},i} - V_{\text{demandado},i}) \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$V_{\text{deposito}} = \max(V_{\text{acumulado}}) - \min(V_{\text{acumulado}}) \quad \text{Ec. 4.12}$$

El volumen así obtenido se convierte en un valor máximo del depósito de almacenamiento del SAP. Un valor superior a éste calculado implica que no se llega a llenar por falta de aportaciones. Este valor se puede considerar como un volumen máximo hidráulico, " $V_{\text{max,H}}$ ".

De la misma manera que existe un valor máximo, también existe un límite inferior para el depósito de almacenamiento. Este valor mínimo está condicionado por la mínima

capacidad de regulación que debe tener el depósito para almacenar la lluvia en el periodo de tiempo del que se tienen registros de pluviometría y, por ello, con el periodo de tiempo con el que se está trabajando.

Lo habitual es disponer de registros pluviométricos mensuales. Es por ello que dentro de un periodo de un mes no se conoce como se han producido las lluvias, pero es evidente que éstas no son continuas ni constantes durante todo el periodo. Es por ello que se necesita de un volumen de regulación mensual del depósito, que almacene las escorrentías cuando se aportan y suministre de forma continua a los consumos. Este volumen es un mínimo para que el SAP funcione,  $V_{min,H}$ .

Debido a la falta de información fiable sobre la pluviometría en periodos inferiores a un mes, para la determinación del volumen mínimo hay que formular algunas hipótesis según la información de la que se dispone.

La información más relevante para determinar el  $V_{min,H}$  es el periodo que transcurre entre dos lluvias consecutivas.

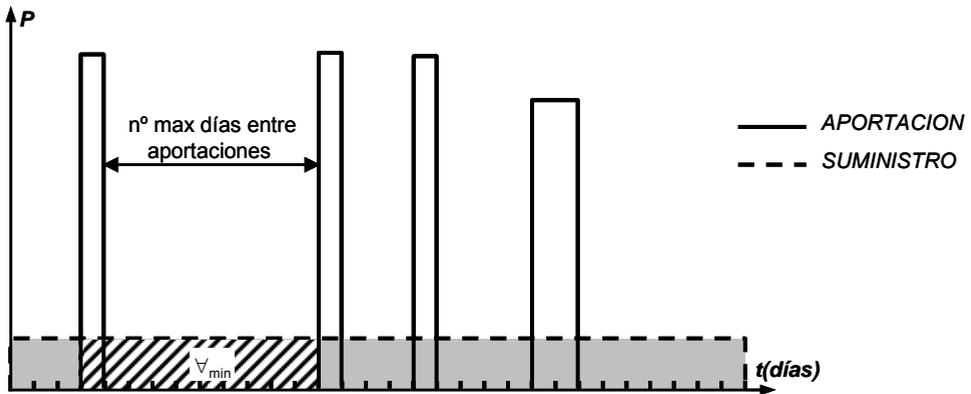


Figura 4.11. Distribución pluviométrica mensual

A partir de esa información, el volumen mínimo de regulación es:

$$V_{min,H} = \frac{\sum Q_t}{d_{mes}} (1 + \max(d_{ii})) \quad \text{Ec. 4.13}$$

Siendo:

- " $\sum Q_t$ ", la demanda mensual suministrada desde el SAP
- " $d_{mes}$ ", número de días del mes en estudio

- “ $d_{II}$ ”, número de días entre dos lluvias consecutivas

La determinación de la demanda mensual suministrada desde el SAP depende del volumen del depósito de regulación que se está calculando por lo que el procedimiento deberá ser iterativo hasta converger en una solución.

La falta de conocimiento del máximo número de días sin lluvia puede obligar a establecer otras hipótesis más imprecisas que llevan a minorar el valor de  $V_{min,H}$ . Así es más habitual disponer del número de días con lluvia en el mes. Se puede entonces distribuir homogéneamente los días de lluvia con lo que el periodo entre dos lluvias queda como:

$$\max(d_{II}) = \frac{d_{mes} - n_{II}}{n_{II}} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Siendo “ $n_{II}$ ” el número de días con lluvia en el mes.

Así pues, las dimensiones del depósito de almacenamiento deben encontrarse entre el valor máximo hidráulico, “ $V_{max,H}$ ”, y el mínimo hidráulico, “ $V_{min,H}$ ”.

Desde el punto de vista del coste, considerar que las dimensiones son superiores al volumen máximo hidráulico implican que existe un mayor coste de inversión pero no se logran mayores ahorros económicos, lo que significa que se reduce la rentabilidad de la inversión.

Si se analiza la evaluación de la eficiencia del SAP frente al volumen del depósito de almacenamiento, definida ésta como una relación entre la demanda satisfecha desde el depósito de pluviales frente a la demanda total para diferentes valores del depósito (Dixon et al., 1999) (Villareal y Dixon, 2005), se puede observar que sigue una relación exponencial.

$$E_T = \frac{\sum Q_t}{\sum D_t} \times 100 \quad \text{Ec. 4.15}$$

Donde:

- “ $Q_t$ ” es el caudal suministrado en cada instante desde el depósito de almacenamiento del SAP
- “ $D_t$ ” es la demanda en cada instante de todos los puntos de consumo que se abastecen desde el SAP

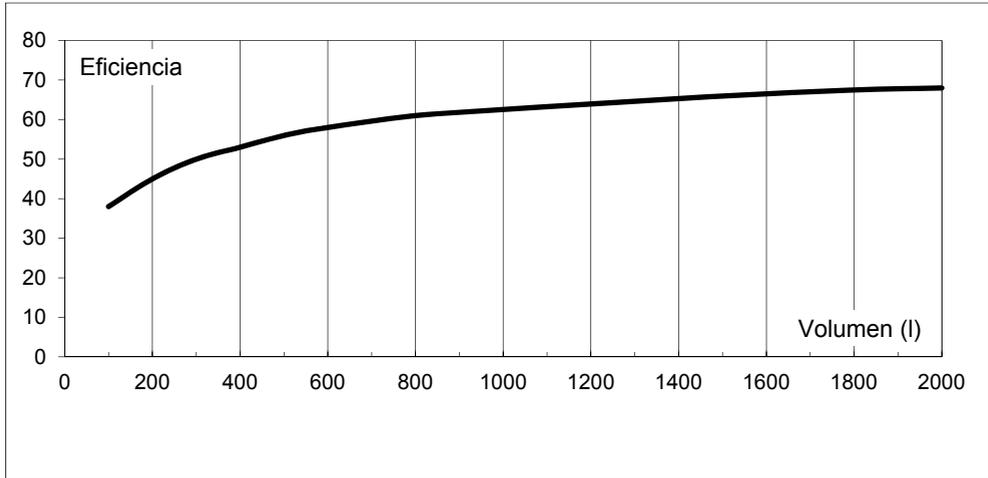


Figura 4.12. Evolución de la eficiencia del SAP con el volumen del depósito de acumulación (Dixon et al., 1999)

La gráfica de evolución de la eficiencia es asintótica hacia un determinado valor de eficiencia. Este valor es el cociente entre la pluviometría total y la demanda total desde los puntos de consumo y es equivalente a considerar que el depósito de almacenamiento tiene una capacidad lo suficientemente grande como para no desaprovechar por desbordamiento ninguna cantidad de lluvia.

Esto justifica que exista el volumen hidráulico máximo de depósito que se ha comentado antes, como el valor que hace que no desborde ninguna proporción de la lluvia aportada al depósito como consecuencia de una falta de capacidad de regulación.

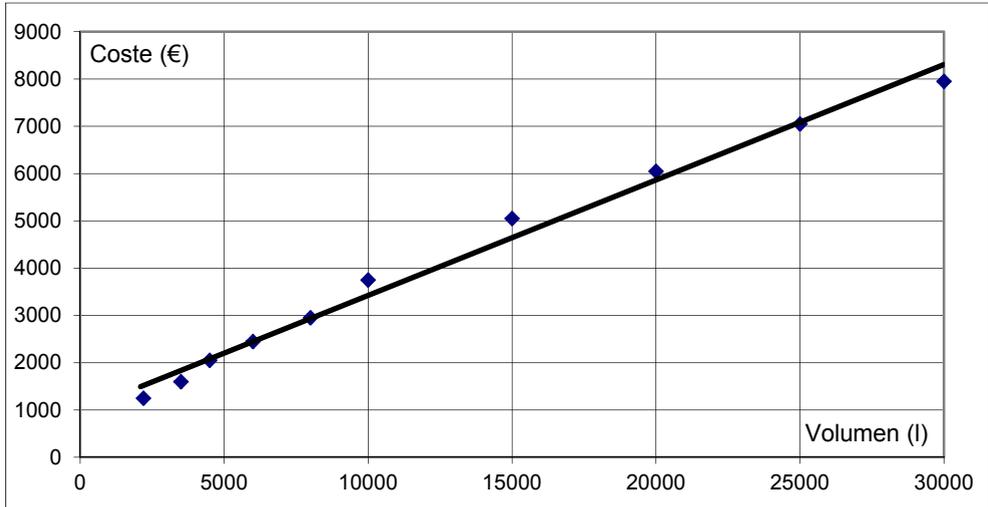


Figura 4.13. Coste de inversión de depósitos de recogida de pluviales en PRFV.  
(Fte: REMOSA, 2014)

Estudiando los costes de inversión del propio depósito de regulación, se puede establecer una progresión lineal creciente con su tamaño, Figura 4.13.

A la vista de los gráficos de eficiencia y coste de inversión con el tamaño del depósito, se puede establecer que volúmenes menores al máximo hidráulico pueden reducir el coste del depósito sin que ello afecte de forma importante sobre una reducción de la eficiencia. Así se puede establecer que existe un volumen que optimiza la rentabilidad económica de la inversión.

Atendiendo a la eficiencia del SAP, el ahorro económico que se puede obtener como consecuencia de la reducción en el consumo desde la red general de distribución se puede evaluar como:

$$\Delta h_{\forall} = p_{H_2O} \sum D_i E_{T,\forall} \times 100 \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde:

- “ $\Delta h_{\forall}$ ” es el ahorro que se obtiene en función del volumen del depósito de almacenamiento del SAP
- “ $p_{H_2O}$ ” es el coste del  $m^3$  de agua abastecido desde la red general de distribución (incluidos todos los conceptos tanto de abastecimiento como de saneamiento y vertido)

- " $E_{T,V}$ " es el valor de la eficiencia en función del volumen de depósito
- " $D_i$ " es la demanda total de los puntos de consumo abastecidos desde el SAP

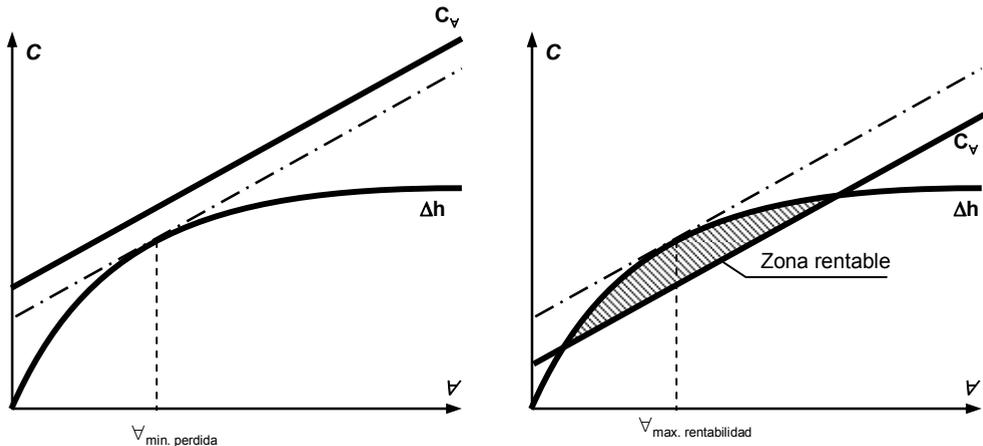
Como quiera que la demanda total,  $D_i$ , es constante y no depende del SAP (si no es atendida por el SAP debe ser atendida desde la red general), el ahorro varía de forma exponencial con el volumen del depósito.

Según los valores que adopten las expresiones del ahorro económico y del coste de inversión se pueden dar una serie de situaciones.

Si la función coste de inversión es siempre mayor que el ahorro económico, Figura 4.14.a, entonces el SAP no será rentable en ninguno de los casos. La implantación de un sistema de aprovechamiento de lluvia obedecerá a intereses medioambientales pero nunca a un criterio de rentabilidad económica.

Si la función coste de inversión está parcialmente por debajo de la función ahorro (hay que tener en cuenta que al ser asintótica la expresión de la eficiencia el coste de inversión siempre será mayor que el ahorro para los grandes volúmenes de depósito) entonces es posible encontrar un volumen de depósito que mayor la rentabilidad económica, Figura 4.14.b.

El volumen de depósito que maximiza la rentabilidad económica será el que mayor beneficio reporta, entendiendo éste como la diferencia entre el ahorro económico y el coste amortizado del depósito.



a. Coste inversión > Ahorro.  
Situación no rentable

b. Situación parcialmente rentable

Figura 4.14. Rentabilidad económica de la instalación del depósito de pluviales

El mayor beneficio se logra cuando la pendiente de la variación del ahorro con el volumen del depósito sea igual a la de la variación del coste (que es constante al tratarse de una progresión lineal).

Si se ajusta la función eficiencia a una exponencial con expresión

$$E_{T,\forall} = E_{\max} - \alpha e^{(-\beta \forall)} \quad \text{Ec. 4.17}$$

Siendo:

- $E_{\max}$  el valor asintótico al que tiende el valor de la eficiencia, y
- $\alpha$ , y  $\beta$ , los coeficientes de la función de ajuste de la curva exponencial de la función eficiencia

La pendiente de esta función será su derivada con respecto al volumen:

$$\frac{dE_{T,\forall}}{d\forall} = \alpha \beta e^{(-\beta \forall)} \quad \text{Ec. 4.18}$$

El ajuste de la función coste de inversión del depósito frente el volumen es del tipo:

$$C_{\forall} = A + B\forall \quad \text{Ec. 4.19}$$

siendo A, y B, los coeficientes del ajuste.

Entonces la pendiente de la función coste de inversión es constante y toma por valor:

$$\frac{dC_{\forall}}{d\forall} = B \quad \text{Ec. 4.20}$$

Igualando pendientes y despejando se obtiene el valor del volumen de depósito que hace más rentable la instalación:

$$\forall_{\max,R} = -\frac{1}{\beta} \ln \frac{B}{\alpha \beta} \quad \text{Ec. 4.21}$$

El volumen más rentable del depósito,  $\forall_{\max,R}$ , será siempre menor que el volumen máximo hidráulico. Sin embargo puede resultar de un valor inusualmente bajo, incluso por debajo del volumen mínimo hidráulico, lo cual no permitiría que el SAP funcione.

Así, desde el punto de vista funcional, el volumen del depósito será el valor máximo hidráulico si se quiere explotar el 100% las posibilidades del SAP, aunque no sea rentable.

Si se busca la rentabilidad, entonces el volumen del depósito será el mínimo hidráulico cuando  $\forall_{\max,R} > \forall_{\min,H}$ ; y será el volumen de máxima rentabilidad cuando  $\forall_{\max,R} > \forall_{\min,H}$ .

### 5.3. CONDUCCIONES

---

El dimensionado de las conducciones desde la superficie de captación hasta el depósito debe seguir un criterio funcional de tal forma que la toda la aportación recogida en la superficie llegue hasta el separador de primera lluvia y de éste hasta el depósito.

Estas conducciones trabajarán en lámina libre y por tanto el procedimiento de dimensionado será el correspondiente al de éstos elementos.

#### 5.3.1. DIMENSIONADO DE CANALONES

---

El canalón es una conducción con trazado casi horizontal cuyo caudal aumenta de forma uniforme a lo largo de la conducción. Pese a ello, se va a establecer una simplificación considerando que sus dimensiones van a ser constantes en toda su longitud y coincidirán en el valor correspondiente al extremo por el que discorra el máximo caudal.

Para su dimensionado se recurrirá a la expresión de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_h^{2/3} A \quad \text{Ec. 4.22}$$

Siendo: "n", el coeficiente de Manning; "S", la pendiente de la conducción, generalmente un 1%; "R<sub>h</sub>", el radio hidráulico de la conducción; y "A", la sección máxima que transporta fluido.

Para el cálculo del radio hidráulico y de la sección se necesita conocer la geometría de la sección que va a transportar líquido, que suele ser semicircular o rectangular. El procedimiento de dimensionado no difiere del de otras conducciones en lámina libre de la misma geometría (Fuertes-Miquel et al., 2004)

#### 5.3.2. DIMENSIONADO DE BAJANTES

---

La bajante es el tramo vertical que conecta el canalón con el separador de primera lluvia.

Su dimensionado se va a realizar con el mismo método con el se diseñan bajantes para edificaciones en general. Para ello, se va a utilizar la expresión de Hunter-Dawson considerando un 30% de llenado de la bajante.

$$Q(l/s) = 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot r^{5/3} \cdot [D(\text{mm})]^{8/3} \quad \text{Ec. 4.23}$$

Donde: "r", es la relación entre la sección ocupada por el agua y la sección total de la bajante.

## 5.4. EQUIPO DE BOMBEO

---

Como se ha comentado, el dimensionado del sistema de bombeo es similar al de cualquier otro sistema de bombeo de un edificio aspirando desde un depósito atmosférico.

El dimensionado del sistema de bombeo dependerá únicamente de las condiciones de demanda de agua que se tienen que atender. El proceso consiste en determinar las condiciones de selección del equipo de bombeo, en determinar el volumen del calderín hidropresor, y en establecer las presiones de arranque y parada de la bomba funcionando en el sistema.

En el código técnico de la edificación (ESPAÑA, 2006), en su documento básico BD-HS4 sobre condiciones de los sistemas de abastecimiento de agua a los edificios, se establecen unos criterios y características para realizar el dimensionado tanto de los equipos de bombeo como de los grupos hidropresores. La filosofía del código técnico, basado en prestaciones, deja el camino abierto para poder aplicar otros métodos de dimensionado. Es por ello que se puede optar por aplicar el método reglamentado en el código técnico o por aplicar otro método funcional (Fuertes-Miquel e Iglesias-Rey, 2005).

Como quiera que el método reglamentado supone aplicar los valores dimensionales establecidos en la norma y no tiene más complicación, aquí se va a desarrollar un método funcional de dimensionado.

Los pasos a seguir para proceder a un dimensionado funcional del grupo de bombeo son:

- determinar el caudal de diseño.
- determinar la altura de bombeo para las condiciones de diseño, a partir del caudal de diseño
- determinar el volumen del calderín

### 5.4.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO PARA ABASTECIMIENTO

---

Se considera como caudal de diseño de la bomba el caudal máximo probable que tiene que suministrar el equipo de bombeo teniendo en cuenta que no todos los puntos de consumo estarán funcionando de forma simultánea.

Para determinarlo hay que considerar la suma de caudales instalados que son abastecidos por el SAP y aplicar un coeficiente que tenga en cuenta la probabilidad de consumo simultáneo de todos los caudales instalados.

Teniendo en cuenta las limitaciones de aplicación del SAP, que ya se han comentado, sólo se pueden atender consumos en inodoros, baldeos y limpieza, y riego (aspersión, goteo, etc.). Asumiendo valores habituales de consumo, los caudales instalados para cada una de las demandas son los indicados en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Caudales instalados según demandas

Demanda		Caudal unitario por demanda
Inodoro		0,1 l/s
Baldeo, limpieza	Manguera $\frac{3}{4}$	0,3 l/s
	Manguera $\frac{1}{2}$	0,15 l/s
Aspersión	Conexión $\frac{1}{2}$ "	0 ÷ 0,7 m <sup>3</sup> /h
	Conexión $\frac{3}{4}$ "	0 ÷ 3,5 m <sup>3</sup> /h
	Conexión 1"	0 ÷ 6,5 m <sup>3</sup> /h
Gotero		2 ÷ 4 l/h/gotero

Para el caso de las demandas de riego resulta más práctico trabajar, en el nivel de diseño, con los valores de pluviometría para cada una de las zonas ajardinadas según la especie con la que se va a ornamentar.

Tabla 4.8. Pluviometría para riego en jardines domésticos

Especie	Pluviometría (por m <sup>2</sup> )
Césped de clima húmedo	25,5 mm/h
Césped de clima cálido	7,7 ÷ 11,5 mm/h
Tapizantes de alta densidad (10 plantas /m <sup>2</sup> )	6,5 ÷ 9,5 mm/h
Tapizantes y arbustos (5 plantas/m <sup>2</sup> )	6 ÷ 8 mm/h
Arbustos (1-3 plantas/m <sup>2</sup> )	4,5 ÷ 6,5 mm/h
Árboles	16 mm/h/árbol

El caudal total instalado se obtiene por la suma de los caudales unitarios de cada uno de los consumos. El caudal de diseño de la bomba se obtiene aplicando una función de probabilidad al consumo simultáneo de cada uno de los consumos.

La función de probabilidad de utilización simultánea de “n” usuarios tiene por expresión:

$$k = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \quad \text{Ec. 4.24}$$

Asimilando el número de usuarios a cada una de las demandas, “n” representaría el número total de puntos de consumo que se abastecen, entonces “k” es el coeficiente de simultaneidad.

El caudal de diseño “Q<sub>d</sub>”, será el resultado de multiplicar el caudal total instalado por el coeficiente de simultaneidad:

$$Q_d = k \sum Q_i \quad \text{Ec. 4.25}$$

No obstante, al tratarse de demandas de riego en la mayoría de los consumos, éstas van a estar sometidas a una programación temporal, lo que permite conocer la simultaneidad de éstas demandas.

Analizando el sistema de abastecimiento se puede establecer que el caudal de diseño es la suma entre el caudal más probable de los inodoros abastecidos y los riegos no programados (mangueras), más la máxima demanda de los riegos programados.

$$Q_d = k_i \sum Q_i + \max(Q_p) \quad \text{Ec. 4.26}$$

Siendo:

- " $Q_i$ " cada uno de los consumos unitarios de los inodoros y mangueras instalados,
- " $k_i$ " el coeficiente de simultaneidad de los consumos de inodoros y mangueras exclusivamente, y
- " $Q_p$ " cada uno de los consumos programados temporalmente

De cualquiera de las maneras, el valor del caudal de diseño obtenido será el caudal con el que se entre a seleccionar la bomba.

### 5.4.2. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PIEZOMÉTRICA DE DISEÑO PARA ABASTECIMIENTO

---

La altura de diseño ( $H_d$ ) es la altura piezométrica requerida por la instalación para vencer el desnivel geométrico, más las pérdidas de carga en la instalación, más la presión residual mínima en los puntos de consumo

$$H_d = H_g + \sum \Delta H_i + \frac{P_r}{\gamma} \quad \text{Ec. 4.27}$$

Donde: " $H_g$ " es el desnivel geométrico; " $\Delta H_i$ " es la pérdida de carga en conducciones de cada tramo; y " $P_r/\gamma$ " es la presión residual en el punto de consumo.

Como quiera que la instalación la conforman varios puntos de consumo, la red de abastecimiento debe alcanzar a cada uno de ellos formando un entramado ramificado. Cada uno de los puntos de consumo y de los trazados tendrá una diferentes características de desnivel, pérdida de carga y presión residual, por lo que será necesario establecer las condiciones más desfavorables para poder calcular la altura de diseño de la instalación. Para ello se van a evaluar de un lado la suma del desnivel geométrico y la presión residual mínima, y de otro la pérdida de carga por cuanto el dimensionado de las conducciones tiene su propia metodología.

El desnivel geométrico es conocido si están ubicados los puntos de la instalación. En cuanto a las presiones residuales mínimas, la normativa (ESPAÑA, 2006) establece que para cualquier punto de consumo debe haber una presión residual mínima de 100 kPa (10 mca). En esta reglamentación no se incluyen las demandas de riego, pero tanto goteros como aspersores tienen, por sus propias características, unas exigencias de presión residual que fija cada fabricante (y que suele oscilar entre 5 y 8 mca según modelos).

Las pérdidas de carga dependen de las dimensiones de las conducciones en el lado de la impulsión de la bomba. Si no se tiene en cuenta un dimensionado económico de las conducciones, y se asume un dimensionado por pendiente uniforme, la conducción con mayor longitud será la que más pérdida de carga introduzca.

La pérdida de carga de la conducción se puede evaluar mediante la expresión de Darcy-Weisbach para conducciones con caudal constante. Para el caso de las conducciones de caudal variable a lo largo de la conducción (conducciones con goteros) se puede asumir la expresión de pérdida de carga:

$$\Delta H = jL^3 \frac{q_g^2}{3s^2} \quad \text{Ec. 4.28}$$

Expresión en la que "j" es la pendiente hidráulica del tramo; "L" es la longitud total de la conducción con goteros; "q<sub>g</sub>" es el caudal unitario de cada uno de los goteros; y "s" es la separación entre goteros, y en la que se ha supuesto que entre goteros el caudal varía uniformemente.

Obtenida la altura de diseño, se asume este valor como la altura de selección de la bomba y junto con el valor de caudal de selección se procede a elegir el equipo de bombeo.

### 5.4.3. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL GRUPO DE BOMBEO

---

Como se ha comentado la bomba no está continuamente en funcionamiento, ni arranca cada vez que hay un consumo. La bomba se pondrá en marcha para reponer el volumen en el calderín cuando éste no sea suficiente y parará cuando al alcanzar un valor de presión máxima en la instalación.

El nivel de presión mínima en el calderín, que será el de arranque de la bomba, lo establece la presión que hace que en el punto más desfavorable de la instalación, teniendo en cuenta el desnivel y la pérdida de carga hasta él, no se alcance la presión residual mínima. Coincide con el valor de la altura piezométrica de diseño de la bomba.

El nivel de presión máxima será un margen diferencial por encima del nivel anterior. Cuanto mayor sea el margen diferencial, mayor será el volumen del calderín. Es por ello que se suele adoptar como criterio un margen de unos 15 mca sobre el nivel de presión mínima.

Por otro lado, la bomba debe estar en funcionamiento cuando las condiciones en la aspiración sean las adecuadas en cuanto a las condiciones de cavitación y sumergencia mínimas.

Para ello se va a calcular el nivel mínimo en el depósito de aspiración de tal forma que la bomba pare, o no se ponga en marcha, (y entre a funcionar el sistema de abastecimiento desde la red general) en el momento en que se alcance dicho nivel. El nivel mínimo será el mayor que se obtenga de entre el calculado por condiciones de cavitación en la bomba o por sumergencia mínima.

Por condiciones de cavitación, el nivel mínimo se obtiene igualando las NPSH de la instalación y de la bomba y despejando la altura de aspiración (López-Patiño y Martínez-Solano, 2010).

$$z_c \geq \text{NPSH}_r(Q_{\max}) - (10,33 - r_{\text{asp}} Q_{\max}^2 - T_v - z_{\text{eje}}) \quad \text{Ec. 4.29}$$

Donde:

- " $z_c$ " es el nivel mínimo por condiciones de cavitación con respecto a la solera del depósito de aspiración
- " $r_{\text{asp}}$ " es la pérdida de carga entre el depósito y la bomba
- " $T_v$ " es la presión de vaporización del agua a la temperatura de ésta
- " $z_{\text{eje}}$ " es el desnivel al que se encuentra el eje de la bomba con respecto a la solera del depósito, positivo si está por encima y negativo si está por debajo
- " $\text{NPSH}_r$ " es la NPSH de la bomba
- " $Q_{\max}$ " es el caudal más desfavorable para la cavitación

Por condiciones de sumergencia, dependiendo del tipo de conexión al depósito en el lado de la aspiración el valor puede ser mayor o menor. De modo general (Martínez Solano, 2003) se puede establecer que el nivel mínimo será:

$$z_s \geq 2,25D_{\text{asp}} + z_{\text{asp}} \quad \text{Ec. 4.30}$$

Donde:

- " $z_s$ " es el nivel mínimo por sumergencia con respecto a la solera del depósito
- " $D_{\text{asp}}$ " es el diámetro del tubo de aspiración de la bomba
- " $z_{\text{asp}}$ " es el nivel al que se encuentra el tubo de aspiración de la bomba con respecto a la solera del depósito

El nivel de parada de la bomba por fallo en la aspiración será el mayor de entre " $z_c$ " y " $z_s$ ".

#### 5.4.4. DIMENSIONADO DEL CALDERÍN

---

El calderín hidropresor acumula presión debido a la compresión a la que se somete un gas (aire o nitrógeno) encerrado en su interior.

El consumo del agua almacenada en el calderín hace que el gas se expanda y se produce una disminución de presión, que en su punto mínimo obliga a la bomba a arrancar. Al volver a entrar agua en el calderín el gas se vuelve a comprimir y aumenta su presión hasta el umbral máximo que provoca el paro de la bomba.

Si la demanda de agua persiste, el ciclo se volverá a iniciar, produciéndose arranques y paradas de la bomba de forma alterna pero continuados en el tiempo.

Como en cada arranque se produce una elevación de temperatura en la parte eléctrica que acciona la bomba, es necesario dejar un tiempo suficiente para que el motor eléctrico se refrigere adecuadamente antes de producir un nuevo arranque.

Durante ese tiempo, en que la bomba no debe arrancar, la demanda es satisfecha por el volumen acumulado en el depósito, que debe tener la capacidad suficiente. Así pues, el dimensionado del calderín viene condicionado por la periodo entre dos arranques consecutivos.

La expresión que permite calcular el volumen del calderín es la conocida como expresión de Valibousse (López-Patiño et al., 2003):

$$V_c (l) = 15k \frac{Q_b (lpm) H_{\max (mca)} + 10'33}{N_c (l/h) H_{\max (mca)} - H_{\min (mca)}} \quad \text{Ec. 4.31}$$

Donde:

- “ $Q_b$ ”, es el caudal de la bomba cuando trabaja en las condiciones de presión mínima en el calderín
- “ $N_c$ ”, es el número máximo de arranques por hora, que depende de su potencia y están indicados en la Tabla 4.9
- “ $H_{\max}$ ”, es la altura piezométrica de la bomba en el momento de su parada
- “ $H_{\min}$ ” es la altura piezométrica de la bomba en el momento de su arranque
- “ $k$ ” es un coeficiente de mayoración que vale 1,25 para calderines de membrana y 2,5 para el resto

Tabla 4.9. Máximo número de arranques en bomba según su potencia

Potencia	Frecuencia ( $h^{-1}$ ), $N_c$
Pot < 2,2 kw	15 - 20
3 < Pot < 13 kw	10 - 12

## 6. CONCLUSIONES

---

Los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales utilizan el agua de lluvia que cae sobre la cubierta del edificio, o sobre la parcela en la que se ubica, para ser utilizado en algunos aparatos sanitarios del propio edificio.

En algunos países en desarrollo este sistema se concibe como el único modo de disponer de agua para consumo humano. Sin embargo, en los países desarrollados, en los que existen infraestructuras de distribución de agua, los sistemas de aprovechamiento de pluviales se conciben para una mejora en la eficiencia del consumo del edificio. En este sentido, para que se implanten, debe resultar más rentable consumir agua de lluvia que agua potable desde la red general de distribución.

En general, y por restricciones normativas, el agua de lluvia se puede utilizar para suministrar agua a inodoros y para riego de jardines. En ambos casos se trata de aparatos hidrosanitarios o puntos de demanda que sólo utilizan agua fría.

En comparación con otros sistemas de ahorro de agua, que también ahorran agua caliente sanitaria, el ahorro económico asociado al ahorro de agua resulta menor. Eso, unido a unos elevados costes de inversión, hace que estos sistemas tengan periodos de retorno de la inversión muy elevados.

Por estas, y otras razones, es necesario optimizar el diseño y dimensionado del sistema, ajustando su coste de inversión lo más posible.

En esta investigación se ha desarrollado una metodología para el dimensionado económico de los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, con el objetivo que sean lo más rentables posible.



## 5. RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

---

La mejora en las condiciones de confort que los usuarios demandan en los edificios, o la exigencia de la normativa al respecto, ha fomentado que una gran parte de los edificios existentes y la totalidad de los de nueva construcción disponga de algún sistema de ventilación y/o climatización de sus locales.

Son muchos los sistemas de climatización existentes, así como las necesidades de acondicionamiento. Hay zonas, donde las necesidades son de calefacción para los duros inviernos. Pero hay otras muchas donde además, se necesita refrigeración para el verano. Sucede además, que la tendencia debida al cambio climático es que aumenten las necesidades de refrigeración en los edificios (Parkpoom et al., 2004) (Li et al., 2012).

El aire de ventilación debe ser acondicionado para mantener las condiciones de confort en el interior de los locales. En situación de clima cálido, el aire húmedo es refrigerado. Entonces es posible que en el aire se alcancen las condiciones de saturación de humedad, precipitándose el vapor de agua disuelto en él.

Tradicionalmente, el volumen de agua de condensado en los sistemas de climatización se ha evacuado a través de las redes de drenaje del edificio. El objetivo de este capítulo es poner en valor las posibilidades que hay de aprovechamiento de este volumen de agua condensada para su consumo en aplicaciones hidrosanitarias que no sean de consumo de boca.

En el fondo es llevar a escala técnica lo que muchos usuarios realizan a escala doméstica. No es difícil conocer algún caso de personas que recogen, para su uso en el riego de plantas o para obtención de agua destilada de uso doméstico, el agua condensada en los equipos de acondicionamiento de aire de tipo split, tan frecuentes en los hogares de hoy en día.

En el capítulo se va a presentar un estudio realizado por el autor, midiendo las posibilidades de obtención de agua de condensación en un edificio de oficinas. Del análisis de resultados, se va a manifestar cómo determinar las posibilidades de obtención de agua de condensación a partir de los datos de acondicionamiento térmico del edificio.

De esta manera se añade un sistema adicional de suministro alternativo de agua de consumo en edificios a los ya conocidos sistemas de aprovechamiento de aguas usadas y sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales.

A la hora de analizar las posibilidades de un sistema de aprovechamiento del agua de condensación, SAC, en los sistemas de acondicionamiento de aire, hay que estudiar la fuente de dicha condensación, el propio aire húmedo. De su análisis se podrán extraer conclusiones a cerca de la cantidad de condensado que se puede extraer, las zonas geográficas dónde es interesante implantar estos sistemas, y las condiciones de implantación.

El aire húmedo atmosférico contiene una pequeña parte de vapor de agua en equilibrio con el resto de sus componentes. La cantidad de agua contenida no depende de la composición química del aire, sino de las condiciones medioambientales, tanto climáticas, como geográficas, como de vegetación.

Zonas con elevada vegetación tienen elevados contenidos de vapor de agua. El aire de zonas desérticas, por el contrario, tiene poco contenido en vapor de agua. Zonas geográficas próximas a mares, océanos, y en menor escala ríos y lagos, tienen un aire más húmedo que otras. La dirección de los vientos, o la temperatura del aire pueden hacer que varíe la humedad en el aire.

La cantidad máxima de agua que puede contener el aire en forma de vapor de agua está limitada por la presión y temperatura a la que se encuentra dicho aire. Si cualquiera de esas propiedades varía, también lo va a hacer la cantidad máxima de vapor de agua.

El fenómeno de la lluvia, ya aprovechado como fuente alternativa de agua para sistemas de hidroeficiencia, tal y como se ha estudiado en el capítulo anterior, no es sino que una precipitación del vapor de agua contenido en el aire húmedo al alcanzar la cantidad de saturación permitida para unas determinadas condiciones de presión y temperatura.

Ahora bien, la pérdida de masa de agua puede surgir como consecuencia del tratamiento (enfriamiento) que se hace de forma artificial del aire húmedo en sistemas de deshumectación o en sistemas de acondicionamiento de aire.

Se trata ahora de aprovechar la masa de agua de precipitación generada de manera artificial en los sistemas de acondicionamiento de aire en edificios.

La procedencia del condensado del aire húmedo es la propia humedad del aire exterior, pero también la humedad añadida como consecuencia de las personas que ocupan el edificio.

En efecto, en los sistemas de climatización es habitual que parte del aire interior se recircule por cuestiones de eficiencia energética. Ese aire ha ganado humedad por la actividad metabólica de sus ocupantes.

¿Qué parámetros hay que tener en cuenta a la hora de determinar el aumento del vapor de agua contenido en el aire debido a la actividad humana?

El vapor de agua procedente de las ocupantes del edificio se genera por respiración y/o por transpiración.

La respiración es un proceso biológico de oxidación de compuestos orgánicos para producir, entre otros, CO<sub>2</sub> y agua, que se espira en forma de vapor. Es inherente a la actividad humana. La cantidad de agua producida como consecuencia de la respiración dependerá de las personas que ocupen el edificio. Por tanto, mayor ocupación supondrá una mayor producción de humedad, menor ocupación menor producción de vapor de agua.

De otro lado, la transpiración, vulgarmente conocido como sudoración, es un proceso fisiológico por el que se segrega agua por los poros de la epidermis que, posteriormente, se evapora en el ambiente y permite mantener una regulación de la temperatura corporal. Las personas transpiran como consecuencia de su actividad vital. Cuanto mayor sea su actividad, más transpiración se produce.

Por tanto, además de la ocupación, hay que tener en cuenta, como parámetro de producción de humedad la actividad metabólica desarrollada por las personas en el edificio. A igualdad de ocupación, no será la misma humedad la que se pueda generar en una biblioteca que en una sala de baile.

La actividad a la que se destina el edificio, o de manera más particular cada una de sus estancias, condiciona la generación de humedad del aire de acondicionamiento.

En resumen, a la hora de estudiar las posibilidades del sistema de aprovechamiento del agua de condensación en un edificio hay que considerar su posición geográfica, la cercanía a focos ambientales de humedad, las características funcionales del edificio y su ocupación.

Hay que hacer notar, que desde el punto de vista técnico, y al margen de la propia instalación de tratamiento de aire, el resto de equipos que se requieren para instalar y utilizar un sistema de aprovechamiento de condensados son similares a los utilizados con un sistema de aprovechamiento de aguas pluviales (SAP).

Es muy factible que un sistema SAP y un sistema SAC compartan multitud de equipos, entre ellos, filtros, depósitos y bombas.

Teniendo en cuenta que la generación de condensado está principalmente ligada a las necesidades de refrigeración, que estas se dan en periodo estival, y que en dicho periodo estival las lluvias son más escasas que en otros periodos, la complementación de los sistemas de aprovechamiento de pluviales y de condensados es total.

## 2. SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE CONDENSADOS

---

La cantidad de agua de condensación que se puede obtener del acondicionamiento del aire de un edificio depende, entre otros muchos factores, del tipo de sistema de climatización con el que cuenta.

Es por ello que se hace necesario estudiar los diferentes tipos de sistemas de climatización que existen, valorando sus posibilidades de aprovechamiento de condensados, y las condiciones de funcionamiento en que se producen.

Posteriormente, cuando la implantación de medidas de hidroeficiencia se esté desarrollando sobre un edificio ya construido, la comparación de su sistemas de climatización con los aquí analizados permitirá incluir, o no, el aprovechamiento de condensados como uno más de los sistemas de ahorro de agua que se valorarán en la implantación.

Por otro lado, si la actuación de hidroeficiencia se va a realizar sobre un edificio de nueva construcción, se adoptará alguno de los sistemas, de entre los aquí analizados, que mejores resultados se sepa que va a generar.

### 2.1. SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

---

El proceso de generación de agua de condensación dentro de un sistema de climatización, se debe básicamente al enfriamiento del aire húmedo que circula por el sistema. Es por ello que los sistemas de climatización que van a permitir el aprovechamiento de condensados están relacionados con los procesos de refrigeración.

Si bien hay algún caso en que se obtiene agua de condensación en procesos de calefacción, la proporción obtenida es mucho menor, y por ello no son estudiados.

Atendiendo a la distribución del fluido caloportador, los sistemas de refrigeración de aire se pueden clasificar en (Cejudo, 2009):

- Sistemas todo aire
- Sistemas todo agua
- Sistemas con refrigerante
- Sistemas mixtos aire-agua o agua-aire

En los sistemas de refrigeración todo aire se transporta aire, previamente acondicionado, a través de conductos de climatización y se impulsa a los locales a acondicionar. La carga térmica se compensa con la energía que aporta el aire.

El acondicionamiento del aire se consigue en equipos autónomos compactos, tipo Rooftop, o con unidades de tratamiento de aire, o UTA como se conocen habitualmente.

Los equipos compactos tienen dos partes diferenciadas, tal y como se muestra en la figura 5.1. Una de ellas es una máquina de expansión directa, por ejemplo una bomba de calor, funcionando según un ciclo de refrigeración de Carnot. La otra es propiamente el sistema de acondicionamiento del aire húmedo exterior que se impulsa a los locales.

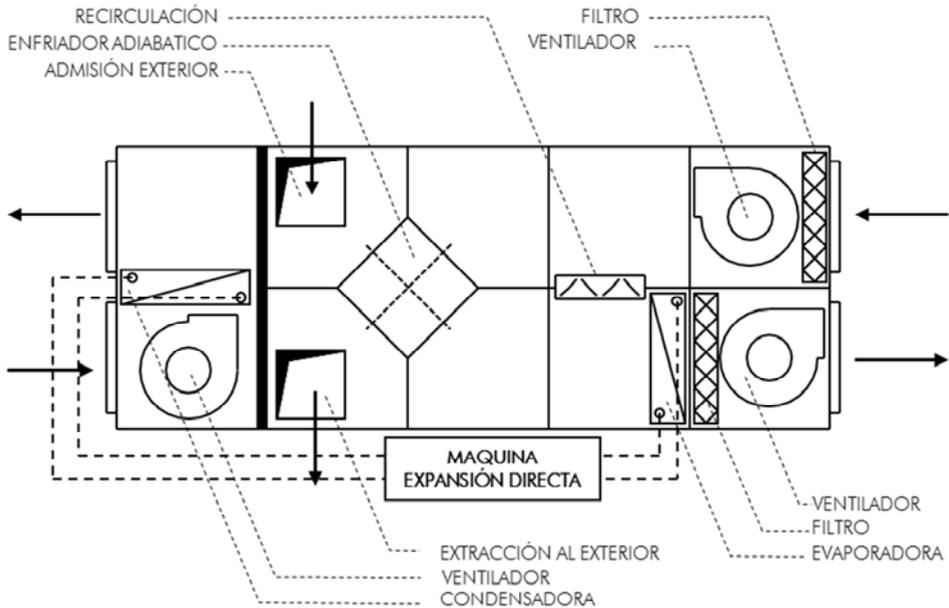


Figura 5.1. Esquema de un equipo de refrigeración autónomo compacto, tipo Rooftop

La máquina de expansión directa, en su funcionamiento en refrigeración, toma aire exterior que se hace pasar a través de una batería por la que circula el fluido refrigerante. Esta batería actúa como condensadora del fluido refrigerante, expulsando al exterior el calor extraído del interior de los locales.

La evaporadora de la máquina de expansión directa se sitúa como batería fría en la parte del acondicionamiento de aire. El aire limpio exterior, después de atravesar el recuperador de energía del aire de extracción y mezclarse con el aire de recirculación, atraviesa la evaporadora, enfriándose hasta la temperatura de impulsión.

En las unidades de tratamiento de aire, el aire es igualmente enfriado haciéndolo pasar a través de una batería fría, como la esquematizada en la Figura 5.2, pero el fluido refrigerante que circula por la batería es agua fría producida de forma externa a la UTA.

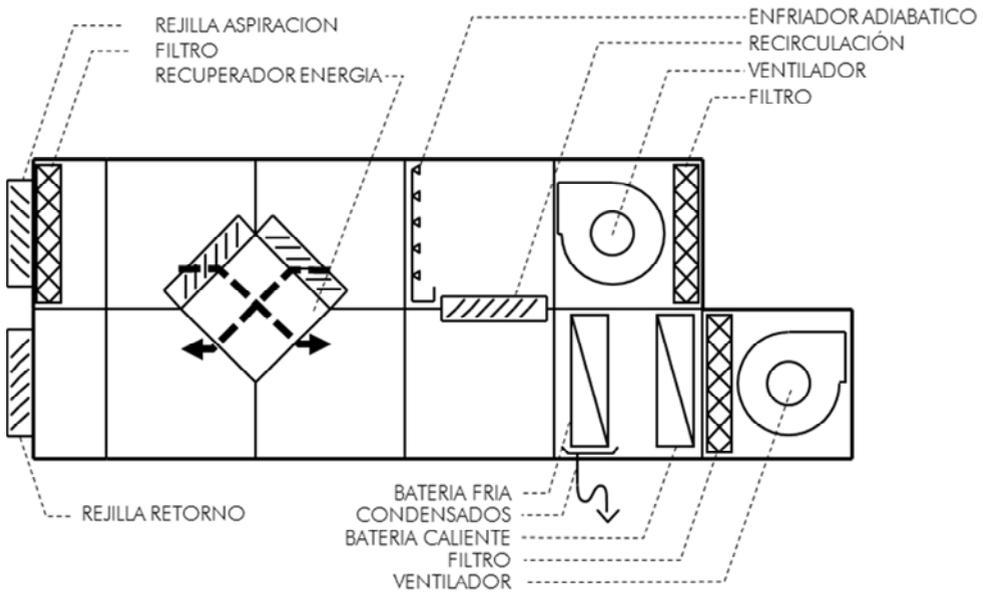


Figura 5.2. Esquema de una unidad de tratamiento de aire (UTA).

El aire exterior se hace pasar por el recuperador de energía, a su salida se mezcla con el aire de recirculación y atraviesa la batería fría, enfriándose igualmente hasta la temperatura de impulsión.

Independientemente de la forma en que se produce el fluido térmico frío de la batería, desde el punto de vista que interesa en este trabajo, el aire húmedo exterior es enfriado, después de haber sido previamente tratado en el recuperador de energía y mezclado con el aire de recirculación, en una batería fría, donde se genera el agua de condensación que se va aprovechar.

Desde el punto de vista de la instalación, para aprovechar el agua de condensación se va a canalizar el volumen de condensado que se genera en la base de la batería fría de la máquina compacta o de la UTA. El agua canalizada se almacena en un depósito de recogida de condensados que se tiene que situar por debajo de la posición de la máquina. Este aspecto es importante a la hora de tener en cuenta las posibilidades de implantación del sistema. Si no hay posibilidad de disponer un depósito por debajo de

las climatizadoras, hay que disponer de una bomba de condensados, que aumenta el consumo energético del sistema y con ello los costes de operación.

El sistema todo aire presenta la ventaja de que la generación de agua de condensación se concentra en unos pocos puntos, allí donde se ubican las UTA o los Rooftop, lo que reduce el sistema de canalizaciones necesario.

En los sistemas de acondicionamiento todo agua, el fluido caloportador es agua fría, o caliente en invierno, que se produce de forma independiente al sistema de tratamiento de aire. El agua se transporta hasta los elementos terminales, generalmente un intercambiador de calor tipo batería situada en el propio local a acondicionar. El aire del local se recircula a través de la batería, enfriándose en el proceso. Es lo que se denomina un fan-coil. La condensación se produce en la batería al circular el aire húmedo interior a través de ella.

Desde el punto de vista del aprovechamiento del agua de condensación el comportamiento de este tipo de sistemas es diferente al anterior en varios aspectos.

En primer lugar en el volumen de condensados que se va a producir. Hay que tener en cuenta que el aire que se hace pasar por el fancoil es aire interior cuya fuente de generación de humedad es la respiración y transpiración de los ocupantes, más la infiltración de aire externo húmedo a través de puertas y ventanas. En general, si la actividad metabólica no es alta, y las infiltraciones tampoco, el volumen de condensados resultará ser menor, que en el caso de un sistema aire-aire.

Si la actividad metabólica es alta, la propia necesidad de reducir la humedad hará desaconsejable este tipo de sistemas de climatización.

Desde el punto de vista de la instalación, la generación de condensados se produce en muchos puntos diferentes, tantos como ubicaciones de baterías existan, lo que encarece la red de canalizaciones. Si, además, no existe la posibilidad de que el flujo de condensados discurra por gravedad y hay que disponer de bombas de condensados, la instalación se encarece mucho desde el punto de vista de la inversión y del coste de operación.

Los sistemas mixtos aire-agua o agua-aire son una mezcla de estos dos estudiados hasta ahora, y surgen como una solución a los problemas de calidad de aire que presentan los sistemas todo agua.

En efecto, en los sistemas todo agua, al sólo haber recirculación de aire, éste no se renueva. Con el tiempo el aire del interior de los locales se contamina hasta niveles que no están permitidos (ESPAÑA, 2006a).

Si se impulsa aire limpio exterior, debe ser acondicionado previamente. De ahí surgen los sistemas mixtos.

En el sistema mixto el aire es enfriado en una batería ubicada en el local o en la zona a acondicionar. Esta batería recibe agua fría producida en otro punto de manera independiente. El aire que atraviesa la batería es una mezcla de aire de recirculación del local y aire exterior. El aire de recirculación es extraído del propio local a climatizar y el aire ya refrigerado es impulsado a través del correspondiente difusor, tal y como puede verse en la Figura 5.3.

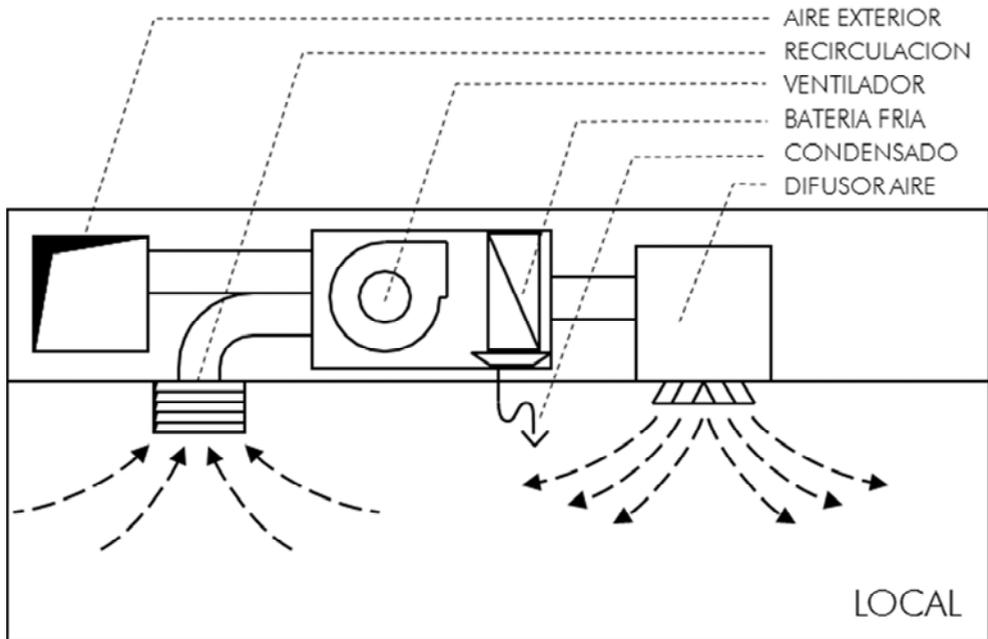


Figura 5.3. Esquema de funcionamiento de un sistema de aire-agua en modo refrigeración

Las condiciones de humedad del aire de mezcla serán las correspondientes a la corriente de aire húmedo exterior, previamente enfriado en un recuperador de calor, y la humedad del aire interior generada por sus ocupantes.

El aprovechamiento de agua de condensación es mayor que el que se obtiene con un sistema todo-agua que refrigerara los mismos locales, debido al aporte de humedad de la corriente de aire exterior.

Desde el punto de vista de la instalación, cada local o zona dispone de su correspondiente batería fría por lo que existe numerosos puntos de recogida de

condensados que encarece el sistema de canalizaciones. Debido a la distribución del aire tratado a través de difusores, lo habitual es que la batería se ubique en el techo, o falso techo, del local, con lo que la circulación de condensados se produce por gravedad. Se evita, así, el coste de inversión y operación de la bomba de condensados.

El último de los sistemas de climatización es el de refrigerante. El fluido caloportador es un refrigerante producido según un ciclo de Carnot en una máquina de expansión directa, generalmente una bomba de calor.

Un compresor eleva la presión y la temperatura de un gas refrigerante. Este gas se hace pasar por una batería de condensación en la que el fluido refrigerante pierde temperatura cediendo calor latente y pasando a estado líquido. El fluido refrigerante en estado líquido pierde presión en una válvula de expansión para finalmente atravesar otra batería de evaporación donde recibe calor para volver a gasificarse antes de pasar al compresor y repetir el ciclo.

Durante su funcionamiento la máquina de expansión directa cede calor en la batería de condensación, denominada condensador, calentando el aire que la atraviesa. A su vez, recibe calor en la batería de evaporación, denominada ahora evaporador, enfriando el aire que pasa a través de ella.

Sin embargo, según sea su funcionamiento en modo verano o invierno, el evaporador o el condensador son físicamente unidades diferentes, tal y como se indica en la Figura 5.4.

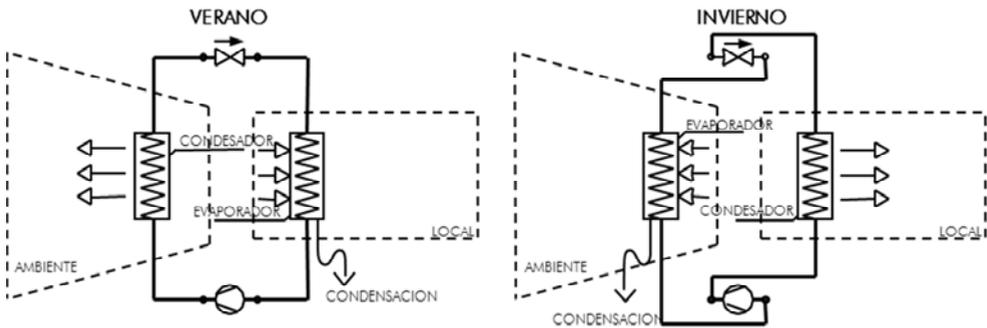


Figura 5.4. Funcionamiento de una bomba de calor, en modo verano e invierno

En el modo verano, el evaporador es la batería que se ubica en el interior del local a acondicionar, mientras que el condensador es la unidad que se ubica en el exterior, intercambiando calor con el ambiente.

En el modo invierno, el evaporador se ubica en el exterior, enfriando el aire ambiental exterior, mientras que es el condensador la batería que ubica en el interior del local a acondicionar.

Desde el punto de vista de la generación de agua de condensación, en modo verano ésta se produce en el interior del local, mientras que en modo invierno ésta se produce en el exterior.

Este es un sistema bastante popular puesto que se utiliza en numerosas viviendas que se han dotado de sistemas de climatización de aire con posterioridad a su construcción.

El sistema no dispone de renovación de la calidad del aire, por lo que el que circula por la batería interior, tanto en verano como en invierno es de recirculación. La necesaria renovación del aire que se tiene que producir lo es por abertura de ventanas hacia el exterior o por empleo de aireadores dispuestos a tal fin.

La humedad del aire en el interior del local tanto en verano como en invierno es la producida por sus ocupantes, más la debida al aire exterior de renovación necesario para mantener sus niveles de calidad.

Desde el punto de vista de la instalación, el sistema de aprovechamiento de agua de condensación es el más complejo por cuanto hay un evaporador en cada local o zona a climatizar pero también se produce condensación en la unidad exterior. La ubicación partida de los equipos hace más difícil canalizar toda el agua de condensación hasta un mismo punto de recogida.

No obstante, hay una limitación al uso de las máquinas de expansión directa con ciclo de compresión en periodo invernal en zonas geográficas donde la temperatura sea inferior a 4°C. El rendimiento de la máquina funcionando en estas condiciones es muy malo por lo que no se utilizan.

En este caso, la máquina de expansión directa sólo se utiliza en modo verano, para refrigerar el aire, reduciendo a la batería interior la producción de condensados.

Por otro lado, por sus propias características, este tipo de equipos se ubican en viviendas residenciales o pequeños locales, lo que dificulta más si cabe su aprovechamiento de forma automática.

Es conocido que en muchas viviendas, no existe un sistema de canalizaciones que conduzcan los condensados hacia una red de evacuación por lo que se instalan pequeños recipientes para almacenarlo. Puesto que el condensado ya está almacenado en recipientes, hay usuarios que lo aprovechan como agua de riego o para limpieza, pero es un procedimiento totalmente manual que carece de cualquier implantación más o menos técnica.

Comparando los diferentes sistemas analizados se puede establecer que, los que mejor aprovechamiento proporcionan son los sistemas todo-aire con unidades de tratamiento de aire y los equipos autónomos compactos.

Más adelante en el capítulo, se va a presentar el estudio realizado en un edificio acondicionado con un equipo autónomo compacto, comprobando las posibilidades reales de obtención de agua de condensación.

### **3. PSICROMETRÍA DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO Y DESHUMECTACIÓN**

---

De cara a definir y dimensionar los elementos del sistema de aprovechamiento de condensados, es necesario cuantificar la cantidad de vapor de agua que se condensa en el aire húmedo. Para ello, hay que estudiar el proceso que experimenta este aire cuando es acondicionado en cada uno de los sistemas de climatización.

Para ello, se van a analizar las transformaciones psicrométricas que tienen que ver con el proceso de pérdida de masa del aire húmedo al experimentar un proceso de enfriamiento.

Este proceso se produce al atravesar una batería fría, presente en cualquiera de los sistemas de climatización presentados en el apartado anterior.

Tanto en el caso de los sistemas de climatización con unidades de tratamiento de aire, como en los sistemas con equipos autónomos compactos, como en las máquinas de expansión directa por ciclo de compresión, el aire húmedo se enfría al atravesar una batería fría cuya temperatura puede estar, o no, por debajo de la temperatura de rocío del aire húmedo. Sólo se producirá condensación si la temperatura en la batería es inferior a la de rocío, y será éste el caso que se contemple.

La condensación se produce porque la humedad de entrada del aire en la batería es superior a la humedad de saturación en las condiciones térmicas a la salida de dicha batería. Al aire a la salida no admite tanto vapor de agua disuelto y la diferencia precipita.

El aire húmedo a la salida de la batería no se deseca por completo porque no toda la corriente de aire que la atraviesa está en contacto con sus tubos, y por tanto no todo el aire experimenta enfriamiento. Existe una eficiencia en el proceso de enfriamiento a través de la batería, igual que en cualquier otro intercambiador de calor. Esta eficiencia se denomina factor de bypass (Carrier Ltd., 2009), relaciona el gasto másico del aire seco no tratado en la batería con respecto al gasto másico total del aire seco que la

atraviesa. Cuanto menor es el factor de bypass, más eficiente es el intercambio de calor. El factor de bypass toma por valor:

$$FB = \frac{\dot{G}_{\text{aire no tratado}}}{\dot{G}_{\text{aire total}}} \approx \frac{(H_s - H_{\text{bat}})}{(H_e - H_{\text{bat}})} \approx \frac{(T_{\text{as,s}} - T_{\text{bat}})}{(T_{\text{as,e}} - T_{\text{bat}})} \approx \frac{(W_s - W_{\text{bat}})}{(W_e - W_{\text{bat}})} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

- $H_e$ ,  $T_{\text{as,e}}$ ,  $W_{\text{as,e}}$  son respectivamente la entalpía del aire seco, la temperatura del aire seco, y la humedad del aire a la entrada de batería;
- $T_{\text{bat}}$  es la temperatura media de los tubos de la batería
- $W_{\text{bat}}$  es la humedad de saturación de un aire que se encuentra a la temperatura de la batería,  $T_{\text{bat}}$ .
- $H_{\text{bat}}$ , es la entalpía de un aire que se encuentra a la temperatura de la batería,  $T_{\text{bat}}$ , y con una humedad de saturación  $W_{\text{bat}}$ .
- $H_s$ ,  $T_{\text{as,e}}$ ,  $W_{\text{as,e}}$  son respectivamente la entalpía del aire seco, la temperatura del aire seco, y la humedad del aire a la salida de batería

La cantidad de volumen precipitado,  $G_{\text{agua}}$  (kg) es la diferencia entre la humedad del aire a la entrada de la batería,  $W_e$  (kg/Kg<sub>as</sub>), y la humedad del aire a su salida,  $W_s$  (kg/kg<sub>as</sub>), por el gasto másico de aire,  $G_{\text{as}}$  (kg,as) que atraviesa la batería.

$$G_{\text{agua}}|_{\text{BAT}} = G_{\text{as}}(W_e - W_s)|_{\text{BAT}} \quad \text{Ec. 5.2}$$

La humedad absoluta no es una variable que generalmente se suele conocer del aire, tanto exterior como interior. Es mucho más frecuente disponer de los datos de humedad relativa, por la mayor profusión de este tipo de medida.

La humedad relativa,  $W\phi$ (%), se obtiene de la ecuación de Clausius-Clapeyron como un porcentaje entre la humedad absoluta del aire en unas determinadas condiciones de temperatura seca,  $T_{\text{as}}$ (°C), y la máxima humedad que puede contener ese aire a esa misma temperatura, y se calcula como el cociente entre la presión parcial de vapor de agua en el aire a las condiciones de temperatura seca,  $P_v$ , y las condiciones de presión de vapor de saturación,  $P_{vs}$ .

La presión de vapor es función exclusivamente de la humedad absoluta, mientras que la presión de vapor saturado lo es de la temperatura seca del aire. Relacionando dependencias, es posible determinar la humedad absoluta de un aire húmedo sin más que conocer su temperatura seca y su humedad relativa a través de la expresión

$$W(\text{kg}/\text{kg}_{\text{as}}) = 0,62198 \frac{\left[ \frac{W_{\phi}(\%)}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{\text{as}}(\text{°C})}{T_{\text{as}}(\text{°C}) - 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_{\text{atm}}(\text{Pa}) - \left[ \frac{W_{\phi}(\%)}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{\text{as}}(\text{°C})}{T_{\text{as}}(\text{°C}) - 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.3}$$

La dificultad reside en determinar las condiciones a la entrada de la batería, que variarán dependiendo del sistema de climatización que se emplee, puesto que lo son las transformaciones de recuperación de calor, mezcla de corrientes de aire.

De aquí que se ha hecho un análisis para cada uno de los sistemas de climatización.

### 3.1. PROCESO DE ENFRIAMIENTO Y DESHUMECTACIÓN EN UNA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE

Para poder determinar la cantidad de condensado que se produce se van a determinar las condiciones de humedad a la entrada de la batería húmeda, punto denominado MIA (AENOR, 2008b), y a su salida, punto denominado SUP.

En sistemas de climatización a través de una UTA, el aire de entrada a la batería,  $G_{\text{MIA}}$ , es la de mezcla de dos corrientes de aire: una procedente de la recirculación de parte del aire de extracción del local que se está acondicionando,  $G_{\text{RCA}}$ , contaminado, y otra del aire limpio exterior,  $G_{\text{ODA}}$ , según se puede observar en la Figura5.5.

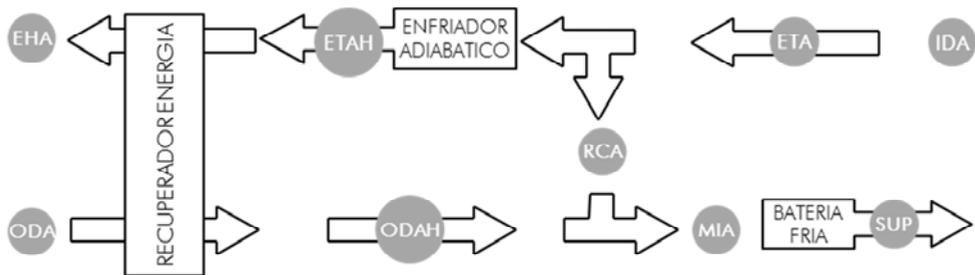


Figura5.5. Flujo de caudales en una UTA

Los datos iniciales para el cálculo son las condiciones interiores en el local acondicionado,  $T_{s,IDA}$ ,  $W_{\phi,IDA}$ , y las condiciones del aire húmedo exterior,  $T_{s,ODA}$ ,  $W_{\phi,ODA}$ .

Las condiciones interiores son las de proyecto, para los edificios de nueva implantación, o son las condiciones reales de operación del sistema de climatización, para los edificios existentes.

Las condiciones del aire húmedo exterior se pueden obtener del histórico de condiciones climatológicas en el lugar donde se ubica el edificio (AEMET, 2015) o pueden ser medidas de forma directa.

Además, de las condiciones térmicas, es necesario tener definidos los caudales volumétricos,  $q$ , en cada punto del equipo:  $q_{ETA}$ ,  $q_{RCA}$ , y  $q_{ODA}$ , con los cuales se calculan los correspondientes caudales máscicos.

El procedimiento que se plantea calcula las condiciones de humedad antes y después de la batería, condiciones MIA y SUP según el esquema de la Figura 5.5, para lo cual se va a desarrollar el cálculo de cada una de las transformaciones psicrométricas que tienen lugar entre el interior del local o el ambiente exterior, y la entrada a la batería.

En primer lugar se determinan las condiciones del aire de extracción, ETA, a partir de las condiciones IDA:

- Temperatura seca del aire, en °C:  $T_{s,ETA} = T_{s,IDA}$
- La humedad relativa del aire, en %:  $W\phi_{ETA} = W\phi_{IDA}$
- La humedad absoluta  $W_{ETA}$ , expresada en (kg/kgas)

$$W_{ETA} = 0,62198 \frac{\left[ \frac{W\phi_{ETA}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s,ETA}}{T_{s,ETA} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_T - \left[ \frac{W\phi_{ETA}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s,ETA}}{T_{s,ETA} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde,  $P_T$  es la presión total del aire, expresada en Pa, suma de la presión parcial del aire seco y la presión parcial del aire húmedo, y que coincide con la presión atmosférica a la cota a la que se encuentra la máquina, y la temperatura  $T_{s,ETA}$  está expresada en °C..

- El volumen específico, necesario para determinar el gasto máscico, expresado en m<sup>3</sup>/kg as:

$$v_{e,ETA} = 287,055 \frac{T_{s,ETA}(K)}{P_T - P_{v,ETA}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde  $P_{v,ETA}$  es la presión parcial del aire húmedo de extracción, expresada en Pa, que se calcula de la siguiente manera, y  $T_{s,ETA}$  está expresada en Kelvin.

$$P_{v,ETA} = \frac{W\phi_{ETA}}{100} P_{vs,ETA} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Donde  $P_{vs,ETA}$  es la presión de vapor saturado, expresada en Pa, que se calcula:

$$P_{vs,ETA} = 10^{\left(\frac{7,5T_{s,ETA}}{T_{s,ETA}+237,31}+2,7858\right)} \quad \text{Ec. 5.7}$$

- El gasto másico,  $G_{ETA}$  expresado en kg as/s:

$$G_{ETA} = \frac{q_{ETA}}{v_{e,ETA}} \quad \text{Ec. 5.8}$$

Con el caudal volumétrico  $q_{ETA}$ , expresado en m<sup>3</sup>/s y el volumen específico,  $v_{e,ETA}$  en m<sup>3</sup>/kg as.

- La temperatura húmeda del aire  $T_{h,ETA}$ , expresada en °C, se utiliza como variable para calcular lo que sucede en la transformación psicrométrica posterior. Se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_{h,ETA} = \frac{T_{s,ETA}(1 + 1,805W_{ETA}) + 2501(W_{ETA} - W_{Th,ETA}^*)}{1 + 4,186W_{ETA} - 2,381W_{Th,ETA}^*} \quad \text{Ec. 5.9}$$

Donde  $W_{Th,ETA}^*$  es la humedad de saturación de un aire que se encuentra a la temperatura húmeda en las condiciones ETA, expresada en kg/kg as.

$$W_{Th,ETA}^* = 0,62198 \frac{P_{vs}(T_{h,ETA})}{P_T - P_{vs}(T_{h,ETA})} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Siendo  $P_{vs}(T_{h,ETA})$  la presión de vapor saturado a la temperatura  $T_{h,ETA}$ , estando expresada en Pa. Se calcula según:

$$P_{vs}(T_{h,ETA}) = 10^{\left(\frac{7,5T_{h,ETA}}{T_{h,ETA}+237,31}+2,7858\right)} \quad \text{Ec. 5.11}$$

Como las variables de las que dependen las tres ecuaciones dependen de sí mismas, el proceso para la determinación de  $T_{h,ETA}$  es iterativo.

Las condiciones del aire de recirculación,  $RCA$ , son las mismas que el aire de extracción. Varía únicamente el caudal de aire,  $q_{RCA}$ , que será una parte del extraído.

$$G_{RCA} = \frac{q_{RCA}}{v_{e,RCA}} = \frac{q_{RCA}}{v_{e,ETA}} \quad \text{Ec. 5.12}$$

La fracción del aire de retorno que se recircula no depende de las condiciones térmicas de los locales, sino de sus condiciones de salubridad establecidas en el DB-HS3 del CTE (ESPAÑA, 2006a) y en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (ESPAÑA, 2007a).

Según la norma UNE 13779 (AENOR, 2008b), para la determinación de la fracción de aire de retorno hay que tener en cuenta las necesidades de aire limpio exterior. El motivo es el de mantener una calidad mínima exigida en el aire interior en comparación con las necesidades de impulsión de aire climatizado. Si las necesidades de aire climatizado son mayores que las necesidades de aire limpio, se recircula parte del aire de retorno. Si es al revés, no se recircula aire interior.

El aire de extracción, atraviesa el enfriador adiabático. El enfriador adiabático es un humectador en el que el agua se recircula y por tanto, en el régimen estacionario permanece a la misma temperatura que la temperatura húmeda del aire que la atraviesa. El enfriamiento se produce por el aumento del vapor de agua que contiene el aire.

Para determinar las condiciones del aire a la salida del enfriador adiabático, se requiere del conocimiento de su eficacia, EFE, con unidades de tanto por cien, definida ésta como la relación entre el aire enfriado con respecto al aire total que circula a través del mismo.

De este modo, las condiciones a la salida del enfriador adiabático, condiciones ETAH, son:

- Temperatura seca del aire, en °C:

$$T_{s,ETAH} \approx T_{s,ETA} + \frac{EFE}{100} (T_{h,ETA} - T_{s,ETA}) \quad \text{Ec. 5.13}$$

- Humedad absoluta  $W_{ETAH}$  expresada en kg/kg as:

$$W_{ETAH} = W_{ETA} + \frac{EFE}{100} (W_{Th,ETA}^* - W_{ETA}) \quad \text{Ec. 5.14}$$

Las condiciones del aire exterior después de haber atravesado el recuperador de energía, condiciones ODAH, y antes de mezclarse con el aire de recirculación son:

- Temperatura seca,  $T_{s,ODAH}$ , en °C, calculada siguiendo el procedimiento fijado en la norma UNE-EN 308 (AENOR, 1997).

$$T_{s,ODAH} = T_{s,ODA} + \frac{ETR}{100} (T_{s,ETAH} - T_{s,ODA}) \quad \text{Ec. 5.15}$$

Donde:  $T_{s,ODA}$  es la temperatura seca del aire exterior, que es un dato conocido, y ETR es la eficiencia del recuperador de energía, expresada en %.

La eficiencia del recuperador de energía depende del tipo empleado y es un dato que figura en sus características técnicas. En general, se pueden considerar los siguientes valores orientativos (ATECYR, 2012)

- o Para recuperadores de placa en contraflujo un valor entre 52 y 55%
  - o Para recuperadores de placa de flujo cruzado, un valor entre 54 y 75%
  - o Para recuperadores rotativos, un valor entre 70 y 77%
- Humedad absoluta  $W_{\text{ODAH}}$ , expresada en kg/kg as, y calculada según la norma UNE-EN 308:

$$W_{\text{ODAH}} = W_{\text{ODA}} + \frac{\text{ETW}}{100} (W_{\text{ETAH}} - W_{\text{ODA}}) \quad \text{Ec. 5.16}$$

Donde: ETW es la eficiencia higrométrica del recuperador de energía, expresada en %, y  $W_{\text{ODA}}$  es la humedad absoluta del aire exterior, en kg/kg as, que se calcula a partir de su humedad relativa con la expresión:

$$W_{\text{ODA}} = 0,62198 \frac{\left[ \frac{W_{\phi, \text{ODA}}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s, \text{ODA}}}{T_{s, \text{ODA}} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_T - \left[ \frac{W_{\phi, \text{ODA}}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s, \text{ODA}}}{T_{s, \text{ODA}} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.17}$$

- El volumen específico, necesario para determinar el gasto másico, expresado en m<sup>3</sup>/kg as:

$$v_{e, \text{ODA}} = 267,055 \frac{T_{s, \text{ODA}}}{P_T - P_{v, \text{ODA}}} \quad \text{Ec. 5.18}$$

Donde:  $P_{v, \text{ODA}}$  es la presión parcial del aire húmedo exterior, expresada en Pa, que se calcula de la siguiente manera

$$P_{v, \text{ODA}} = \frac{W_{\phi, \text{ODA}}}{100} P_{vs, \text{ODA}} \quad \text{Ec. 5.19}$$

Donde:  $P_{vs, \text{ODA}}$  es la presión de vapor saturado del aire húmedo exterior, expresada en Pa, que se calcula:

$$P_{vs, \text{ODA}} = 10^{\left( \frac{7,5T_{s, \text{ODA}}}{T_{s, \text{ODA}} + 237,31} + 2,7858 \right)} \quad \text{Ec. 5.20}$$

- El gasto másico,  $G_{\text{ODA}}$  expresado en kg/as/s:

$$G_{\text{ODA}} = \frac{q_{\text{ODA}}}{v_{e, \text{ODA}}} \quad \text{Ec. 5.21}$$

Con el caudal volumétrico  $q_{\text{ODA}}$ , expresado en m<sup>3</sup>/s y el volumen específico,  $v_{e, \text{ODA}}$  en m<sup>3</sup>/kg as.

Finalmente, las condiciones del aire a la entrada de la batería fría, condiciones MIA son la mezcla de dos corrientes de aire: una la corriente de aire de recirculación, RCA, y otra la corriente de aire exterior tratado en el recuperador, ODAH.

- La temperatura seca de entrada a la batería,  $T_{s,MIA}$ , en °C es:

$$T_{s,MIA} \approx \frac{G_{RCA}T_{s,RCA} + G_{ODAH}T_{s,ODAH}}{G_{RCA} + G_{ODAH}} = \frac{G_{RCA}T_{s,ETA} + G_{ODAH}T_{s,ODAH}}{G_{RCA} + G_{ODAH}} \quad \text{Ec. 5.22}$$

- La humedad absoluta,  $W_{MIA}$ , en kg/kg as es:

$$W_{MIA} \approx \frac{G_{RCA}W_{RCA} + G_{ODAH}W_{ODAH}}{G_{RCA} + G_{ODAH}} = \frac{G_{RCA}W_{ETA} + G_{ODAH}W_{ODAH}}{G_{RCA} + G_{ODAH}} \quad \text{Ec. 5.23}$$

- El gasto másico del aire de entrada a la batería es la suma de los gastos másicos del aire de recirculación,  $G_{RCA}$ , y del aire exterior tratado en el recuperador, que será el mismo gasto másico que el aire exterior:

$$G_{MIA} = G_{RCA} + G_{ODA} \quad \text{Ec. 5.24}$$

- Por último, la entalpía del aire a la entrada de la batería, expresada en kJ/kg,as, se calcula como:

$$H_{MIA} = C_{p,as}T_{s,MIA} + W_{MIA}(C_L + C_{p,VP}T_{s,MIA}) = (C_{p,as} + WC_{p,VP})T_{s,MIA} + W_{MIA}C_L \quad \text{Ec. 5.25}$$

Donde:

- $C_{p,as}$  es el calor específico a presión constante del aire seco igual a 1 kJ/kg,as·K,
- $C_L$  es el calor latente de vaporización del agua a 0°C igual a 2501 kJ/kg,agua, y
- $C_{p,VP}$  es el calor específico a presión constante del vapor de agua que vale 1,86 kJ/kg,VP·K.

Las condiciones a la salida de la batería dependen de sus características. La potencia total suministrada, expresada kW, al aire húmedo que la atraviesa es

$$Q_T = G_{MIA} (H_{SUP} - H_{MIA}) \quad \text{Ec. 5.26}$$

Donde:

- $H_{SUP}$  es la entalpía, en kJ/kg,as, a la salida de la batería fría, siendo  $Q_T$  negativo al estar absorbiendo calor del aire, y
- $G_{MIA}$  es el gasto másico de aire a la entrada de la batería, expresado en kg/s.

Por otro lado, dicha entalpía se calcula mediante:

$$H_{SUP} = H_{BFI} + FB (H_{MIA} - H_{BFI}) \quad \text{Ec. 5.27}$$

Donde:

- $H_{BFI}$  es la entalpía de un aire que saliera de forma ideal de la batería, es decir a la temperatura de la batería,
- $T_{s,BFI}$  (dato que es conocido de las características de la batería) y con una humedad del 100% a esa temperatura,
- $W\phi_{BFI} = 100$ ; y
- FB es el factor de bypass de la batería, es decir la relación entre el aire que es tratado en la batería, con respecto al aire total que la atraviesa, ya definido en la ecuación 1.

En este sentido hay que tener en cuenta que la batería es un intercambiador de calor con una determinada superficie de contacto entre los dos fluidos que lo atraviesan, en este caso, el aire húmedo a acondicionar y el agua de la batería. El aire que está en contacto con dicha superficie, ya sea por conducción o por convección, experimenta un intercambio energético, pero el que no entra en contacto con dicha superficie no experimenta intercambio energético alguno y se mantiene en las condiciones psicrométricas con las que entró. Las condiciones reales de salida serán la mezcla de las del aire tratado y las del aire no tratado. Un estudio en detalle del factor de bypass se puede obtener en (Pinazo, 1997).

Despejando de las ecuaciones 25 y 26, el factor de bypass se calcula como:

$$FB = 1 + \frac{Q_T}{G_{MIA} (H_{MIA} - H_{BFI})} \quad \text{Ec. 5.28}$$

Conocido el factor de bypass, la temperatura seca a la salida de la batería fría, expresada en °C, es:

$$T_{s,SUP} = T_{BFI} + FB(T_{s,MIA} - T_{BFI}) \quad \text{Ec. 5.29}$$

Y la humedad absoluta a la salida de la batería fría,  $WSUP$ , en kg/kg,as, y que en el fondo es el valor buscado, es:

$$W_{SUP} = W_{BFI} + FB(W_{MIA} - W_{BFI}) \quad \text{Ec. 5.30}$$

Donde  $W_{BFI}$  se calcula con la expresión:

$$W_{BFI} = 0,62198 \frac{\left[ 10^{\left( \frac{7,5T_{s,BFI}}{T_{s,BFI} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_T - \left[ 10^{\left( \frac{7,5T_{s,BFI}}{T_{s,BFI} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.31}$$

De esta forma, la cantidad de agua precipitada, expresada en kg, es:

$$G_{\text{agua}}|_{\text{BAT}} = G_{\text{MIA}}(W_{\text{MIA}} - W_{\text{SUP}}) \quad \text{Ec. 5.32}$$

Teniendo en cuenta que la densidad del agua se puede considerar constante e igual a 1 l/kg, a la temperatura a la que se va a producir el condensado, el caudal de condensación, en l/h, es:

$$q_{\text{agua}}(\text{l/h}) = 3600 \cdot G_{\text{MIA}}(\text{kg}_{\text{as}}/\text{s}) (W_{\text{MIA}}(\text{kg}/\text{kg}_{\text{as}}) - W_{\text{SUP}}(\text{kg}/\text{kg}_{\text{as}})) \quad \text{Ec. 5.33}$$

### 3.2. PROCESO DE ENFRIAMIENTO Y DESHUMECTACIÓN EN UN EQUIPO AUTÓNOMO COMPACTO

---

Un equipo autónomo compacto se diferencia de una unidad de tratamiento de aire en que el fluido caloportador es producido en el propio equipo mediante una máquina de expansión directa por ciclo de compresión, o bomba de calor.

Esto se traduce en que por la batería de la zona de acondicionamiento de aire, circula un refrigerante, en lugar de circular agua fría o agua caliente producida de forma externa, como sucede en el caso de la UTA.

Además, existe una única batería en la zona de acondicionamiento de aire, la batería interior. En invierno por esta batería circula el refrigerante a alta temperatura, y ésta actúa como condensador del circuito termodinámico. En verano por la batería circula refrigerante a baja temperatura y ésta actúa como evaporador. En el equipo compacto, hay otra zona, la de la bomba de calor, que también dispone de una única batería por compresor, la batería exterior. El comportamiento de ésta es contrario al de la batería interior: actúa de evaporador en invierno, mientras que se comporta como condensador en verano.

De este modo, en el equipo autónomo compacto se va a producir condensación de agua en la batería interior, mientras que en invierno la producción de agua de condensación se produce en la batería exterior.



### 3.3. PROCESO DE ENFRIAMIENTO Y DESHUMECTACIÓN EN UNA MÁQUINA DE EXPANSIÓN DIRECTA CON CICLO DE COMPRESIÓN

La máquina de expansión directa por ciclo de compresión es una bomba de calor ubicada en el propio local a acondicionar. No existe un aportación de aire externo y por la máquina sólo fluye aire de recirculación interno del local. El aire contaminado no se renueva a través del climatizador de aire. La calidad del aire interior se mantiene mediante otro sistema de ventilación ajeno. Es el caso de los populares acondicionadores de aire tipo Split que tanto han proliferado en las viviendas.

Desde el punto de vista psicrométrico, sólo hay dos condiciones del aire, las de entrada a la batería interior, y las de salida de la batería, tal y como puede observarse en la Figura 5.7.

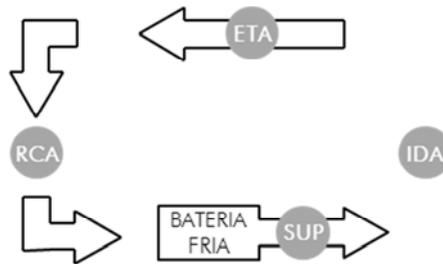


Figura 5.7. Flujo de aire en una bomba de calor tipo split

Las condiciones de entrada a la batería son las mismas que las del aire de extracción. Así, utilizando la nomenclatura de la norma UNE-EN 13779, el aire de extracción, ETA, es el mismo que el de recirculación, RCA, que es el de entrada a la batería.

Para calcular el condensado es suficiente con determinar las condiciones RCA, que son las mismas que las ETA, que a su vez son las del interior del local, IDA:

- Temperatura seca del aire, en °C:  $T_{s,RCA} = T_{s,IDA}$
- La humedad relativa del aire, en %:  $W\phi_{RCA} = W\phi_{IDA}$
- La humedad absoluta  $W_{RCA}$ , expresada en (kg/kgas)

$$W_{RCA} = 0,62198 \frac{\left[ \frac{W_{\phi,RCA}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s,RCA}}{T_{s,RCA} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_T - \left[ \frac{W_{\phi,RCA}}{100} 10^{\left( \frac{7,5T_{s,RCA}}{T_{s,RCA} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.36}$$

Con,  $P_T$ , presión atmosférica expresada en Pa, y la temperatura  $T_{s,RCA}$  expresada en °C.

- Entalpía del aire a la entrada de la batería, expresada en kJ/kg,as,:

$$H_{RCA} = C_{p,as} T_{s,RCA} + W_{MIA} (C_L + C_{p,VP} T_{s,RCA}) \quad \text{Ec. 5.37}$$

- Presión de vapor saturado, expresada en Pa:

$$P_{vs,RCA} = 10^{\left( \frac{7,5T_{s,RCA}}{T_{s,RCA} + 237,31} + 2,7858 \right)} \quad \text{Ec. 5.38}$$

- Presión parcial del aire húmedo,  $P_{v,RCA}$ , expresada en Pa:

$$P_{v,RCA} = \frac{W_{\phi,RCA}}{100} P_{vs,RCA} \quad \text{Ec. 5.39}$$

- Volumen específico, expresado en m<sup>3</sup>/kg,as:

$$v_{e,RCA} = 287,055 \frac{T_{s,RCA}(K)}{P_T - P_{v,RCA}} \quad \text{Ec. 5.40}$$

Donde  $T_{s,ETA}$  está expresada en Kelvin.

- Y finalmente, el gasto másico,  $G_{RCA}$  expresado en kg,as/s:

$$G_{RCA} = \frac{q_{RCA}}{v_{e,RCA}} \quad \text{Ec. 5.41}$$

Con el caudal volumétrico  $q_{RCA}$ , expresado en m<sup>3</sup>/s y el volumen específico,  $v_{e,RCA}$  en m<sup>3</sup>/kg,as.

Para determinar las condiciones de impulsión, SUP, hay que utilizar las características del climatizador, obtenidas de su información técnica:

- QT, es la potencia frigorífica total, expresada en kW
- $T_{BFir}$ , es la temperatura a la que trabaja la batería interior, expresada en °C, temperatura ideal a la que saldría el aire de la batería si su factor de bypass fuera nulo.

A partir de estos datos, se obtienen el resto de características del aire en las condiciones ideales de salida de la batería, consideradas éstas como si todo el aire que la atraviesa fuera tratado, o sea, como si el factor de bypass fuese nulo.

- Humedad absoluta en las condiciones ideales,  $W_{BFI}$ , considerando que la humedad relativa en las condiciones ideales de salida sería del 100%.

$$W_{BFI} = 0,62198 \frac{\left[ 10^{\left( \frac{7,5T_{s,BFI}}{T_{s,BFI} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]}{P_T \left[ 10^{\left( \frac{7,5T_{s,BFI}}{T_{s,BFI} + 237,31} + 2,7858 \right)} \right]} \quad \text{Ec. 5.42}$$

- Entalpía del aire en las condiciones ideales, expresada en kJ/kg,as,:

$$H_{BFI} = C_{p,as} T_{s,BFI} + W_{BFI} (C_L + C_{p,VP} T_{s,BFI}) \quad \text{Ec. 5.43}$$

- El factor de bypass de la batería interior es:

$$FB = 1 + \frac{Q_T}{G_{RCA} (H_{RCA} - H_{BFI})} \quad \text{Ec. 5.44}$$

A partir de aquí, las condiciones de salida con

- Temperatura seca a la salida de la batería fría,  $T_{s,SUP}$ , expresada en °C, es:

$$T_{s,SUP} = T_{BFI} + FB(T_{s,MIA} - T_{BFI}) \quad \text{Ec. 5.45}$$

- Humedad absoluta a la salida de la batería fría,  $W_{SUP}$ , en kg/kg,as:

$$W_{SUP} = W_{BFI} + FB(W_{MIA} - W_{BFI}) \quad \text{Ec. 5.46}$$

De esta forma, el gasto másico de condensación es, expresado en kg/s:

$$G_{agua} |_{BAT} = G_{RCA} (W_{RCA} - W_{SUP}) \quad \text{Ec. 5.47}$$

Y el caudal de condensación, en l/h, es:

$$q_{agua} (l/h) = 3600 \cdot G_{RCA} (kg_{as}/s) (W_{RCA} (kg/kg_{as}) - W_{SUP} (kg/kg_{as})) \quad \text{Ec. 5.48}$$

## 4. ANALISIS DEL POTENCIAL DE CONDENSACIÓN EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

---

Con la intención de verificar la bondad del procedimiento desarrollado anteriormente, el autor ha realizado una serie de medidas sobre la instalación de acondicionamiento de aire en un determinado edificio.

El objetivo del estudio es doble. Por un lado se trata de comprobar hasta qué punto el procedimiento desarrollado para el cálculo de condensaciones a partir de los datos psicrométricos del aire interior y exterior, y de las condiciones de una máquina de acondicionamiento de aire es fiable cuando se aplica a un equipo real. Por otro lado, determinar cuál es el potencial real de obtención de agua de condensación en una instalación en funcionamiento con una determinada ocupación.

Los resultados obtenidos permitirán realizar las estimaciones necesarias de cara a dimensionar sistemas de aprovechamiento de condensados y poderlos valorar como un sistema más de hidroeficiencia.

### 4.1. DESARROLLO DE LAS MEDICIONES

---

Las medidas que se han llevado a cabo se han realizado sobre el sistema de climatización de los locales de la planta baja del edificio 5C de la Universidad Politécnica de Valencia.

Se trata de un sistema de climatización independiente para esa zona de la Universidad, lo que permitía cierta libertad para fijar la forma de funcionamiento del sistema, y sobre todo para poderlo caracterizar.

El edificio en cuestión es el mostrado en la Figura 5.8. Se trata de una zona de 400 m<sup>2</sup>, destinada a uso como oficina, con una serie de despachos, almacenes, y salas de reuniones.



Figura 5.8. Planta del edificio sobre el que se han desarrollado las medidas

La máquina de acondicionamiento de aire es un equipo autónomo, con una potencia nominal de 78 kW, muy sobredimensionado para el edificio en cuestión. Dispone de un sistema de doble compresor en el circuito de bomba de calor, con baterías independientes para cada uno. La regulación se realiza por temperatura, con un único termostato ubicado en el despacho de referencia, y funcionamiento alterno de ambos compresores.

La máquina no dispone de sistema enfriamiento adiabático ni de recuperador de energía. Sin embargo, sí que equipa un sistema de enfriamiento gratuito que puede

funcionar en modo automático, o en modo manual. Durante las mediciones se ha hecho funcionar en modo manual, lo que ha permitido disponer de mayor información sobre la producción de condensados según la procedencia del aire de aspiración.

En el circuito de impulsión de aire hay un único ventilador que da servicio a las dos baterías de los dos circuitos de expansión directa, con un caudal nominal de 14400 m<sup>3</sup>/h, aunque la instalación va a funcionar a mucho menor caudal por la regulación de las rejillas en cada uno de los locales.

Las mediciones se han desarrollado en dos fases. En una primera fase se ha realizado una primera toma de contacto con el sistema que se va a medir, para conocerlo, y se han definido las variables a medir, las posibilidades de medición y los equipos necesarios para llevarlas a cabo.

En esta primera fase, las variables propuestas para las medidas fueron: temperatura y humedad exterior, temperatura y humedad en el local, número de compresores en funcionamiento, volumen de condensados producidos, tiempo de condensación.

Estas variables se mostraron insuficientes por cuanto, no permitían conocer el caudal extraído del exterior y el recirculado en el interior de la máquina, y ni permitían calcular el factor de bypass.

De esta forma no era posible estimar de forma teórica el volumen de condensados producidos, por lo que no se podía cotejar la bondad del proceso.

Para una segunda fase, se han incorporado nuevos equipos de medida y se han propuesto las variables definitivas que sí permiten verificar el procedimiento teórico.

Las variables controladas en esta segunda fase han sido:

- volumen de condensación,
- tiempo de control
- humedad y temperatura seca en el conducto de aspiración de la máquina
- humedad y temperatura seca en el conducto de impulsión de la máquina
- humedad y temperatura seca en el local a acondicionar (se ha tomado como local de referencia aquel en el que se encuentra el termostato que regula la climatizadora)
- humedad y temperatura seca en el exterior
- caudal de aire de impulsión,
- potencia eléctrica máxima consumida
- Energía eléctrica consumida durante el periodo de control

- número de compresores en funcionamiento durante el periodo de control

Como la regulación del equipo es mediante control de temperatura, para que la medida fuera lo más estable posible se ha tomado como intervalo de control las horas centrales del día, cuando más carga térmica hay que compensar. Por lo tanto, la climatizadora funciona con mayor exigencia. De esta forma, se asegura que la máquina no parará mientras es controlada.

## 4.2. RESULTADOS

---

Se ha aplicado la metodología indicada en el apartado correspondiente a los equipos autónomos compactos, particularizado al caso en que no se dispone de recuperador de energía.

A la vista de los resultados se puede observar que la producción media diaria de agua de condensación, para la máquina analizada, es de 13,72 l/h de agua.

Teniendo en cuenta la potencia frigorífica producida en cada momento, el valor medio diario de agua de condensación por cada kW de potencia es 0,48 l/h/kW.

Sin embargo, se ha observado una gran diferencia en la producción de condensado cuando el aire de entrada a la batería es exclusivamente aire re retorno, RCA, que cuando es exclusivamente aire húmedo exterior, ODA.

En la Figura 5.9 se ha representado por separado la producción en condiciones en las que el aire de entrada a la batería, condiciones MIA, proviene exclusivamente del aire de extracción de los locales, ETA, y la producción cuando el aire de entrada proviene exclusivamente del aire exterior, ODA.

Esto se ha conseguido maniobrando manualmente el sistema de enfriamiento gratuito, para dar paso al aire de una procedencia o de otra.

El aire de extracción, ya acondicionado, tiene un contenido en humedad menor. Su humedad es la que tiene el aire de impulsión, SUP, y que después se resta para obtener la condensación, más la ganancia de humedad debida a la ocupación de los locales y a la infiltración a través de puertas y ventanas. El condensado es precisamente ésta ganancia de humedad.

El aire húmedo exterior, todavía no acondicionado, tiene una humedad mayor.

En valor medio, la producción de condensados cuando el aire acondicionado es de recirculación es de 0,39 l/h/kW. Teniendo en cuenta la ocupación media de 18 personas en los locales controlados, da una producción de 0,021 l/h/kW/persona.

La producción cuando el aire acondicionado es totalmente exterior es de 0,7 l/h/kW. En este caso la ocupación no tiene influencia puesto que la humedad del aire exterior tiene una procedencia distinta.

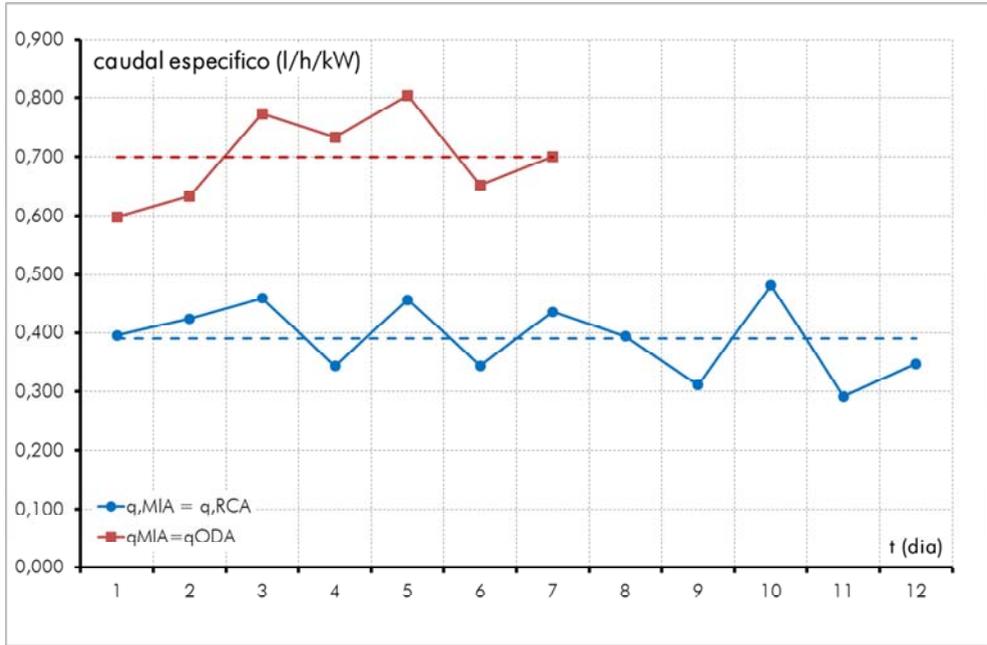


Figura 5.9. Producción de condensados por kW de potencia frigorífica

De cara a validar los cálculos teóricos, en la Figura 5.10 se han representado, para cada uno de los días registrados, los valores del caudal de condensación calculado y el realmente medido.

Se observa como existe una discrepancia entre ambos valores, si bien la tendencia en ambos es la misma. En valor medio, la producción real de condensado es un 76% de la producción calculada. Si bien, en los días en que mayor producción se ha registrado, día 18, la producción calculada y registrada es exactamente igual.

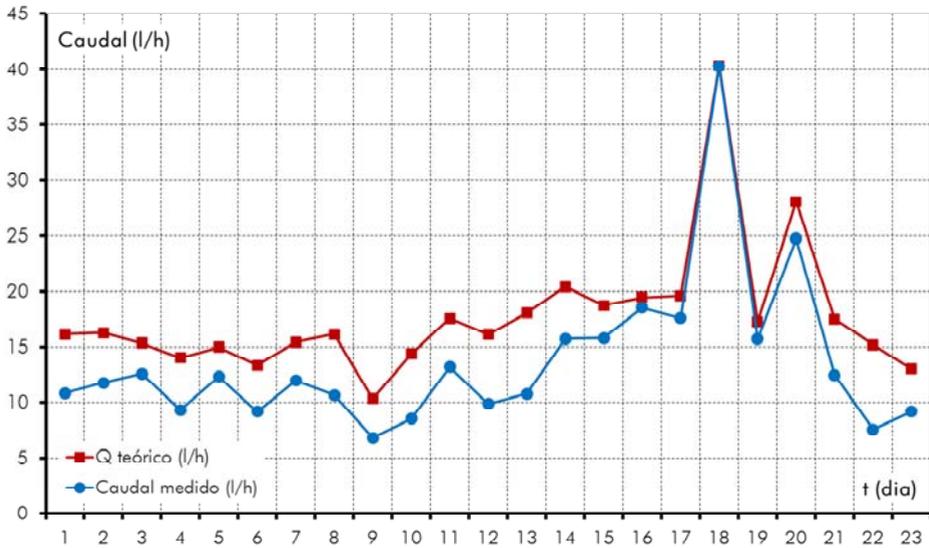


Figura 5.10. Caudales reales producidos en comparación con los teóricos esperados

En ese día, la exigencia de compensación de carga frigorífica ha hecho que se pongan en funcionamiento los dos compresores de la máquina, produciendo al 100% de su capacidad, y por tanto, no parando en ningún instante. En ese caso, medición y teoría coinciden plenamente.

La justificación de la discrepancia se hace a partir de este dato. Aunque se ha procurado seleccionar las horas centrales del día, y por tanto con mayor carga térmica a compensar, para realizar las mediciones, la máquina no ha funcionado todo el tiempo durante el cual se han desarrollado la medida. La regulación por temperatura de la climatizadora hace que al alcanzarse la temperatura de consigna, la máquina pare durante un tiempo. En el momento en que disminuye la temperatura real con respecto a la de consigna, la máquina vuelve a arrancar de nuevo.

Sin embargo, de forma teórica sí que se ha considerado que durante el tiempo en el que ha durado la medición sí que ha funcionado en todo momento.

En general, se considera que la relación entre el tiempo de funcionamiento del compresor con respecto a la duración de la medida ha sido del 76%.

Por otro lado, para analizar la fuente de condensado, se ha hecho un análisis de la cantidad de condensado que se produce con respecto a la humedad del aire de

extracción y con respecto al aire exterior. Los resultados se muestran en las figuras 5.12 y 5.13.

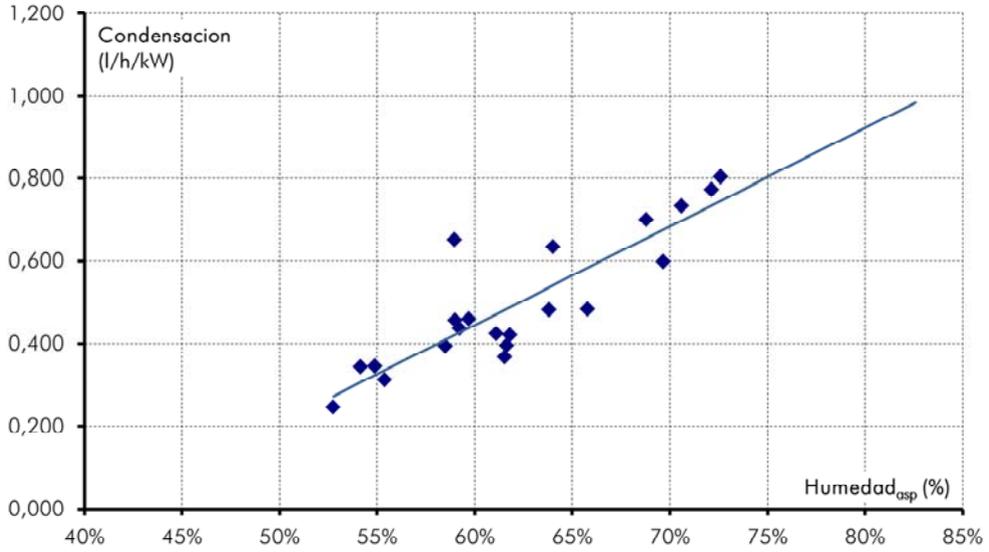


Figura 5.11. Producción de condensados en función de la humedad en la aspiración

A la vista de las Figura 5.11, se puede comprobar como existe una relación directa entre el caudal de condensación producido y la humedad en el punto de aspiración de la climatizadora,

Este caudal de condensación se puede ajustar a una función del tipo

$$q_{\text{agua}}(\text{l/h/kW}) = -0,9861 + 2,3862W_{\theta}(\%) \quad \text{Ec. 49}$$

Con respecto a la humedad exterior, en la Figura 5.12 se observa como existe una tendencia a aumentar el caudal de condensación conforme aumenta la humedad exterior, si bien la tendencia no es tan clara como en el caso anterior.

Se distingue claramente la situación en la que el aire de aspiración,  $q_{\text{MIA}}$ , es el procedente del exterior,  $q_{\text{ODA}}$ , y la situación en la que la procedencia es del caudal recirculado de extracción,  $q_{\text{RCA}}$ .

En esta segunda situación, a pesar que el aire procede del interior, sí que se observa una gran correlación entre condensado y humedad exterior. Esto se justifica por la gran cantidad de infiltraciones desde el exterior que se producen, sobretodo, a través de las puertas.

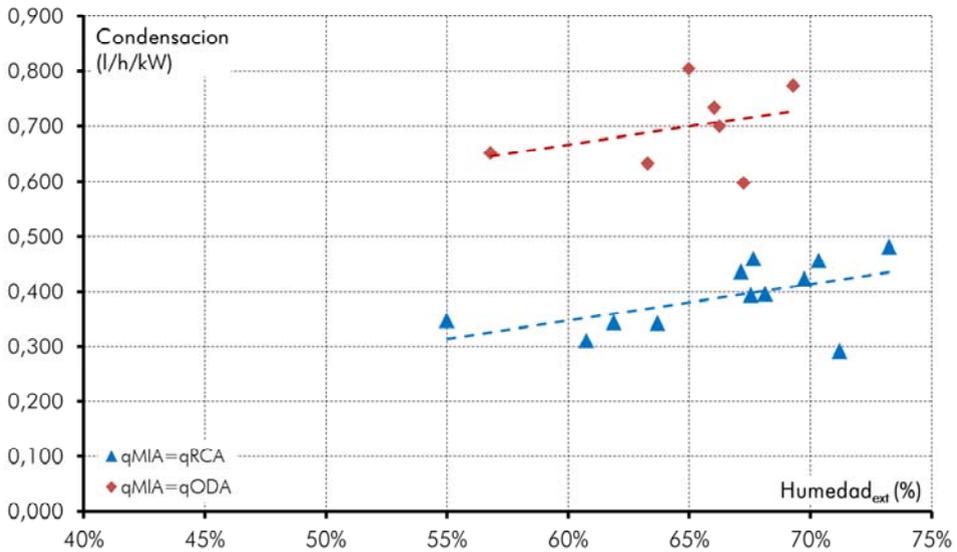


Figura 5.12. Producción de condensados en función de la humedad del aire exterior

Los datos obtenidos se extrapolan a otros tipos de edificación, manifestando las posibilidades de aprovechamiento que presenta esta solución como alternativa de suministro.

Para el análisis se han considerado dotaciones medias diarias en diferentes tipologías de edificación (Arizmendi, 2005). Teniendo en cuenta la ocupación (ESPAÑA, 2006a) de cada una de las tipologías y el porcentaje de consumo estimado de inodoros en cada una de ellas se han calculado la dotación por m<sup>2</sup> de superficie de edificación. Por otro lado, considerando el mínimo de las aportaciones por condensados obtenido en las mediciones, de 0,39 l/h/kW térmico y asumiendo el valor estándar de 100 W/m<sup>2</sup> de potencia térmica de refrigeración en sistemas de acondicionamiento de aire en la costa mediterránea española, se obtienen las producciones de condensados indicados en la Tabla 5.1.

Los porcentajes de ahorro indicados en la Tabla 5.1 muestran cómo existen algunas tipologías de edificación en los que el establecimiento de un sistema de aprovechamiento de condensados no resulta interesante, mientras que hay otras, en general aquellas tipologías con ahorros superiores al 5%, en los que su implantación sí que puede tener interés.

La razones que benefician la implantación son, por un lado un bajo consumo de agua en inodoros, y por otro una elevada superficie de acondicionamiento para la ocupación

que presentan (una baja relación de ocupación). De ahí que las mejores eficiencias del sistema sean en edificios públicos muy voluminosos: estaciones de tren, aeropuertos, museos, etc.

Tabla 5.1. Ahorros potenciales en la demanda de agua en inodoros aprovechando el agua de condensación

Uso	Dotación en inodoros	Producción condensados	Porcentaje Ahorro
	[l/m <sup>2</sup> /día]	[l/m <sup>2</sup> /día]	[%]
Vivienda	2,24	0,08	3,57
Hoteles	6,66	0,24	3,60
Oficinas	26,00	0,4	1,54
Docente	17,50	0,32	1,83
Hospitales	7,08	0,96	13,56
Comercial	5,47	0,48	8,78
Espectáculos en general	10,91	0,24	2,20
Gimnasios	2,40	0,24	10,00
Piscinas, vestuarios	1,67	0,24	14,37
Piscinas, zona de baño	4,69	0,24	5,12
Salones de hoteles	9,38	0,16	1,71
Terminales transporte *	3,22	0,72	22
Museos, bibliotecas, exposiciones	4,69	0,48	10,23

\* Dotación obtenida de la memoria de AENA, 2012.

## 5. INSTALACIÓN DE APROVECHAMIENTO DE CONDENSADO

---

Desde el punto de vista técnico la instalación de un sistema de aprovechamiento de agua de condensación requiere de una serie de equipos.

La máquina de climatización, tanto si se aprovecha como si no, requiere de un mecanismo de evacuación de los condensados porque, en mayor o menor medida, éstos se van a producir. Todas las máquinas de refrigeración los equipan.

El sistema de recogida de condensados consiste en una bandeja situada bajo la batería fría de la climatizadora, un sifón para evitar los malos olores y unas conducciones en lámina libre que llevan el condensado hasta la red evacuación de aguas residuales o pluviales más cercana a la climatizadora.

Para el aprovechamiento del agua de condensación, en lugar de canalizar el condensado hacia la red de evacuación se canaliza hasta un depósito de almacenamiento.

El depósito de almacenamiento puede ser el mismo que se utiliza para el sistema de aprovechamiento de pluviales, si el edificio cuenta con este sistema de hidroeficiencia, o debe ser independiente si no hay SAP.

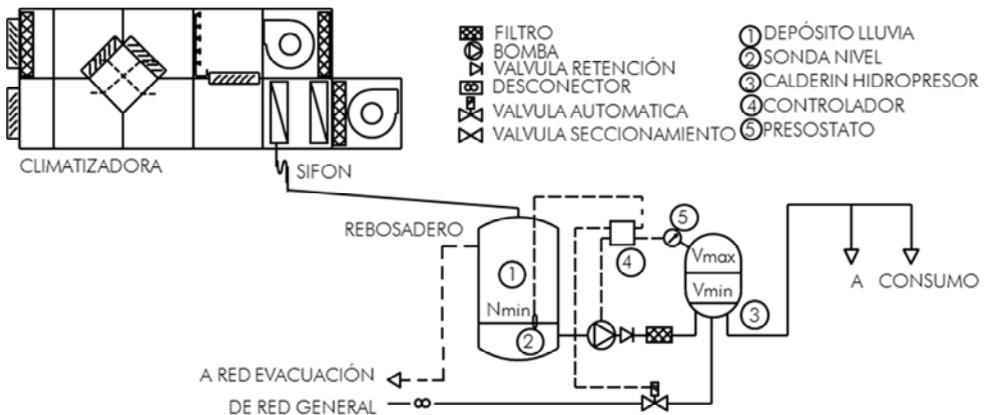


Figura 5.13. Esquema de la instalación del sistema de aprovechamiento de condensados

En caso de existir varias climatizadoras, el condensado se dirigirá a un único depósito de almacenamiento, para reducir costes de instalación.

En la Figura 5.13 se puede observar un esquema de la instalación, considerando que la canalización de condensados se produce por gravedad a través de una conducción en lámina libre.

El condensado se recoge en un depósito a presión atmosférica. Para su aprovechamiento en la instalación hay que presurizar el agua almacenada con un equipo de bombeo, que lo suministra a la instalación de consumo.

Para evitar un número excesivo de arranques y paradas de la bomba, se dispone un calderín hidroneumático que almacena agua a presión.

Como no hay aporte suficiente de agua de condensación para la instalación cuando la aportación es sólo desde el sistema de aprovechamiento de condensado, pues éste sólo recoge una fracción del consumo, se requiere de un sistema de apoyo convencional desde la red general de distribución de agua. Este sistema funciona cuando la sonda de nivel en el depósito de almacenamiento de condensados indica que no hay suficiente volumen.

Hay que tener en cuenta que el agua de condensación que se recoge es agua pura, sin sales minerales, y no apta para el consumo. El uso que se le da a esta agua es el mismo que se la da al agua de lluvia, es decir, sólo para su uso en inodoros, en lavadoras, lavavajillas, o para limpieza en general, pero nunca para su uso hidrosanitario.

El dimensionado de la canalización de recogida de condensados se realiza siguiendo cualquier método de dimensionado de conducciones de pequeña evacuación sin sólidos en suspensión, considerando un grado de llenado al 85% y una pendiente mínima del 2%.

Para el dimensionado del depósito, debido a que no se va a cubrir el 100% de la demanda de agua de consumo, no requiere de volúmenes de almacenamiento supradiarios. El volumen de almacenamiento será la cantidad diaria de condensado producida en el sistema de acondicionamiento de aire.

## 6. CONCLUSIONES

---

Los sistemas de acondicionamiento de aire generan, cuando enfrían el aire húmedo, la condensación de parte de la humedad que contiene. Este subproducto del proceso de climatización es, generalmente, desechado a través de la red de evacuación de aguas residuales y/o pluviales del edificio.

Sin embargo, la cantidad de agua de condensación se genera en volumen suficiente como para poder ser aprovechada para suministrar parcialmente a inodoros o para riego. Los resultados experimentales avalan los cálculos teóricos sobre dicha capacidad de producción.

Así, de un modo general, para un sistema de climatización que trabaje 100% con aire exterior, se produce 0,7 l/h por cada kW térmico de potencia de climatización. Cuando el sistema trabaja sólo con aire de recirculación se producen 0,4 l/h por cada kW de potencia térmica. La capacidad de producción depende del caudal de aire tratado.

Con valores intermedios de aire de recirculación se producen valores intermedios de agua de condensación en la misma proporción.

Con todo, hay edificios en los que los ahorros de agua que se obtienen de la red general de distribución son mayores que en otros. Estos edificios son los que disponen de un gran volumen de acondicionamiento de aire, están ubicados cerca de la costa, tienen una ocupación relativamente pequeña, y disponen de equipos de climatización centralizados.

Además, el sistema de aprovechamiento de condensados se complementa bastante bien con el sistema de aprovechamiento de aguas pluviales. Por un lado comparten equipos, lo que reduce el coste de inversión. Por otro lado, cuando las aportaciones del sistema de aprovechamiento de condensados son mayores, las del SAP son las más escasas, y viceversa, lo que permite aprovechar mejor los depósitos de almacenamiento.

La implantación de ambos sistemas simultáneamente mejora la eficiencia de cada uno de ellos y los hace más rentables.



## 6. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AHORRO DE AGUA

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En los capítulos precedentes se ha desarrollado una primera parte del objetivo de este trabajo. Se han analizado los sistemas de hidroeficiencia, observando sus bondades y limitaciones. En algunos casos se ha desarrollado una metodología para dimensionar o elegir el sistema más adecuado para su implantación en un determinado edificio.

Comienza, con este capítulo, una segunda parte destinada a la caracterización de los sistemas de hidroeficiencia.

Del proceso de análisis y dimensionado de los sistemas de hidroeficiencia va a salir una relación de aquellos que se adaptan, y por tanto pueden ser implantados, en un determinado edificio.

Una vez preseleccionados, queda por determinar cuál de ellos se comporta mejor que los demás.

Se hace necesario, por tanto, establecer una serie de criterios que, convenientemente valorados, permitan al técnico determinar de entre todos los preseleccionados cuál debe ser el seleccionado para ser implantado en primer lugar.

El objetivo de este capítulo es establecer los diferentes criterios que deben ser tenidos en cuenta para establecer la bondad de un sistema de hidroeficiencia en comparación con los demás.

Igualmente, y puesto que los sistemas no vienen caracterizados de por sí, se indica cómo valorar cada uno de los criterios.

De este modo el técnico puede determinar la preferencia de un sistema con respecto a los demás. Es el paso previo a la aplicación del procedimiento de selección de sistemas de hidroeficiencia en un determinado edificio, que se verá en el capítulo siguiente.

## 2. CRITERIOS CARACTERÍSTICOS DE LOS SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA

---

Para establecer los criterios con los que valorar la bondad de un determinado sistema de hidroeficiencia, hay que tener en cuenta el objetivo para el que ha sido diseñado el sistema, el usuario que lo tiene que implantar, y el entorno en el que habita.

Desde el punto de vista del comportamiento del equipo, su objetivo es ahorrar agua, y la energía que ello puede tener asociada.

Desde el punto de vista del usuario, el sistema debe disponer de elementos que satisfagan su implantación. Debe suponer una mejora con respecto a otros sistemas convencionales, o por lo menos no una pérdida de condiciones.

En este sentido, el sistema debe ser: menos costoso, en términos absolutos, que el sistema convencional al que sustituye; deber ser igualmente fiable; fácil de manejar, de instalar y de mantener; estéticamente semejante, etc.

Desde el punto de vista del entorno en el que habitan los usuarios el sistema debe: mejorar las condiciones de vida de éstos; ser inocuo al medio ambiente; reducir el consumo de recursos naturales, etc.

Teniendo en cuenta muchos de estos aspectos, se han agrupado algunos de ellos y se han definido los siguientes criterios para la selección de sistemas de hidroeficiencia:

- Ahorro de agua.
- Ahorro de energía.
- Impacto socio-ambiental.
- Diseño.
- Rentabilidad económica

El criterio de ahorro de agua valora solamente el volumen de agua que se deja de consumir de las redes generales de distribución de agua potable como consecuencia de la implantación del sistema.

El ahorro de energía, valora la cantidad de energía que se deja de consumir como consecuencia del ahorro en el consumo de agua. Esta energía puede ser de tipo térmico requerida para el calentamiento del agua de consumo, o puede ser energía eléctrica de bombeo de toda el agua que ahorra el edificio.

El criterio de impacto socio-ambiental valora la influencia que tiene, en el conjunto de la sociedad y en el entorno ambiental en el que se ubica el edificio en cuestión, la reducción de la demanda de recursos naturales.

El criterio de diseño tiene en cuenta todos los aspectos formales, estéticos, de funcionalidad y manejabilidad del sistema. Estos aspectos tienen más influencia en edificios en los que se cuida mucho la imagen que se quiere transmitir al usuario. Por ejemplo, hoteles, centros de ocio, etc.

El criterio de rentabilidad tiene en cuenta, tanto la reducción de costes asociados al ahorro de los recursos hídricos y energéticos que el usuario percibe, como al aumento del coste por la inversión realizada en equipos y el coste del mantenimiento y la

operación del sistema. Se valora la relación coste-beneficio que se produce como consecuencia de la instalación y la posterior operatividad del sistema de hidroeficiencia. Posiblemente, para el gestor del edificio sea uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta. Sin embargo, la cada vez mayor educación ambiental de la sociedad favorece que no siempre sea uno de los criterios de referencia. Por ello merece una calificación adicional.

Hay que separar la rentabilidad asociada exclusivamente a la instalación del sistema, de la rentabilidad de su operación y mantenimiento, por cuanto hay muchos dispositivos que no tiene costes de operación asociados. Sin embargo, todas las fuentes alternativas tienen importantes costes de operación que sí deben ser tenidos en cuenta.

### **3. CRITERIO DE AHORRO DE AGUA**

---

El objetivo final de cualquier medida de mejora de la gestión de la demanda de agua es conseguir una reducción del consumo de agua potable que se obtiene, a través de los sistemas generales de distribución, desde los puntos de captación de este recurso natural. Por ello este indicador puede considerarse como el principal factor de caracterización, aunque con determinadas limitaciones.

En adelante se va a considerar el indicador ahorro de agua (WS) al agua potable producida y transportada a través de las redes públicas de distribución que el usuario final deja de consumir como consecuencia del uso que se hace de un sistema o dispositivo de hidroeficiencia.

Aunque el ahorro de agua lleva consigo una reducción del importe que se paga por el uso del servicio de distribución de agua potable desde la red, no es lo que se valora en con este indicador.

Lo que se tiene en cuenta con el indicador ahorro de agua es sólo la reducción del volumen consumido del recurso natural. Posteriormente, de forma independiente, aunque relacionado, se considerará el beneficio económico asociado a la reducción del consumo.

Este indicador toma especial relevancia en situaciones de escasez del recurso. Cuando en época de sequías no se dispone de agua de forma natural y, por tanto, es necesario reducir su demanda sin importar el precio que ello cueste.

Para cuantificar el indicador es necesario conocer el ahorro de agua que se obtiene en cada uno de los aparatos. Y esto se debe considerar de forma individual para cada

sistema, y no para el conjunto de la instalación, puesto que los dispositivos de hidroeficiencia influyen sobre un aparato en concreto.

En por ello que se denomina  $WS_i$  al ahorro de agua correspondiente al aparato concreto 'i' dentro del edificio en cuestión.

El ahorro de agua de un determinado sistema de hidroeficiencia es la diferencia entre el volumen de agua potable consumido en un periodo de tiempo, generalmente un año, de la red pública con un dispositivo convencional ( $WD_i$ ) y el consumido en el mismo periodo tras ser implantado el sistema de ahorro ( $WSD_i$ ).

$$WS_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año})=WD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año})-WSD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año}) \quad \text{Ec. 6.1}$$

Para cuantificar su valor hay que obtener el volumen de agua de la red que consume un dispositivo convencional, sin sistema de ahorro, durante el periodo de control,  $WD_i$ .

A la hora de realizar el estudio de una determinada implantación, la información de la demanda puede ser estimada o puede ser información real obtenida mediante una auditoría del consumo de agua.

Así, el volumen de agua de un determinado aparato puede conocerse como:

- Un porcentaje de uso del aparato en el conjunto de los aparatos sanitarios
- Una estimación de los valores de caudal, duración y frecuencia del consumo del aparato
- Una medida real del consumo del aparato

Cuando lo que se conoce es el porcentaje de uso de un aparato con respecto al global del edificio, la información resulta ser de la peor calidad, pero fácil de obtener.

La información se obtiene de datos estadísticos de uso y son muy generalistas pues su variabilidad es grande. Sin embargo resulta de utilidad si se carece de otro tipo de información más precisa.

El consumo anual de un determinado aparato ( $WD_i$ ) se obtiene aplicando la relación:

$$WD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año})=\%uso_i\cdot DWD_T(\text{l}/\text{pers}\cdot\text{dia})\cdot 365/1000 \quad \text{Ec. 6.2}$$

Donde:  $\%uso_i$ , es el porcentaje de consumo del aparato i con respecto al total; y  $DWD_T$ , es la demanda diaria total de agua de todos los aparatos por persona y día. Se utiliza porque es un dato bastante estudiado y de fácil recopilación.

No obstante, no son muchos los estudios que aportan información sobre el porcentaje de uso de sanitarios en diferentes tipos de edificios. En el capítulo 2 de éste trabajo de investigación se han presentado algunos datos que pueden ser utilizados para esta caracterización.

Los porcentajes varían notablemente de unos estudios a otros. En ello influyen numerosos factores: hábitos de consumo, edad de las personas de las muestra, tipología y disponibilidad de electrodomésticos para el lavado de ropa/vajilla, tipología de vivienda, existencia de zonas ajardinadas o no, etc.

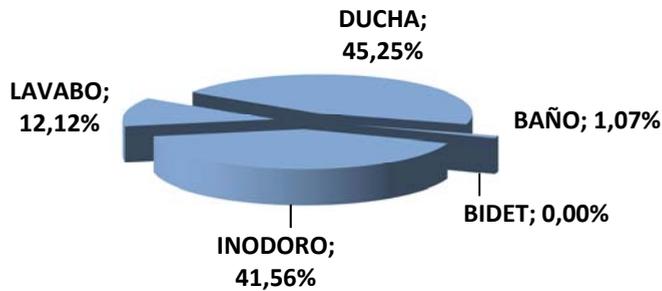


Figura 6.1. Ejemplo de distribución de demandas en habitaciones de hotel

En la Figura 6.1 se presenta el reparto de consumos entre los diferentes dispositivos de una habitación de hotel urbano, obtenida mediante mediciones directas.

Cuando se conoce por estimación la duración y la frecuencia diaria de uso de cada aparato, la información resulta igualmente de poca calidad, pero permite mayor precisión en los cálculos de la demanda.

Esta situación se aplica para estudios de hidroeficiencia sobre edificios de nueva construcción, en los que no es posible realizar mediciones.

La demanda se calcula como el producto del caudal entregado por del dispositivo convencional, que es sustituido por el sistema de ahorro, por el tiempo medio de cada uso por la frecuencia diaria de uso del dispositivo y por 365 días que tiene el año:

$$WD_i \left( \frac{\text{m}^3}{\text{pers} \cdot \text{año}} \right) = Q_i \left( \frac{\text{l}}{\text{min}} \right) \cdot \Delta t_i (\text{min}) \cdot f_{z,d,i} \left( \frac{\text{ciclos}}{\text{dia} \cdot \text{persona}} \right) \cdot 365 / 1000 =$$

$$WD_i \left( \frac{\text{m}^3}{\text{pers} \cdot \text{año}} \right) = v_i (l) \cdot f_{z,d,i} \left( \frac{\text{ciclos}}{\text{dia} \cdot \text{persona}} \right) \cdot 365 / 1000 \quad \text{Ec. 6.3}$$

Donde:  $Q_i$ , el caudal suministrado por el aparato  $i$ , utilizando dispositivos convencionales;  $\Delta_{ii}$ , es la duración media de cada uso del aparato  $i$ ;  $f_{zd,i}$  es la frecuencia diaria de uso del aparato  $i$  por persona; y  $\nabla_i$  es el volumen diario demandado desde el aparato  $i$ .

Tabla 6.1. Caudales mínimos exigidos por el CTE (ESPAÑA, 2006a)

TIPO DE APARATO	CAUDAL INSTANTÁNEO		CAUDAL INSTANTÁNEO	
	mínimo de agua fría		mínimo de ACS	
	[l/s]	[l/min]	[l/s]	[l/min]
Lavamanos	0,05	3	0,03	1,8
Lavabo	0,1	6	0,065	3,9
Ducha	0,2	12	0,1	6
Bañera de 1,40 m o más	0,3	18	0,2	12
Bañera de menos de 1,40 m	0,2	12	0,15	9
Bidé	0,1	6	0,065	3,9
Inodoro con cisterna	0,1	6	-	-
Inodoro con fluxor	1,25	75	-	-
Urinarios con grifo temporizado	0,15	9	-	-
Urinarios con cisterna (c/u)	0,04	2,4	-	-
Fregadero doméstico	0,2	12	0,1	6
Fregadero no doméstico	0,3	18	0,2	12
Lavavajillas doméstico	0,15	9	0,1	6
Lavavajillas industrial (20 servicios)	0,25	15	0,2	12
Lavadero	0,2	12	0,1	6
Lavadora doméstica	0,2	12	0,15	9
Lavadora industrial (8 kg)	0,6	36	0,4	24
Grifo aislado	0,15	9	0,1	6
Grifo garaje	0,2	12	-	-
Vertedero	0,2	12	-	-

El caudal entregado por cada uno de los dispositivos de consumo se estima de los caudales mínimos de diseño de instalaciones interiores a los que obliga el Código Técnico de la Edificación en su documento HS-4 (ESPAÑA, 2006a), y que se muestran en la Tabla 6.1.

La determinación del tiempo de uso y la frecuencia se realiza tomando alguna de las referencias presentadas en el capítulo 2 de este trabajo, o en otros de la bibliografía.

La mayor precisión y bondad de los datos se consigue realizando una auditoría del edificio en cuestión. Esta opción sólo es posible cuando se está analizando la implantación de sistemas de hidroeficiencia en edificios existentes. En este caso se dispone de datos reales y particularizados, de la duración y frecuencia de los consumos en cada aparato.

La demanda se calcula igual que en el caso, anterior, aplicando la ecuación 3. La diferencia radica en que, ahora, los valores de duración y frecuencia son valores reales del edificio objeto de estudio.

Una vez calculada la demanda anual que se produce con el dispositivo convencional, es necesario obtener el valor de la demanda con el dispositivo/sistema de ahorro de agua,  $WSD_i$ .

Como se ha hecho anteriormente, se distingue los casos en que la información esté en formato de porcentaje de demanda con respecto a la global, en formato de duración y frecuencia estimadas, o en formato de duración y frecuencia medidas.

Para la primera de las situaciones, la información disponible es el porcentaje de la demanda de cada aparato con respecto a la demanda global de todos los aparatos que equipa el edificio.

El nuevo porcentaje de demanda, considerando el dispositivo de ahorro, se va a aproximar al producto del ahorro específico que genera el dispositivo de hidroeficiencia que se instale.

$$WSD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año}) = (1 - SW_i(\%)) \cdot WD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año}) \quad \text{Ec. 6.4}$$

Donde:  $WD_i$  es la demanda diaria de agua del aparato  $i$  calculada previamente; y  $SW_i$  es el porcentaje de ahorro específico del dispositivo de hidroeficiencia instalado en el aparato  $i$ , expresado en %.

De este modo el ahorro de agua obtenido en el aparato  $i$ ,  $WS_i$ , es:

$$WS_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año}) = SW_i(\%) \cdot WD_i(\text{m}^3/\text{pers}\cdot\text{año}) \quad \text{Ec. 6.5}$$

En el caso que la información que se disponga sea la duración y frecuencia del consumo, independientemente de si éstos han sido obtenidos por estimación o por

medición, hay que tener en cuenta que los hábitos de consumo no tienen por qué cambiar con la instalación de los dispositivos de hidroeficiencia.

Lo que sí que varía con la incorporación de un dispositivo de hidroeficiencia es el caudal suministrado por el aparato  $i$ .

La forma de calcular la nueva demanda va a consistir en determinar el producto del nuevo caudal aportado por el dispositivo/sistema de ahorro por la duración y la frecuencia de uso, que serán los mismos que con los dispositivos convencionales.

$$WSD_i \left( m^3 / \text{pers} \cdot \text{año} \right) = Q_{Si} \left( \frac{l}{\text{min}} \right) \cdot \Delta t_i (\text{min}) \cdot f_{zd,i} \left( \frac{\text{ciclos}}{\text{día} \cdot \text{persona}} \right) \cdot 365 / 1000$$

$$WSD_i \left( m^3 / \text{pers} \cdot \text{año} \right) = V_{Si} (l) \cdot f_{zd,i} \left( \frac{\text{ciclos}}{\text{día} \cdot \text{persona}} \right) \cdot 365 / 1000 \quad \text{Ec. 6.6}$$

Donde:  $Q_{Si}$ , es el caudal que suministra el aparato  $i$  con el dispositivo de hidroeficiencia ya instalado; y  $V_{Si}$  es el volumen por uso suministrado por el aparato  $i$  en esas condiciones

De esta forma, el ahorro por dispositivo se calcula como:

$$WS_i \left( m^3 / \text{pers} \cdot \text{año} \right) = WD_i - WSD_i = (Q_i - Q_{Si}) \cdot \Delta t_i \cdot f_{zd,i} \cdot 365 / 1000 \quad \text{Ec. 6.7}$$

Donde  $Q_i$  y  $Q_{Si}$ , están expresados en l/min;  $\Delta t_i$  está expresado en min; y  $f_{zd,i}$  está expresado en ciclos/persona/día.

El ahorro de agua de un determinado aparato es una variable que puede adoptar valores muy pequeños o muy grandes. En su momento, para realizar el proceso de comparación y selección de sistemas de hidroeficiencia se van a ponderar cada uno de los criterios de selección que ahora se están caracterizando.

Un valor excesivamente alto, o bajo, del ahorro puede adulterar la ponderación, dando un excesivo peso al criterio de ahorro de agua, que en realidad no debe tener en comparación con el resto de criterios.

Es por ello que hay que acotar el rango de valoración del criterio. Esto se hace para cada uno de ellos.

Según sea el método de selección de sistemas, que se desarrollará en el siguiente capítulo, hay dos formas de acotar el rango.

La primera de ellas se establece definiendo un indicador de ahorro de agua, al igual que se definirán indicadores para el resto de criterios.

El segundo método formará parte del propio método de selección. En la selección multicriterio, aplicando el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process,

AHP), se va a realizar una normalización de los valores que cada una de las alternativas, en este caso cada uno de los sistemas de hidroeficiencia, toma con respecto a cada uno de los criterios de selección. Es un procedimiento que se comentará con detalle en el capítulo siguiente.

Se define el indicador de ahorro de agua como la relación entre el ahorro anual obtenido a la hora de implantar un determinado sistema de hidroeficiencia en todos los aparatos de un mismo tipo que lo equipan, y la demanda anual total de agua en el edificio antes de la implantación del sistema de ahorro.

El indicador de ahorro de agua se calcula como:

$$WSR_i = K_{WSR} \frac{WS_i \cdot \sum pax_i}{DWD_T \sum pax} 1000/365 \quad \text{Ec. 6.8}$$

Donde  $WSR_i$  es el ratio de ahorro del sistema de hidroeficiencia instalado en el aparato  $i$ ;  $K_{WSR}$  es la constante de ahorro de agua y vale 10 (se utiliza para que todos los indicadores definidos tengan el mismo peso);  $pax_i$  es el número total de personas que utilizan el aparato  $i$ ;  $pax$  es el número total de usuarios de la instalación de suministro de agua del edificio;  $WS_i$  es el ahorro de agua del aparato  $i$  como consecuencia de la instalación del dispositivo de hidroeficiencia, expresada en  $m^3$ /persona/año; y,  $DWD_T$  es la demanda diaria por persona de agua que consume el conjunto del edificio, expresado en l/persona/día.

De esta manera, la relación de ahorro sirve, además, como elemento de comparación entre sistemas de hidroeficiencia. Su valor va a estar comprendido entre cero y diez, y cuanto más alto sea, mejor es el sistema de hidroeficiencia en comparación con los demás, desde el punto de vista del ahorro.

Es importante la consideración sobre el número de personas, porque no todas las que ocupan un edificio utilizan los aparatos hidrosanitarios de la misma manera. A modo de ejemplo, en un centro comercial hay lavabos, inodoros y duchas. Los lavabos e inodoros son utilizados por todos los clientes del centro comercial, mientras que las duchas lo son sólo por los empleados.

La ratio de ahorro de agua toma un valor entre 0 y 10. Cuanto mayor es la ratio, mejor es sistema de hidroeficiencia desde el punto de vista del ahorro de agua, en comparación con otros sistemas.

Como ejemplo de valoración del indicador de ahorro de agua, se van a comparar dos sistemas de hidroeficiencia en un edificio de 20 viviendas, en el que pueden habitar 5 personas por vivienda, y en el que cada vivienda está dotada de dos baños completos,

cocina y lavadero. Se estudia la implantación de un dispositivo aireador de lavabo, de 5,5 l/min, con un ahorro específico del 54%, y de un dispositivo reductor del caudal de ducha, de 7 l/min, con un ahorro específico del 42%, tal y como se analizó en el capítulo 3 de este trabajo.

Considerando un patrón de consumos como el correspondiente a la tabla 2.8 del capítulo 2 de este trabajo, la demanda en lavabo en una vivienda es de 39 l/persona/día, y la demanda en ducha en una vivienda es de 43 l/persona/día, con una demanda total de 160 l/persona/día.

Para los edificios de viviendas el usuario que utiliza las duchas lo hace también de los lavabos, luego el número de personas de uso de cada aparato será el mismo que el número de personas totales.

El ahorro que se consigue implantando el aireador/perlizador en los lavabos es:

$$WS_1 = 39 \cdot 0,54 \cdot 365 / 1000 = 7,68 \text{ m}^3/\text{persona/año}$$

De este modo el indicador de ahorro, para el aireador/perlizador es:

$$WSR_1 = 10 \frac{7,68 \cdot 20 \cdot 5}{160 \cdot 20 \cdot 5} \frac{1000}{365} = 1,3$$

El ahorro que se consigue implantando el reductor de caudal de ducha es:

$$WS_2 = 43 \cdot 0,42 \cdot 365 / 1000 = 6,59 \text{ m}^3/\text{persona/año}$$

Y el indicador de ahorro para el reductor de ducha es:

$$WSR_1 = 10 \frac{6,59 \cdot 20 \cdot 5}{160 \cdot 20 \cdot 5} \frac{1000}{365} = 1,1$$

A la vista, solamente, del indicador de ahorro de agua, y tomando como referencias las indicadas, en un edificio de viviendas es mejor instalar un aireador/perlizador de 5,5 l/min que un reductor de ducha de 7 l/min. Esto no significa que en términos globales el aireador sea mejor que el reductor de ducha, puesto que hay que observar el resto de indicadores.

#### 4. CRITERIO DE AHORRO DE ENERGÍA

---

La energía es otro de los recursos naturales que, por escaso y difícil de obtener, es necesario preservar. Aunque no está directamente relacionado con el consumo de agua, sí es cierto que para poder utilizar agua en los edificios, o para utilizar agua

hidrosanitaria en condiciones de confort térmico en algunas aplicaciones en el edificio, es necesario consumir energía.

Un edificio consume energía como consecuencia del consumo de agua. Ésta es la necesaria para:

- calentar el agua de uso hidrosanitario
- sobrepresurizar el agua proveniente de la red general cuando no tiene presión suficiente para alcanzar los pisos más elevados (bombeo a través de grupos de presión)
- presurizar con bombeo el agua obtenida de fuentes alternativas (agua de lluvia, aguas reutilizadas) para que se pueda distribuir por la instalación

Lo que aquí se va a analizar es el ahorro, o consumo, de energía asociado a la reducción de la demanda de agua en el edificio. Y se habla en términos de consumo, porque los sistemas de hidroeficiencia en los que exista una fuente alternativa de agua, consumirán energía para disponer el agua presurizada en los aparatos hidrosanitarios.

Al igual que sucede con el ahorro de agua, el ahorro de energía asociado supone una reducción del coste que tiene que abonar el usuario por el consumo de dicha energía. Sin embargo, a la hora de valorar este apartado sólo se tienen en cuenta los aspectos relacionados con la reducción en el uso del recurso natural energía.

Este criterio tiene mayor importancia cuanto menor es la disponibilidad de la energía en el edificio, y en edificios en los que se busque el autoconsumo energético.

En el criterio no se valoran, por tanto, los aspectos económicos de los que se puede beneficiar el consumidor final de energía como consecuencia de la reducción de su consumo, que se tendrá en cuenta en los indicadores de tipo económico.

Tampoco se valora la reducción de la energía utilizada para poner a disposición del usuario, en la acometida de la edificación, un menor volumen de agua. El beneficiario directo de esa reducción es la sociedad en su conjunto, y será tenido en cuenta al valorar el indicador de impacto socio-ambiental de las medidas de ahorro.

De esta manera, los aspectos de ahorro de energía que se tienen en cuenta en el criterio de ahorro de energía son los relacionados con el calentamiento del agua caliente sanitaria utilizada en el edificio, así como la energía eléctrica consumida por los equipos de bombeo o rebombeo dentro del edificio.

Para el cálculo de ambos ahorros, se van a desarrollar sendos análisis de manera separada e independiente.

#### 4.1. AHORRO DE ENERGÍA POR CALENTAMIENTO DE AGUA

---

En un edificio se utiliza agua caliente sanitaria en los lavabos, duchas, bidés, fregaderos, e incluso en lavavajillas y lavadoras de máxima eficiencia energética.

La energía utilizada para calentar un determinado volumen de agua es:

$$E_T = \rho \forall C_p \Delta T \quad \text{Ec. 6.9}$$

donde:  $E_T$  es la energía expresada en kWh;  $\rho$  es la densidad del agua, igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>;  $\forall$  es el volumen de agua que se calienta, expresado en m<sup>3</sup>;  $C_p$  es el calor específico del agua, igual a 0,00116 kWh/(K·Kg); y  $\Delta T$  es el incremento de temperatura como consecuencia del calentamiento desde la temperatura de agua de red hasta la temperatura caliente necesaria.

Si se considera el volumen de agua de calentamiento el agua ahorrada como consecuencia de la implantación de un sistema de hidroeficiencia en el aparato  $i$ , entonces la energía ahorrada por calentamiento de dicho volumen es:

$$ES_{T,i} = \rho WS_{ACS,i} C_p \Delta T \quad \text{Ec. 6.10}$$

donde:  $ES_{T,i}$  es la energía de calentamiento ahorrada, expresada en kWh/persona/año; y  $WS_{ACS,i}$  es el agua caliente ahorrada en el aparato  $i$ , expresada m<sup>3</sup>/persona/año.

El agua caliente ahorrada en un sistema de hidroeficiencia no es toda el agua ahorrada, sino sólo la fracción de la consumida en el aparato que es calentada.

En este sentido hay que tener en cuenta que la temperatura de preparación del agua caliente sanitaria (A.C.S.) depende del tipo de edificación. En efecto, la legislación sobre prevención de la legionelosis en sistemas de preparación y distribución de agua caliente (ESPAÑA, 2003a) y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE, (ESPAÑA, 2007a) obligan, en los edificios públicos, a que la temperatura de almacenamiento en los sistema de A.C.S. sea de 60°C y 55°C en el retorno. Sin embargo, las viviendas privadas quedan exentas de esta obligación.

Esto provoca que en viviendas, al poder distribuir el agua caliente sanitaria a la temperatura de utilización, cuando el usuario demanda agua caliente sanitaria, todo el consumo del aparato es A.C.S.

Por el contrario, en edificios públicos, el agua se distribuye entre 55 y 60°C, excesivo para el usuario, que mezcla agua fría y agua caliente en el punto de consumo. En este caso, el volumen de agua caliente consumido es mucho menor que en el caso anterior, pero el incremento de temperatura es más elevado.

Haciendo el balance energético de la mezcla de dos corrientes de agua a diferentes temperaturas:

$$Q_{ACS} \cdot T_{ACS} + Q_{AF} \cdot T_{AF} = Q_U \cdot T_U \quad \text{Ec. 6.11}$$

Donde:  $Q_U$ , es el caudal demandado en el aparato  $i$ ;  $T_U$  es la temperatura de utilización deseada por el usuario,  $Q_{ACS}$ , es el caudal de agua caliente sanitaria aportado a la mezcla,  $T_{ACS}$ , es la temperatura del agua caliente sanitaria;  $Q_{AF}$  es el caudal de agua fría aportado a la mezcla;  $T_{AF}$  es la temperatura del agua fría.

En el caso de la vivienda, la temperatura del ACS,  $T_{ACS}$ , es ya la temperatura de utilización,  $T_U$ . Por tanto el caudal de agua fría es nulo y se cumple que  $Q_{ACS} = Q_U$ .

La energía consumida es:

$$E_1 = \rho Q_U \Delta t C_p (T_U - T_{AF}) \quad \text{Ec. 6.12}$$

En el caso de un edificio público, la  $T_{ACS} > T_U$ . Operando con la ecuación 10, se obtiene:

$$Q_{ACS} = Q_U \frac{(T_U - T_{AF})}{(T_{ACS} - T_{AF})} \quad \text{Ec. 6.13}$$

La energía consumida es

$$E_2 = \rho Q_{ACS} \Delta t C_p (T_{ACS} - T_{AF}) \quad \text{Ec. 6.14}$$

Que considerando la ecuación 13 es:

$$E_2 = \rho Q_U \Delta t C_p (T_U - T_{AF}) \quad \text{Ec. 6.15}$$

Por tanto, la cantidad de energía consumida, o ahorrada, en el aparato hidrosanitario es la misma si se consume a menor temperatura en las viviendas, o a mayor temperatura en los edificios públicos, siempre y cuando sea calentada desde la misma temperatura  $T_{AF}$ , que es la temperatura a la que llega el agua de la red distribución de agua potable, y no depende de la instalación ni de los sistemas de hidroeficiencia que se implanten.

A la vista de análisis se concluye que el ahorro de energía asociado a un ahorro de agua se expresa como:

$$ES_{T,i} (\text{kWh/persona/año}) = \rho WS_i (\text{m}^3/\text{persona/año}) C_p (T_U - T_{AF}) \quad \text{Ec. 6.16}$$

Donde:  $ES_{T,i}$  es el ahorro de energía en el aparato  $i$  asociada al calentamiento del agua, expresado en kWh/persona/año;  $WS_i$  es el ahorro de agua total del aparato  $i$ ,

expresada en m<sup>3</sup>/persona/año, calculado en el apartado anterior; T<sub>u</sub> es la temperatura a la que se va a consumir el agua, en °C; T<sub>AF</sub> es la temperatura fría del agua de la red general de distribución o en el punto de acometida, en °C; ρ es la densidad del agua, igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>; C<sub>p</sub> es el calor específico del agua, igual a 0,00116 kWh/(K·Kg)

Como norma general, la temperatura de utilización, T<sub>u</sub>, aunque depende del usuario, se puede estimar en torno a 40°C.

La temperatura del agua fría es la temperatura de la red. Al variar ésta a lo largo del año (AENOR, 2005) y a falta de más información se puede considerar una media, de entre las de las capitales de provincia españolas para los diferentes meses del año, de 15°C para zonas litorales y de 12°C para zonas continentales.

Así, el salto térmico estimado debido al calentamiento del agua en edificios se puede suponer en los valores indicados en la Tabla 6.2

Tabla 6.2. Estimación de saltos térmicos en edificios  
sin aprovechamiento solar

ZONA GEOGRÁFICA	(T <sub>u</sub> -T <sub>AF</sub> ) (°C)
Litoral	25
Continental	28

El ahorro de energía estimado se puede expresar (dando valores a la densidad y al calor específico del agua) como:

- Para una zona geográfica litoral

$$ES_{T,i} \text{ (kWh/persona}\cdot\text{año)} = 29 \cdot WS_i \text{ (m}^3\text{/persona}\cdot\text{año)}$$

- Para una zona geográfica continental

$$ES_{T,i} \text{ (kWh/persona}\cdot\text{año)} = 32,5 \cdot WS_i \text{ (m}^3\text{/persona}\cdot\text{año)}$$

En edificios de nueva planta, el código técnico de la edificación (ESPAÑA, 2006a) obliga a que exista una contribución solar térmica para la producción de ACS. Esto significa que el agua que llega al aparato viene previamente calentada en una instalación solar térmica a una temperatura que se denominará temperatura de precalentamiento solar, T<sub>PRCS</sub>.

La propia legislación establece unos mínimos de contribución solar según la zona geográfica y el consumo anual de energía del edificio. Incluso, puede resultar rentable en el edificio superar los mínimos legislativos.

Lo que, sin duda, es bueno desde el punto de vista del ahorro energético general del edificio, no es tan bueno para valorar la bondad de un determinado sistema de hidroeficiencia.

El menor consumo de combustible para producir una misma cantidad agua caliente sanitaria hace que sea menos interesante y rentable la incorporación de un sistema de hidroeficiencia que reduzca el volumen de a.c.s. demandado.

Resulta paradójico, pero en edificios donde no hay contribución solar para el a.c.s. es más rentable instalar dispositivos de hidroeficiencia que donde los hay.

El ahorro de energía por calentamiento de agua que se obtiene cuando hay contribución solar es:

$$ES_{T,i}(\text{kWh/persona/año}) = \rho WS_i(\text{m}^3/\text{persona/año})C_p (T_u - T_{AF})\left(1 - \frac{\%s}{100}\right) \quad \text{Ec. 6.17}$$

Donde:  $ES_{T,i}$  es el ahorro de energía en el aparato  $i$  asociada al calentamiento del agua;  $WS_i$  es el ahorro de agua total del aparato  $i$ ;  $T_u$  es la temperatura a la que se va a consumir el agua;  $T_{AF}$  es la temperatura fría del agua de la red general de distribución o en el punto de acometida;  $\%s$  es la fracción media anual de contribución solar de la instalación de producción de a.c.s., en tanto por cien; y  $\rho$ ,  $C_p$  son la densidad del agua y su calor específico respectivamente.

Para relativizar el valor del ahorro a un rango acotado, se considera el indicador de ahorro de energía por calentamiento. Este se define como la relación que existe entre el ahorro de energía obtenido al implantar el sistema de hidroeficiencia en el aparato “ $i$ ”, y la energía total consumida en calentamiento de agua sanitaria en todo el edificio antes de implantar ningún sistema de hidroeficiencia:

$$ESR_{T,i} = K_T \frac{ES_{T,i} \sum p_{axi}}{E_T \sum p_{ax}} \quad \text{Ec. 6.18}$$

Donde:

- $ESR_{T,i}$  es el indicador de ahorro de energía por calentamiento, para el aparato  $i$ ;
- $K_T$  es un coeficiente que vale 5 y que pondera este indicador frente al indicador de ahorro de energía por bombeo

- $ES_{T,i}$  es el ahorro de energía por calentamiento de agua en el aparato  $i$ , expresado en kWh/persona/año
- $pax_i$  es el número de personas que utilizan el aparato  $i$
- $E_T$  es la energía total consumida en el edificio por calentamiento de agua caliente sanitaria, expresada en kWh/persona/año
- $pax$  es el número de ocupantes del edificio

El indicador de ahorro de agua por calentamiento toma un valor entre 0 y 5. Cuanto mayor sea el indicador más energía por calentamiento de agua ahorra el edificio.

## 4.2. AHORRO DE ENERGÍA POR BOMBEO

---

El ahorro de energía por bombeo es la energía eléctrica que se deja de consumir en el edificio, y sólo en el edificio, debida a la reducción en el volumen de agua que tienen que impulsar los grupos de sobreelevación del propio edificio.

El consumo energético por bombeo en una instalación de suministro de agua se produce para aumentar la presión del fluido hasta un punto en el que permita que alcance los puntos de consumo elevados y se venzan las pérdidas de carga (energía) en las conducciones y grifos.

Esta necesidad de presión se genera por diferentes motivos y afecta de diferentes maneras.

Un primer caso, caso A, es cuando hay que presurizar toda la demanda del edificio. Esta situación se produce porque:

- el edificio está aislado o no conectado a ninguna red general y tiene su propio sistema de suministro,
- la red general es deficitaria y no hay garantía en la continuidad de servicio desde la red general, por lo que se alimenta un aljibe a la entrada del edificio

En este caso, toda la demanda de agua que se produce en el edificio requiere de un consumo energético por bombeo. Tanta reducción en la demanda de agua que se consigue tanta reducción del consumo de energía por bombeo.

Un segundo caso, caso B, lo representan los edificios que si que tienen una cierta presión de alimentación en la acometida, pero no es suficiente para abastecer a todas las plantas del edificio. El edificio tiene una altura tal que la red de distribución no puede garantizar la presión en las plantas más elevadas y requieren de un grupo de bombeo para dichas plantas.

En este caso, sólo la reducción en la demanda de los aparatos situados en las plantas alimentadas a través del grupo de bombeo aporta reducción en la energía consumida por bombeo.

Un tercer caso, caso C, se produce para los edificios que utilizan fuentes alternativas de agua como sistema de hidroeficiencia. El agua recolectada se almacena en un depósito atmosférico que no almacena presión. Ahora toda la demanda de agua desde la red general que se sustituye por agua de la fuente alternativa va a generar consumo de energía. Sin embargo, esto no representa un ahorro de energía sino un consumo de energía, que debe ser penalizado.

Por último, el caso en que el edificio está conectado a la red general de distribución, y ésta tiene presión suficiente para alimentar todas las plantas del edificio, no va a producir ahorro de energía por bombeo en el edificio.

El cálculo del consumo energético por bombeo en todos los casos es similar. Lo que se diferencia es la demanda a la que le afecta.

En general, la energía utilizada en bombear un determinado volumen de agua es:

$$E_B(\text{kWh}) = \frac{\gamma(\text{kN/m}^3) \cdot V(\text{m}^3) \cdot H(\text{m})}{3600 \cdot \eta} \quad \text{Ec. 6.19}$$

Donde: 'γ' es el peso específico del agua 9,81 kN/m<sup>3</sup>; 'V' es el volumen de agua a bombear; 'H' es la altura de bombeo; y 'η' es el rendimiento de la/s bomba/s.

El ahorro de energía de bombeo obtenido con el ahorro de agua se puede expresar como:

$$ES_{B,i}(\text{kWh/persona/año}) = \frac{9,81 \cdot WS(\text{m}^3/\text{persona/año}) \cdot H_B(\text{m})}{3600 \cdot \eta} \quad \text{Ec. 6.20}$$

Donde:

- $ES_{B,i}$  es la energía por bombeo que se ahorra en el aparato i
- WS es el ahorro de agua. Su valor dependerá en cuál de las situaciones anteriores se encuentre el edificio.
- $H_B$  es la altura de bombeo necesaria

En el caso A, cualquier ahorro en cualquier aparato hidrosanitario va a tener su repercusión en el ahorro de energía correspondiente. Así la ecuación 20 se particulariza como:

$$ES_{B,i}(\text{kWh/persona/año}) = \frac{9,81 \cdot WS_i(\text{m}^3/\text{persona/año}) \cdot H_B(\text{m})}{3600 \cdot \eta} \quad \text{Ec. 6.21}$$

Donde:  $WS_i$  es el ahorro de cualquier aparato  $i$  en el edificio

Para el caso B, sólo los aparatos hidrosanitarios ubicados en la plantas alimentadas desde el grupo de bombeo producen ahorro de energía de bombeo. En tal caso, la ecuación 20 se particulariza como:

$$ES_{B,i}(\text{kWh/persona/año}) = \frac{9,81 \cdot WS_{+,i}(\text{m}^3/\text{persona/año}) \cdot H_B(\text{m})}{3600 \cdot \eta} \quad \text{Ec. 6.22}$$

Donde:  $WS_{+,i}$  representa el consumo de los aparatos  $i$  que están por encima de la primera planta alimentada desde el grupo de bombeo.

A modo de ejemplo, un edificio de siete alturas se alimenta con grupo de bombeo desde su cuarta planta, inclusive. Se implantan aireadores en todos los lavabos del edificio, aparato  $i$ . Sólo se considera el ahorro por energía de bombeo de aquellos lavabos que se encuentran en la planta cuarta, quinta, sexta y séptima. El ahorro  $WS_{+,i}$  es una fracción del ahorro  $WS_i$  correspondiente al aparato  $i$ .

Para el caso C, todo el volumen aportado desde las fuentes alternativas de agua supone un consumo de energía. Para este caso, el ahorro de energía debe ser negativo y así debe ser tenido en cuenta en la expresión.

$$ES_{B,i}(\text{kWh/persona/año}) = (-1) \frac{9,81 \cdot WS_i(\text{m}^3/\text{persona/año}) \cdot H_B(\text{m})}{3600 \cdot \eta} \quad \text{Ec. 6.23}$$

Donde:  $WS_i$  es el volumen de agua aportado desde las fuentes alternativas de suministro de agua.

Se define el indicador de ahorro de energía por bombeo como la relación entre el ahorro de energía obtenido al implantar un sistema de hidroeficiencia en el aparato “ $i$ ”, con respecto al consumo total de energía de bombeo en el edificio antes del implantar ningún sistema de hidroeficiencia:

$$ESR_{B,i} = K_T \frac{ES_{B,i} \sum p_{ax_i}}{E_B \sum p_{ax}} \quad \text{Ec. 6.24}$$

Donde:

- $ESR_{B,i}$  es el indicador de ahorro de energía por bombeo del aparato “ $i$ ”;
- $K_T$  es un coeficiente que vale 5 y que pondera este indicador frente al indicador de ahorro de energía por calentamiento
- $ES_{B,i}$  es el ahorro de energía por bombeo de agua en el aparato  $i$ , expresado en kWh/persona/año
- $p_{ax_i}$  es el número de personas que utilizan el aparato  $i$

- $E_b$  es la energía total consumida en el edificio por bombeo, expresada en kWh/persona/año
- pax es el número de ocupantes del edificio

El indicador de ahorro de agua por bombeo toma un valor entre -5 y 5. Cuanto mayor sea el indicador más energía por bombeo de agua ahorra el edificio. Los valores negativos se producen cuando el sistema de hidroeficiencia es una fuente alternativa de agua.

Considerando el efecto conjunto del ahorro de energía por calentamiento y por bombeo, se define el indicador de ahorro de energía global como la suma de los indicadores de ahorro de agua por calentamiento y por bombeo:

$$ESR_i = ESR_{T,i} + ESR_{B,i} \quad \text{Ec. 6.25}$$

Donde:  $ESR_i$  es el indicador de ahorro de energía. Toma un valor entre -5 y 10.

Cuanto mayor el valor del indicador de ahorro de energía mejor es el sistema de hidroeficiencia desde el punto de vista del consumo energético.

Puede darse el caso que el indicador de ahorro de energía sea negativo, porque el sistema de hidroeficiencia consume más energía de la que ahorra. Ese sistema podrá tener otras bondades, pero desde el punto de vista energético es bastante malo.

## **5. CRITERIO DE IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL**

---

La implantación de cualquier medida de gestión sostenible de la demanda de agua en un edificio no solo tiene ventajas para el usuario y/o gestor del inmueble. Existen una serie de ventajas y condicionantes que la medida tiene sobre el entorno social y medio ambiental en el que se ubica el edificio.

Mejoras que tienen que ver con los aspectos ambientales asociados al recurso: mejores condiciones de habitabilidad presente y futura para las personas, mayor disponibilidad de recursos hídricos para el desarrollo de la flora, respeto a las condiciones ambientales para el desarrollo de la fauna, mantenimiento de las condiciones ecológicas de un entorno, mayor disponibilidad de recursos para la actividad agrícola, etc..

Pero mejoras también desde el punto de vista social: menores dotaciones presupuestarias para infraestructuras de captación y distribución de recursos hídricos, desarrollo de nuevas tecnologías, apertura de nuevas fuentes de empleo, etc.

Son aspectos que seguramente no tendría en cuenta el promotor en la implantación de un sistema de hidroeficiencia puesto que no le afectan directamente.

Se hace necesario un indicador que tenga en cuenta estos aspectos. El indicador de impacto socio-ambiental recoge el conjunto de afecciones que producen la implantación de una determinada medida de hidroeficiencia, producida por el ser humano, sobre el medio ambiente físico inmediato y la sociedad en la que se desarrolla.

Para valorar el impacto socio-ambiental que provoca la implantación de un sistema o dispositivo de hidroeficiencia de agua en un edificio, se establece la premisa de que todos los impactos generados son reversibles o temporales, y de alcance local, debido a la reducida escala con la que se trabaja. Así pues, el sistema de valoración únicamente tiene en cuenta únicamente la bondad, o no, de los impactos sin importar su alcance en el tiempo o en el espacio, ya que han sido considerados como fijos.

De este modo, se establece una serie de posibles impactos específicos positivos, que son los que se relacionan en la Tabla 6.3. Para cada sistema de hidroeficiencia de agua 'i' que se analiza, se valora de forma individual cada impacto en una escala de 0 a 10 según la influencia que tiene sobre la sociedad y el ambiente en el que se emplaza el edificio.

Un valor de 0 indica que el sistema de hidroeficiencia tiene poca influencia, o que la influencia es muy negativa, sobre el entorno socio-ambiental en el que se implanta. Un valor de 10 significa que el sistema tiene una influencia muy positiva en su entorno socio-ambiental.

Esta valoración se denomina índice de impacto "i" del sistema de hidroeficiencia implantado sobre el aparato "i",  $IM_{i,i}$ .

El criterio de impacto socio-ambiental se valora sumando las valoraciones de cada uno de los índices de impacto socio ambiental.

$$IMA_i = \sum IM_{i,i} \quad \text{Ec. 6.26}$$

Donde:  $IMA_i$  es el impacto socio-ambiental del Sistema de hidroeficiencia aplicado al aparato I; y  $IM_{i,i}$  es la valoración del índice de impacto "i" para el sistema de hidroeficiencia del aparato i.

Tabla 6.3. Índices de impacto socio ambiental para un sistema de hidroeficiencia

INDICE DE IMPACTO	Valoración del $IM_{i,j}$
Reducción del consumo de recursos naturales	
Generación nuevos recursos naturales	
Reducción del consumo energético de la captación y distribución de agua potable de abastecimiento	
Reducción del consumo energético de la distribución y tratamiento de agua residual	
Reducción de nuevas infraestructuras de distribución de agua potable	
Reducción de nuevas infraestructuras de saneamiento y depuración	
Reducción de las emisiones de CO <sub>2</sub> y de gases de efecto invernadero a la atmósfera.	
Reutilización de recursos naturales	
Fomento de la adopción de hábitos y actitudes sostenibles en los usuarios	
Mejora del confort de los usuarios	
Favorecimiento del desarrollo tecnológico y la innovación	
Favorecimiento de la creación de empleo	
Fabricación del producto con elementos no contaminantes	
$\sum IM_{i,j}$	

El indicador de impacto socio-ambiental se define como la suma de cada uno de los índices de impacto socio-ambiental ponderados por el coeficiente de impacto socio ambiental.

$$IMAR_{i,j} = K_{ISA} \sum IM_{i,j} \quad \text{Ec. 6.27}$$

Donde:  $K_{ISA}$ , coeficiente de impacto socio-ambiental, toma por valor la inversa del número de los índices de impacto valorados, aunque éstos tomen un valor nulo.

$$K_{ISA} = \frac{1}{n^{\circ} IM_{i,j}} \quad \text{Ec. 6.28}$$

Únicamente no se tendrán en cuenta en la valorarán los índices de impacto que no sean de aplicación para un determinado sistema de hidroeficiencia.

El indicador de impacto socio-ambiental toma un valor entre 0 y 10. Cuanto mayor es el valor del indicador, mejor es la relación del sistema de hidroeficiencia con su entorno socio-ambiental.

## 6. CRITERIO DE DISEÑO

---

Un sistema de hidroeficiencia debe verificar el objetivo de ahorro para el que está concebido, pero también debe cumplir con ciertos estándares de funcionalidad, manejabilidad, usabilidad e incluso estética que se le deben exigir.

Estos aspectos que no tienen que ver directamente con el comportamiento desde el punto de vista del ahorro, pero que son importantes en la interacción con el usuario se engloban en lo que se considera el diseño del sistema de hidroeficiencia.

Si bien no debería ser un condicionante en la selección de un equipo, si que puede haber edificios en los que la componente de diseño sea muy importante. En aquellos casos en los que el propio edificio mantiene un condicionante de diseño importante, el sistema de hidroeficiencia debe ser acorde a esas características.

Por definición, el ICSID (International Council of Societies of Industrial Design) considera el diseño como “una actividad creativa cuyo propósito es establecer las cualidades multifacéticas de los objetos, procesos, servicios y sus sistemas, en su ciclo de vida completo. Por lo tanto, el diseño es el factor principal de la humanización innovadora de las tecnologías y el factor crítico del intercambio cultural y económico” (ICSID, 2015).

En la definición está implícito el resultado del producto, pero también su proceso productivo, así como el residuo que genera al final de su vida útil. Todas estas cuestiones quedan recogidas en una serie de aspectos a tener en cuenta a la hora de valorar el diseño de un determinado sistema de hidroeficiencia, a saber:

- Formato adecuado. El dispositivo o sistema de hidroeficiencia tiene unas dimensiones o peso adecuados para su uso e instalación. Se ajusta en medidas al espacio en donde va a ser instalado. No reduce la habitabilidad o el uso del espacio en el que se instala. No altera la instalación de suministro de agua ni requiere que ésta tenga un diseño fuera de lo convencional, o requiere de la incorporación de elementos o instalaciones adicionales (ventilación, electricidad, etc.,)

- Esencialidad y uso de los materiales apropiados. Se tiene en cuenta si el producto es esencial para su función, o si se le han añadido ornamentos que no aportan nada, o partes que no son indispensables para su funcionamiento.

El material o materiales de los que se compone el producto no suponen ningún riesgo para la instalación de suministro de agua, ni para el usuario en general. No alteran la composición del agua. Soportan adecuadamente la corrosión de un ambiente húmedo como en el que van a trabajar.

- Versatilidad. El sistema se adapta a diferentes tipologías de instalación o aparatos hidrosanitarios, o por el contrario es un dispositivo que sólo sirve para un aparato en concreto.
- Usabilidad. El sistema de hidroeficiencia es usable, es decir, es intuitivo en su manejo para que cualquier usuario no familiarizado con el sistema lo pueda utilizar.
- Durabilidad. El sistema de hidroeficiencia tiene una elevada vida útil, con un mantenimiento adecuado.
- Facilidad de instalación. El sistema de hidroeficiencia no requiere para su instalación de herramientas específicas o personal cualificado.
- Operatividad. El sistemas no requiere de un mantenimiento específico por parte de especialistas
- Carácter diferenciador e innovador. El sistema tiene unas características que difieren de las de otros productos similares. Es original y presenta novedades en cuanto a la función, el uso, la composición, la forma u otros aspectos, que otros dispositivos equivalentes no tienen.
- Corrección estética. El sistema de hidroeficiencia debe dar estímulos adecuados al observador en cuanto al orden, la belleza, el confort, y la armonía del mismo.
- Ergonomía. El sistema de hidroeficiencia está fabricado para el uso humano, adaptado a las características de los diferentes usuarios que van a utilizarlo sin generar patologías en éstos y facilitando el manejo, el control, la eficiencia y la seguridad en el uso.
- Distinción ecológica. El sistema de hidroeficiencia dispone de alguno de los distintivos de calidad ambiental (España, 1998), o de sostenibilidad, o dispone de la etiqueta ecológica (ESPAÑA, 2013) que otorgan algunos organismos o administraciones.

- Homologación. El sistema de hidroeficiencia cumple con todos requisitos legales de homologación o certificado CE para poder funcionar en la instalación, en los casos en los así se requiere.

Para obtener la valoración de un determinado sistema de hidroeficiencia con respecto al diseño, se valoran cada uno de los criterios de diseño con arreglo a un índice de diseño,  $DIS_{i,j}$ . El índice de diseño toma un valor entre 0 y 10, correspondiendo el cero a la menor valoración y diez a la valoración más alta.

Tabla 6.4. Índices de diseño para un sistema de hidroeficiencia

CRITERIOS DE DISEÑO	$DIS_{i,j}$
Formato adecuado	
Esencialidad y uso de los materiales apropiados	
Versatilidad	
Usabilidad	
Durabilidad	
Facilidad de instalación	
Operatividad	
Carácter diferenciador e innovador	
Corrección estética	
Ergonomía	
Distinción ecológica	
Homologación	
$\Sigma DIS_{i,j}$	

El diseño de un sistema de hidroeficiencia toma por valor la suma de los índices de diseño

$$DIS_i = \Sigma DIS_{i,j} \quad \text{Ec. 6.29}$$

Donde:  $DIS_i$  es el valor de diseño del sistema de hidroeficiencia implantado en el aparato  $i$ ; y  $DIS_{i,j}$  es el valor del índice de diseño para el criterio “ $j$ ” valorado para el sistema de hidroeficiencia del aparato  $i$ .

El indicador del diseño del sistema de hidroeficiencia ‘ $i$ ’ es el producto de la suma de cada uno de los índices de diseño, multiplicado por un coeficiente de valoración del diseño,:

$$DISR_i = K_{DIS} \sum DIS_{i,i} \quad \text{Ec. 6.30}$$

Donde:  $DISR_i$  es el indicador de diseño de sistema de hidroeficiencia que se implanta en el aparato  $i$ ;  $DIS_{i,i}$  es el índice de diseño “ $i$ ” aplicado al sistema de hidroeficiencia “ $i$ ”; y  $K_{DIS}$  es un coeficiente de corrección para que el indicador tome un valor entre 0 y 10, que se define como la inversa del número de índices de diseño valorados.

$$K_{DIS} = \frac{1}{n^{\circ} DIS_{i,i}} \quad \text{Ec. 6.31}$$

Si se valoran todos los aspectos contemplados en la Tabla 6.4, el coeficiente de valoración del diseño tomará un valor de  $K_{DIS} = 1/12 = 0,083$ . Si por el contrario sólo se valoran 10 de los aspectos (porque alguno podría no ser de aplicación al sistema en la implantación que se estudia) el coeficiente de valoración del diseño tomaría un valor  $K_{DIS} = 1/10 = 0,1$ .

Cuanto mayor es el indicador del diseño, mejor es el sistema de hidroeficiencia desde el punto de vista de su diseño

## 7. CRITERIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

---

Aunque el objetivo principal a la hora de la implantación de un sistema que mejore la demanda en el consumo de agua de un edificio no es el aspecto económico, no cabe duda que éste es uno de los que van a tener en cuenta los gestores de la instalación.

En todo este trabajo subyace una apuesta por la sostenibilidad debida al consumo de agua en el ámbito urbano. Sin embargo la sostenibilidad no es sólo mejorar las condiciones medio ambientales del entorno. Como se puede observar en la Figura 6.2, no se puede entender el concepto de sostenibilidad sin tener en cuenta los aspectos económicos.

El uso adecuado de los recursos, también implica a los recursos económicos. Cualquier actuación de eficiencia debe ser económicamente viable.

La viabilidad económica sirve además como una forma de estímulo para que los usuarios se impliquen y apliquen las tecnologías de ahorro de agua en sus viviendas. En este sentido es muy reconocida, por pionera, la actuación del Ayuntamiento de Zazagoza dando a conocer y subvencionando el coste de instalación de dispositivos de ahorro de agua en los domicilios (Viñuales, 2000), a la que siguieron después otras actuaciones en la misma línea en ciudades como Huesca, o Vitoria (BAKEAZ y ECODES, 2008), o en Comunidades Autónomas como Cantabria.

Cuando la viabilidad económica no se logra por sí misma con el ahorro económico que se obtiene al implantar el sistema de hidroeficiencia, las administraciones públicas deben ayudar para conseguir el objetivo económico. La falta de viabilidad suele venir por el elevado coste de los equipos. En tal caso, la administración subvenciona parte de la inversión en equipos (Generalitat Valenciana, 2011).

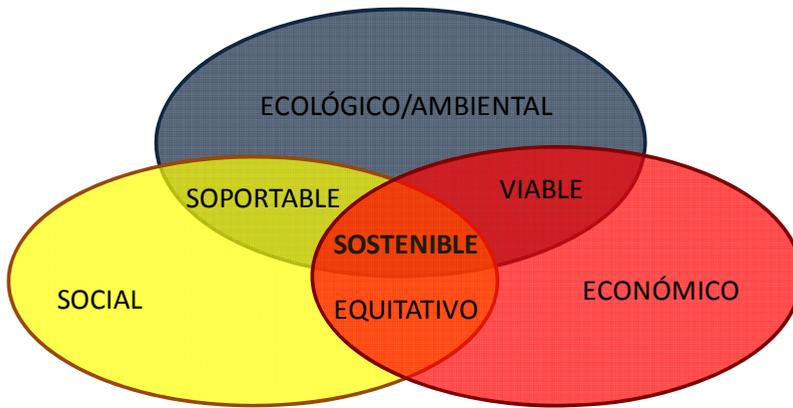


Figura 6.2. Ejes de la sostenibilidad

La viabilidad económica supone que los ingresos que se obtienen como consecuencia de una actuación, superan a sus costes. La diferencia entre ingresos y costes es lo que se puede considerar como beneficio, sin entrar en detalles fiscales sobre las consideraciones de beneficio bruto o beneficio neto.

En este trabajo se va a considerar, debido a que en muchos de los casos se va a trabajar en el ámbito doméstico y particular, donde los costes no están sometidos a deducción fiscal, que el beneficio no tiene en cuenta dichas deducciones.

Por tanto, para el análisis económico de la implantación de un determinado sistema de hidroeficiencia hay que analizar y poner en valor los costes y los ingresos relacionados con él.

De un lado están los ingresos. Los sistemas de hidroeficiencia no producen ingreso de forma directa. Éstos se obtienen por la reducción de las cantidades que deja de abonar el gestor del edificio por el agua y la energía que no se consumen de las redes generales de distribución. Estos ingresos se van a producir de forma continuada en el tiempo, en tanto que el sistema esté funcionando.

De otro lado, los costes son por: inversión en equipos, y operación y mantenimiento del sistema de hidroeficiencia. El tratamiento de cada uno de ellos es distinto por cuanto los primeros se producen de manera puntual y única en el instante de instalación del sistema de hidroeficiencia, y los segundos se producen a lo largo de todo el periodo de vida útil del sistema.

Se va a realizar un estudio tanto de los costes como de los ingresos que se producen como consecuencia de la implantación del sistema de hidroeficiencia.

### **7.1. ANÁLISIS DE INGRESOS**

---

A modo general se considera como ingreso cualquier cantidad entrante de efectivo, que se puede producir de forma ordinaria, ingresos ordinarios, o de forma eventual, ingresos atípicos.

El ingreso ordinario es la cantidad económica que se percibe como contraprestación por la actividad productiva del sistema que se valora. La realidad es que como consecuencia de la implantación del sistema de hidroeficiencia no se produce una entrada de efectivo como tal, por lo que en términos económicos no se puede hablar de un verdadero ingreso.

Los sistemas del tipo “fuentes alternativas”, generan agua para el consumo propio del edificio sin que tercie una tarifa. Es el propio operador de la instalación el que recibe de forma directa el producto de su actividad. El sistema así operado no produce ingresos directos.

Algunos sistemas de aprovechamiento de agua pluviales y reutilización de aguas usadas pueden generar agua en volumen suficiente para abastecer más de un edificio. Este tipo de sistemas son los que se conocen como sistemas de distrito. Se instalan fuera de las parcelas privadas de los edificios y reciben las aguas pluviales o residuales de más de uno de ellos. La legislación española (ESPAÑA, 2007b) permite que el agua generada en los sistemas de distrito sea comercializada para su venta a un tercero. No obstante, los sistemas de distribución por distrito son más propios de proyectos de urbanización que de instalaciones de edificios en particular. No se van a considerar en este trabajo, aunque no se descarta su aplicación, o su desarrollo futuro.

Los dispositivos producen la reducción del consumo desde una fuente de suministro convencional, generalmente una red general de distribución. No se genera ningún producto como consecuencia de la actividad del sistema por lo que tampoco se generan ingresos de forma directa.

Sin embargo, en ambos casos se produce una reducción del agua que es consumida desde una fuente convencional y por la que sí que se paga una cantidad. En ambos casos se recibe un ingreso indirecto por la reducción de la cantidad que se pagaría por el agua no consumida.

Desde el punto de vista del flujo de capitales, no supone un aumento de los flujos de entrada, sino una reducción de los flujos de salida. A todos los efectos, y para el análisis de alternativas que se va a realizar, se van a considerar como ingresos esta reducción de flujos de caja salientes.

La valoración de estos ingresos no depende del operador de la instalación. La cantidad no consumida por el sistema de ahorro se valora al precio de la que se consumiría desde la fuente convencional en todos los conceptos que se imputan a la demanda de agua, la correspondiente a la suministrada:

- Cuota por el consumo del agua bruta o de captación
- Cuota por el tratamiento, transporte y distribución del agua tratada a través de la red de agua potable

Pero también, al agua evacuada:

- Cuota por el transporte del agua consumida y contaminada a través de la red de saneamiento
- Cuota por la depuración del agua contaminada
- Cuota por el vertido del agua depurada a un cauce receptor
- Impuestos directos al consumo de agua

En algunos municipios, la cuota de recogida de residuos sólidos urbanos se establece a partir del consumo de agua. En ese caso, también hay que considerarla como un concepto más a tener en cuenta.

Existen otros conceptos asociados al servicio de agua potable como es la cuota por la propia disposición del servicio, por el uso de los aparatos de medición, etc., Estos términos son de importe fijo y no se ven afectados por el consumo por lo que no incluyen en el cálculo del ingreso puesto que hay que abonarlos tanto si se ahorra agua como si no.

Todos los conceptos comentados se engloban en una tarifa por el servicio completo de disposición y consumo agua potable. La valoración de los ingresos por el ahorro conseguido se realiza aplicando la tarifa global, que incluye todos estos conceptos, al volumen de agua ahorrado como consecuencia del funcionamiento del sistema, o sistemas, de ahorro.

De manera general, cuando la tarifa es única se toma el importe unitario por unidad de volumen y se multiplica por el monto del volumen ahorrado.

En algunos casos la tarifa que se aplica al servicio de agua potable no es constante sino que su importe depende del volumen demandado en el periodo de facturación, lo que viene en denominarse una tarifa progresiva.

Es muy posible que, si no se aplican las medidas de ahorro, el escalón de consumo que se alcance sea superior al real que se le aplica al usuario. Para el cálculo de los ingresos se debe considerar la tarifa que resultaría si no se aplicaran las medidas de ahorro que se valoran. Es decir, al volumen de agua consumido de la fuente convencional se sumaría el volumen ahorrado para obtener el volumen teórico demandado por los usuarios de la instalación.

Con el volumen teórico demandado se comprueba el escalón de consumo en el que se encuentra la demanda total del usuario. Se toma el importe de la tarifa de dicho escalón y se realiza el cálculo del ingreso multiplicando dicho importe por el volumen ahorrado.

Los ingresos así obtenidos son recurrentes cada uno de los años. No obstante, la tarifa se actualiza de un año a otro no necesariamente siguiendo la tasa de inflación. Para el análisis de rentabilidad, la cantidad así obtenida se va a considerar como un flujo de entrada de efectivo con un gradiente creciente cada uno de los años.

Los ingresos atípicos son ingresos que se obtienen por una acción no ligada directamente al uso y operación del sistema de hidroeficiencia, aunque relacionado con él. En general, y para el caso que se está tratando, son:

- las subvenciones públicas,
- el ingreso virtual por inversión en equipos convencionales equivalentes al aplicar el cálculo de costes diferenciales, y
- el ingreso por valor de desecho de equipos.

Las subvenciones públicas son medidas económicas que promueven las diferentes administraciones para el fomento de la implantación de los sistemas de hidroeficiencia. En algunos casos, son las que hacen viables la implantación de los sistemas más caros.

La forma de llevar a cabo la subvención depende de la administración y de las competencias que tenga asignada en la gestión de los presupuestos públicos.

Pueden ser una ayuda directa a fondo perdido para la compra e instalación de equipos y sistemas. Existen varios ejemplos de ello. Uno de los primeros, y por ello que más repercusión tuvo, fueron las ayudas que el Ayuntamiento de Zaragoza concedió, con motivo de la implantación de la Agenda21, para la sustitución de griferías

convencionales por griferías de bajo consumo (Viñuales, 2000). La medida suponía que los habitantes de la ciudad podían adquirir dichos equipos a coste cero. Con ello se consiguió reducir el consumo a 100 litros/habitante/día. Este valor de consumo no sólo se logró por la incorporación de las griferías de bajo consumo, pero su valor representa un referente. En un país desarrollado, con un elevado nivel de vida, el consumo mínimo de agua potable en el ámbito doméstico puede estar entre los 80 a 100 litros/habitante/día, valor que se puede alcanzar con la adopción de medidas de eficiencia del consumo de agua.

En el ámbito de la Comunitat Valenciana, el “Perfil de Calidad en la Edificación” publicado por la Consejería de Medio Ambiente, agua, urbanismo y vivienda (IVE, 2014) establece para los edificios que obtengan el certificado de calidad una serie de ayudas directas, tanto para el promotor como para el propietario de la vivienda. Para obtener dicho certificado de calidad es obligatorio implementar una serie de medidas de ahorro, tanto energético como de agua, que incluyen la instalación de varios sistemas de hidroeficiencia.

Las subvenciones también pueden ser una rebaja en los impuestos que paga el promotor de la instalación por poner en marcha la instalación. Esta medida es la menos frecuente por cuanto que la administración que concede los permisos de construcción, la que otorga los permisos de vertido, y la que gestiona los tributos no es la misma por lo que debe existir un convenio entre administraciones que permita la adopción de la medida.

El ingreso virtual por inversión en equipos convencionales equivalentes, es consecuencia del tratamiento que se hace de los costes diferenciales frente a los costes totales en los edificios de nueva planta. Se verá con mayor detalle cuando se analicen los costes asociados a la implantación de sistemas de hidroeficiencia.

A modo general, los costes diferenciales tienen en cuenta, sólo para las instalaciones en edificios de nueva planta, que a efectos del coste de un sistema de hidroeficiencia sólo debe considerarse el sobrecoste que supone con respecto al equipo convencional que debe dar servicio al aparato sobre el que se instala.

El último ingreso atípico es el debido a la amortización extraordinaria de activos que se obtienen por la venta, al valor de mercado, de un determinado equipo al final de un determinado periodo de funcionamiento. Este periodo puede coincidir o no con el de vida útil del equipo. A este ingreso se le conoce como valor de desecho del equipo (Sullivan et al., 2004).

La venta de un activo en funcionamiento, que generará ingreso, va asociada a la inversión en otro equipo nuevo que supone un coste de reemplazo. El periodo de

reemplazo al que se debe producir la venta y adquisición de activos puede ser especificado siguiendo criterios contables, comerciales, económicos ó técnicos (Sapag, 2007).

El criterio económico considera que existe un momento óptimo para la renovación del equipo. Este instante se da cuando los beneficios que genera el equipo existente sean menores que los que se van a obtener con un nuevo equipo técnicamente más avanzados y/o funcionalmente más eficiente. Como los sistemas que se abordan en este documento no generan ingreso directamente, el reemplazo se producirá cuando los costes de operación y mantenimiento superen los costes de inversión actualizados de un nuevo equipo. Con este criterio, el periodo de reposición es inferior a la vida útil del equipo pues, aunque obsoleto, el equipo todavía tiene capacidad productiva.

El criterio técnico establece el periodo de renovación del equipo como un valor en años que se relaciona con el uso del equipo, horas de trabajo, tasa de fallos, unidades producidas. Con este criterio la vida útil coincide con el periodo de reposición.

Considerando cualquier de los criterios expuestos, al alcanzarse el periodo de reposición del equipo éste tiene todavía un valor residual que debe ser considerado.

Para un periodo de análisis de alternativas con un determinado sistema y equipo, que no tiene por qué coincidir con el periodo de reposición ni con la vida útil del mismo, se pueden dar una serie de condiciones que generan ingreso. Si se decide reponer el equipo por uno nuevo, el equipo que se desecha tiene todavía cierta capacidad productiva, tanto si se repone con un criterio económico como con uno técnico. Se pueden dar dos alternativas. La primera es que el equipo se venda en el mercado secundario a un precio que tiene en cuenta la depreciación del equipo como consecuencia del desgaste generado durante su funcionamiento. La otra alternativa implica que el equipo, debido a una elevada depreciación, no se pueda colocar en el mercado secundario. Incluso en este caso se puede obtener un ingreso, aunque menor, como material de desecho (chatarra).

Si al final del periodo de análisis se decide mantener el equipo y no ser renovado, el equipo sigue generando ingresos pero estos quedarán fuera del análisis de rentabilidad al extenderse más allá del periodo de estudio. La forma de tenerlos en cuenta, para que no se perturben los resultados del análisis, es reducir los ingresos recurrentes futuros a una única cantidad futura al final del periodo de análisis (este procedimiento se verá más adelante cuando se estudie el análisis de alternativas). El valor de desecho del equipo se sustituye por un valor futuro de ingresos recurrentes.

### 7.1.1. INGRESOS ORDINARIOS

---

Se consideran como ingresos ordinarios el ingreso económico anual, IEA, que se obtiene como consecuencia del ahorro que supone la implantación del sistema de ahorro de agua. Hay que distinguir el ingreso debido al ahorro de agua del ingreso debido al ahorro de energía.

Se considera el ingreso económico anual por ahorro de agua de un sistema 'i',  $IEA_{W,i}$ , a la cantidad de agua ahorrada desde la red general de distribución por la tarifa unitaria que se paga a la entidad que gestiona el suministro de agua desde la red general de distribución:

$$IEA_{W,i} = WS_i \cdot T_w \quad \text{Ec. 6.32}$$

Donde:  $IEA_{W,i}$  es el ingreso económico anual por ahorro de agua, expresado en €/persona/año;  $WS_i$  es el ahorro de agua del sistema de ahorro de agua 'i', expresado en m<sup>3</sup>/persona/año; y ' $T_w$ ' es la tarifa del agua, expresada en €/m<sup>3</sup>.

Para establecer la tarifa hay que tener en cuenta las consideraciones que se han realizado anteriormente, y tomar la correspondiente a la demanda sin implantar el sistema de hidroeficiencia.

Puede suceder que los términos correspondientes al agua potable suministrada y al agua residual ya consumida los facture entidades distintas. En ese caso, hay que sumar ambos términos puesto que una reducción en la suministrada supone una reducción de la evacuada.

Los términos fijos se pagan independientemente del ahorro o no que se consiga, por lo que no se consideran en el análisis económico.

En el caso que la tarifa del agua sea progresiva con el consumo, el valor de tarifa a adoptar será aquel del tramo al que se llegaría en caso de no implantarse el sistema de ahorro, y no la tarifa que se pagaría después del ahorro.

En las Tabla 6.5 y 6.6, se aportan algunos datos publicados referidos a valores medios de tarifa según la comunidad autónoma o la provincia donde se encuentre el emplazamiento. Son valores orientativos para el estudio de la posible implantación si no se dispone de información más localizada.

Tabla 6.5. Tarifas del agua por Comunidades Autónomas €/m<sup>3</sup> (INE, 2014)

	TOTAL	SUMINISTRO	SANEAMIENTO
Andalucía	1,62	0,97	0,65
Aragón	1,29	0,66	0,63
Asturias,	1,29	0,67	0,62
Balears, Illes	2,38	1,32	1,06
Canarias	1,97	1,58	0,39
Cantabria	1,36	0,83	0,53
Castilla y León	1,02	0,5	0,52
Castilla-La Mancha	1,31	0,85	0,46
Cataluña	2,29	1,14	1,15
Comunitat Valenciana	1,98	1,22	0,76
Extremadura	1,45	0,97	0,48
Galicia	1,11	0,72	0,39
Madrid,	1,9	1,22	0,68
Murcia,	2,5	1,73	0,77
Navarra,	1,38	0,7	0,68
País Vasco	1,36	0,73	0,63
Rioja, La	1,02	0,58	0,44
Ceuta y Melilla	1,88	1,4	0,48
<b>Media Nacional</b>	<b>1,73</b>	<b>1,03</b>	<b>0,7</b>

Tabla 6.6. Tarifa del ciclo integral del agua por provincias (AEAS, 2013)

PROVINCIA	TARIFA MEDIA (€/m <sup>3</sup> )	PROVINCIA	TARIFA MEDIA (€/m <sup>3</sup> )
Álava	1,19	Lleida	1,38
Albacete	1,34	Lugo	1,14
Alicante	1,94	Madrid	1,4
Almería	1,59	Málaga	1,3
Asturias	1,53	Melilla	0,8
Avila	0,83	Murcia	2,31
Badajoz	1,52	Navarra	1,15
Baleares (Illes)	2,1	Ourense	0,91
Barcelona	2,24	Palencia	0,72
Burgos	0,89	Palmas (Las)	1,82
Cáceres	1,88	Pontevedra	1,17
Cádiz	1,47	Rioja (La)	1,33
Cantabria	1,49	Salamanca	0,9
Castellón	1,04	Santa Cruz de Tenerife	1,7
Ciudad Real	1,93	Segovia	0,88
Córdoba	1,27	Sevilla	1,93
Coruña (A)	1,67	Soria	1,05
Cuenca	1,15	Tarragona	1,81
Girona	1,42	Teruel	1,28
Granada	1,58	Toledo	1,32
Guadalajara	0,79	Valencia	1,63
Guipúzcoa	1,28	Valladolid	1,06
Huelva	1,8	Vizcaya	1,22
Huesca	1,2	Zamora	1,04
Jaén	1,32	Zaragoza	1,17
León	0,98		

El ingreso económico anual por ahorro de energía,  $IEA_e$ , es la suma de la cantidad económica resultante del ahorro de energía empleada en el calentamiento del agua

caliente sanitaria no consumida y de la energía empleada en el bombeo del agua ahorrada.

El ingreso económico por ahorro de energía de calentamiento es el producto del ahorro de energía empleada en el calentamiento del agua, por la tarifa de la fuente energética empleada para calentarla, y se puede expresar como:

$$IEA_{EC,i} = ES_{T,i} \cdot T_{EC} \quad \text{Ec. 6.33}$$

Donde,  $IEA_{EC,i}$  es el ingreso económico por ahorro de energía de calentamiento, expresado en €/persona/año;  $ES_{T,i}$  es el ahorro de energía por calentamiento del agua caliente sanitaria que se consigue al implantar el sistema de hidroeficiencia en el aparato 'i', expresado en kWh/persona/año; y  $T_{EC}$  es la tarifa de la fuente energética, expresada en €/kWh.

Las fuentes energéticas empleadas en calentar de agua pueden ser muy diversas. Se pueden emplear calderas o calentadores instantáneos que consumen GLP (butano o propano), gas natural, gasóleo de calefacción, o incluso se pueden emplear acumuladores eléctricos (los conocidos termos eléctricos). Por ello la tarifa de la fuente puede ser también muy variada y con referencias distintas, por cuanto que en unos casos se factura por metro cúbico consumido, o por litro, o por kilo de combustible, y en el caso de la electricidad por kilovatio hora consumido.

En el caso de que la fuente de calentamiento sea electricidad o gas natural, la tarifa está referida al kWh teórico consumido. Para otras fuentes de energía no es habitual tener la tarifa expresada en kWh, por lo que será necesario convertirla. Para ello hay que aplicar la expresión:

$$T_{EC}(\text{€/kWh}) = T_{EC}(\text{€/kg}) \frac{861,2 \cdot \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{\text{PCS} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}\right)} \quad \text{Ec. 6.34}$$

Donde:  $T_{EC}$  es el precio de referencia del combustible, en las unidades que corresponda;  $\rho$  es la densidad del combustible; y PCS es el poder calorífico superior del mismo.

El ingreso económico por ahorro de energía por bombeo es el producto del ahorro de energía logrado con la reducción del consumo de agua por la tarifa eléctrica, y se puede expresar como:

$$IEA_{EB,i} = AH_{EB,i} \cdot T_{ELEC} \quad \text{Ec. 6.35}$$

Donde:  $IEA_{EB}$  es el ingreso económico por ahorro de energía por bombeo, expresado en €/persona/año;  $AH_{EB,i}$  es el ahorro de energía por bombeo que se consigue al implantar el sistema de hidroeficiencia en el aparato 'i', expresado en kWh/persona/año; y el término " $T_{ELEC}$ " representa la tarifa eléctrica, expresada en €/kWh.

Considerando todos los ingresos económicos anuales analizados, el ingreso económico ordinario anual total es la suma de cada uno de ellos:

$$IEA_{i,j} = IEA_{W,i} + IEA_{EC,i} + IEA_{EB,i} \quad \text{Ec. 6.36}$$

Donde:  $IEA_{i,j}$ , ingreso económico ordinario anual total está expresado en €/persona/año.

### **7.1.2. INGRESO ECONÓMICO ATÍPICO**

---

Los ingresos atípicos son cantidades concretas que se obtienen de forma no recurrente en un momento determinado de la vida útil del sistema.

Se corresponde con:

- el ingreso por subvenciones y ayudas
- el ingreso virtuales por inversión en equipos convencionales
- el ingreso por valor de deshecho

Los ingresos por subvenciones, denominados  $I_{SUB}$ , pueden ser de los tipos ya comentados: ayudas directas a fondo perdido, desgravaciones fiscales en los impuestos, o reducciones de la tarifa.

Las ayudas directas y las desgravaciones fiscales son cantidades que se obtienen al inicio de la vida útil del equipo, y por tanto no va a ser necesario actualizarlas, al tener en cuenta el factor tiempo a la hora de aplicar los criterios de rentabilidad.

El ingreso virtual por inversión en equipos convencionales equivalentes, denominados  $I_{CON}$ , se corresponden con el precio del equipo convencional, o las partes del mismo que habría que instalar en cualquier caso, en el edificio.

Es un ingreso que se produce una sola vez en el mismo momento que se produce la inversión, es decir al inicio de la vida útil del equipo.

El ingreso por valor de desecho de equipos, denominado  $I_{DES}$ , es el valor del equipo al final de su vida útil o en el instante del reemplazo. Aunque es un ingreso no recurrente, se producirá en el futuro. Para poderlo comparar con el resto de ingresos atípicos, que se producen en el inicio de la vida del sistema, hay que aplicar una actualización a la cantidad resultante.

El valor presente 'P' de una cantidad futura 'F'es:

$$P = F \cdot \left( \frac{P}{F}, i\%, N \right) = F \cdot (1 + i\%)^{-N} \quad \text{Ec. 6.37}$$

Donde: N es el número de años en el tiempo futuro; e i% es el precio del dinero.

El problema reside en inferir cual será el valor de desecho del sistema de hidroeficiencia. Se recurre a extrapolar el valor de desecho de equipos equivalentes, cuya vida útil finaliza en el momento actual. Es ese valor actual el que se toma en consideración, sin necesidad de actualización.

El ingreso económico atípico de un sistema de hidroeficiencia resulta ser la suma de Iso ingresos atípicos comentados:

$$IAT_{,i} = I_{SUB,i} + I_{CON,i} + I_{DES,i} \quad \text{Ec. 6.38}$$

Donde: IAT<sub>,i</sub> es el ingreso atípico por la implantación de un sistema de hidroeficiencia en el aparato 'i'; I<sub>SUB,i</sub> es su ingreso por subvenciones; I<sub>CON,i</sub> es su ingreso virtual por inversión en equipos convencionales equivalentes ; y, I<sub>DES,i</sub> es su ingreso por valor de desecho de los equipos, todos ellos expresados en €/persona/año.

## 7.2. ANÁLISIS DE COSTES

---

Para completar el estudio económico para la implantación de un sistema de hidroeficiencia es necesario identificar todos los costes asociados a su instalación y funcionamiento. El cálculo del beneficio implica dar valor a los costes. Esto en muchos casos es una difícil tarea por cuanto algunos de estos costes resultan intangibles (Azañeta y Ferreiro, 1994), o simplemente requiere realizar hipótesis y estimaciones difíciles de contrastar, como pueden ser la tasa de interés a aplicar a un proyecto en una situación de incertidumbre económica global o con periodos de amortización en el largo plazo.

En el análisis general que se hace de las tipologías de costes, estos pueden ser fijos o variables, y también pueden ser recurrentes o no recurrentes.

Los costes fijos, son los que van asociados a la instalación del sistema, tanto si después se opera o no. Por el contrario, los costes variables, son costes asociados a la operación del sistema. Si no hay operación del sistema, no se producen.

Los costes recurrentes, son aquellos que se producen a lo largo de toda la vida útil del sistema. De otro lado, los costes no recurrentes son los que se producen una única vez, independientemente del instante en que se producen.

### 7.2.1. COSTES FIJOS

---

Los *costes fijos* van asociados a la propia existencia del sistema de ahorro y se producen independientemente de su operación. No dependen, por tanto, de la cantidad de agua ahorrada o consumida.

Generalmente son los:

- costes de inversión,
- costes del mantenimiento preventivo,
- impuestos, seguros,

Al tratarse de instalaciones en edificios que no generan una actividad productiva, los costes debidos a impuestos no son de aplicación.

Igualmente se puede considerar con los costes debidos a los seguros de la instalación. Debido a la escala a la que se trabaja, sistemas exclusivos de edificios, los seguros no van a considerarse específicos del sistema de hidroeficiencia. Por tanto, tampoco son de aplicación.

Los costes de inversión son los asociados a la implantación del sistema de hidroeficiencia. Contemplan los dispositivos y equipos que lo forman, pero también incluye su puesta en obra, instalación y puesta en marcha.

$$CIV_i = \sum C_{\text{equipos},i} + \sum C_{\text{instalacion},i} + \sum C_{\text{marcha},i} \quad \text{Ec. 6.39}$$

Donde:  $CIV_i$  es el coste de inversión del sistema de hidroeficiencia instalado en el aparato "i", en €;  $C_{\text{equipos},i}$  es el coste de inversión de cada uno de los equipos 'j' que forma parte del sistema de hidroeficiencia 'i', en €;  $C_{\text{instalacion},i}$  es el coste de personal para instalar cada uno de los equipos 'j' del sistema de hidroeficiencia 'i'; y  $C_{\text{marcha},i}$  es el coste de personal para verificar y poner en funcionamiento cada uno de los equipos 'j' del sistema de hidroeficiencia 'i', en €. Hay muchas situaciones en las que el coste de personal de instalar el sistema incluye su puesta en funcionamiento.

En general son coste de tipo no recurrente, por cuanto se producen en un único periodo, al inicio de la implantación del sistema. Su valor coincide con el valor actual.

En algún caso, en instalaciones que tengan una gran envergadura, y su ejecución se prolonga durante varios años, los costes de inversión pueden ser recurrentes. En tal caso, hay que actualizar los costes que se producen a lo largo de los años de ejecución de la instalación al primer año de la misma. Este sería un caso muy puntual y no va a ser tratado en este trabajo.

Cuando el sistema de hidroeficiencia es un dispositivo, el coste de inversión es el propio dispositivo que forma el sistema, en número según el número de aparatos en el que se implanta.

Para las griferías y sanitarios de bajo consumo de agua son los propios de cada uno de los equipos ya instalados. En este sentido hay que hacer observar que cualquier edificio debe disponer de aparatos sanitarios por lo que, en el caso de instalaciones nuevas sólo se va a considerar el coste diferencial de los aparatos convencionales con respecto a los aparatos hidroeficientes, como ya se ha comentado. Para las instalaciones en las que se va renovar los sanitarios por otros hidroeficientes, el coste de inversión será el completo.

En los sistemas de tipo fuente alternativa, el coste de inversión es la suma de toda una serie de equipos, o de un único elemento si el sistema es compacto.

En general los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales o los de recuperación de condensados no son equipos compactos, pero los de reutilización de aguas usadas sí que lo son.

Sucede además que los sistemas de reutilización de aguas usadas, tienen unos costes de inversión mayores que en los SAP debido a la complejidad de los equipos y la duplicidad de redes de conducciones.

Así, se considera un primer elemento de los costes de inversión a la red separada de conducciones de aguas grises, que no existe en una instalación de evacuación convencional. Cuando el sistema de reutilización aprovecha todas las aguas usadas, tanto grises como negras, no se duplican redes de evacuación y por tanto sólo se considera el coste diferencial de conducir las aguas negras hasta el punto donde se encuentre el regenerador de aguas.

El resto de elementos a considerar en la inversión son: la estación de depuración y regeneración de aguas grises, o negras; el depósito de almacenamiento de aguas regeneradas, en caso de que no lo incorpore la estación depuradora; el equipo de presurización de las aguas regeneradas; y las conducciones de distribución del agua regenerada, que serán distintas y diferenciadas de las de agua potable para indicar su especial característica.

En el sistema de recuperación de condensados los costes de inversión son los debidos a las conducciones de evacuación del agua de condensación desde las máquinas climatizadoras hasta el depósito de almacenamiento de condensados. La instalación de evacuación debe existir de cualquier forma pero, lo habitual, es conectarla al sistema de desagüe del edificio. Es por ello que sólo se consideran sólo los costes diferenciales

de la parte de conducciones adicionales que conectan las conducciones existentes con el depósito.

Existe la posibilidad de que la red de distribución de agua procedentes de varias fuentes alternativas (SAP, aguas grises, condensados) se comparta por cuanto que las aguas así obtenidas sirven para dar servicio a unos mismos puntos de consumo. En tal caso, los costes de inversión en conducciones de distribución se reparten entre los sistemas que se están valorando. Sin embargo, si no se adoptan todos ellos, los costes se repercuten sólo en aquel o aquellos que se seleccionen. A efectos del análisis comparativo de alternativas que se realizará se van a considerar los costes totales en cada sistema y sólo cuando se hayan seleccionado varios de ellos, en la justificación se dividirán estos costes.

Los costes del mantenimiento preventivo son los debidos a la revisión a que debe ser sometida el sistema de hidroeficiencia, cada cierto tiempo, para que funcionen correctamente sus equipos y dispositivos.

$$COM_{MP,i} = \sum \text{revisiones} + \sum \text{limpieza} + \sum \text{reposición} \quad \text{Ec. 6.40}$$

Donde:

- $COM_{MP,i}$  es el coste de mantenimiento preventivo del sistema de hidroeficiencia implantado en el aparato "i";
- $\Sigma \text{revisiones}$  es el coste debido a la inspecciones a las que debe ser sometida el sistema;
- $\Sigma \text{limpieza}$  es el coste debido a la limpieza de los elementos que forman parte del sistema; y
- $\Sigma \text{reposición}$  es el coste de sustitución de elementos que forman parte del sistema y que hay que cambiar con cierta periodicidad para que siga funcionando correctamente.

Se trata, en cualquier caso, de unos costes recurrentes. La frecuencia de las revisiones, y por tanto de los costes, están fijadas bien por la legislación o bien por las normas de mantenimiento del fabricante de cada equipo.

En los sistemas de hidroeficiencia del tipo fuente alternativa, al trabajar con agua regenerada, la legislación establece unas pruebas a las que hay que someter a la instalación y unos periodos para ello (ESPAÑA, 2007b).

En otros sistemas y dispositivos, el mantenimiento preventivo se limita a la revisión de la instalación, la limpieza de los equipos, y la reposición programada de elementos fijada por el fabricante

La revisión puede ser realizada por personal de mantenimiento del propio edificio, no exclusivamente para el sistema de hidroeficiencia, o por personal externo con encargo para ello. Sólo las grandes instalaciones requerirán de personal propio.

Como costes recurrentes que son, aun siendo del mismo importe los costes en cada uno de los años, no resulta del mismo valor en cada periodo debido a la variabilidad temporal del precio del dinero y la inflación.

Es por ello que es necesario homogeneizar el importe de cada uno de los años y, o bien actualizarlos a su valor actual, o bien calcular su valor futuro al final del periodo de vida útil del sistema.

Otro aspecto a considerar en el análisis de costes fijos de inversión son las divergencias que existen entre los costes totales y los costes diferenciales de un sistema o de partes de un sistema, entendiendo por estos últimos la diferencia existente entre el coste del dispositivo de hidroeficiencia y el dispositivo convencional que hay que instalar necesariamente en el aparato hidrosanitario.

El tratamiento que se ha hecho en el análisis de ingresos con respecto a los ingresos virtuales por inversión en equipos convencionales se puede plantear, de forma equivalente, como coste en lugar de ingreso.

El resultado en el beneficio es el mismo, pero hay veces que resulta más cómodo abordar la cuestión desde el punto de vista del coste.

En implantaciones en edificios de nueva construcción, y sólo en éstos, al realizar el análisis de coste de inversión de un sistema de hidroeficiencia sólo se debe considerar la parte de sobrecoste del sistema con respecto al sistema convencional. Puesto que éste tiene que instalarse de todas formas.

A modo de ejemplo. El coste de inversión de la alcachofa de ducha con reductor de caudal incluido no será todo el importe del equipo, sino sólo la diferencia del valor de ésta con respecto a la ducha convencional. Puesto que ésta última tiene que instalarse, sólo se considera el coste diferencial que supone un mejor equipo.

Cuando se trate de una implantación en un edificio existente, el sistema convencional ya existe. La implantación de un sistema de ahorro no es una actuación nueva sino la "sustitución" de una instalación convencional en operación.

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES INTERIORES DE SUMINISTRO DE AGUA  
DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL AHORRO**

Tabla 6.7. Aplicación de costes totales o diferenciales de inversión

Sistema de hidroeficiencia	Equipo	¿equipo sustitutivo?	Edificio de Nueva planta	Edificio en reforma o sustitución
Perlizador /aireador		SI	Diferencial	Total
Limitador de caudal		NO	Total	Total
Alcachofa de ducha con reductor de caudal		SI	Diferencial	Total
Grifo de cisterna de doble pulsador		SI	Diferencial	Total
Grifo de cisterna de descarga interrumpible		SI	Diferencial	Total
Válvula reductora de presión		NO	Total	Total
Grifería de apertura en dos posiciones		SI	Diferencial	Total
Grifería de apertura en frío		SI	Diferencial	Total
Grifería temporizada		SI	Diferencial	Total
SAP	Superficie de captación	SI	Diferencial	Total
SAP	Filtro primario de retención	SI	Diferencial	Total
SAP	Filtros de bajante	NO	Total	Total
SAP	Separador de primera lluvia	NO	Total	Total
SAP	Depósito de almacenamiento	NO	Total	Total
SAP	Conmutador de flujo	NO	Total	Total
SAP	Equipo de bombeo	NO	Total	Total
RAU (negras)	Conducciones de evacuación	SI	Diferencial	Total
RAU (negras)	Depurador	NO	Total	Total
RAU (negras)	Conmutador de flujo	NO	Total	Total
RAU (negras)	Equipo de bombeo	NO	Total	Total
RAU (negras)	Conducciones impulsión	SI	Diferencial	Total
RAU (grises)	Conducciones de evacuación	NO	Total	Total
RAU (grises)	Depurador	NO	Total	Total
RAU (grises)	Conmutador de flujo	NO	Total	Total
RAU (grises)	Equipo de bombeo	NO	Total	Total
RAU (grises)	Conducciones impulsión	SI	Diferencial	Total

Los costes del sistema de ahorro ahora son totales por cuanto el sistema convencional sustituido no se aprovecha (se puede considerar el coste de reemplazo del sistema convencional, pero en general va a ser pequeño).

En la Tabla 6.7 se indica la aplicación de costes totales o costes diferenciales de inversión a diferentes sistemas de hidroeficiencia según se trate de un edificio de nueva ejecución o de la reforma o sustitución de dispositivos en un edificio existente.

La superficie de captación de los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales hay que considerarlos como costes totales en caso de que la cubierta convencional no fuese la adecuada para el aprovechamiento de lluvia y tuviera que ser sustituida por otra tipología.

### **7.2.2. COSTES VARIABLES**

---

Existen otros costes asociados al funcionamiento del sistema de hidroeficiencia. Son los costes variables. Si el sistema no funciona los costes variables no existen.

Este tipo de costes son:

- los costes de mantenimiento y operación, y
- los costes de mantenimiento correctivo.

En ambos casos, se trata de costes recurrentes al producirse durante todo el periodo de vida del sistema. Es por ello que deben actualizarse a un instante de tiempo determinado para tener en cuenta los efectos de depreciación que afectan al precio del dinero y la tasa de inflación.

Los costes de mantenimiento y operación son debidos al consumo energético de los equipos que forman parte de los sistemas de hidroeficiencia, y al consumo en fungibles debidos a la operación de dichos sistemas.

Son más evidentes en los sistemas de hidroeficiencia que suponen una fuente alternativa de agua, por cuanto la almacenada lo es a presión atmosférica. El caudal suministrado debe ser presurizado para poder abastecer en condiciones a los diferentes puntos de consumo en el edificio. Para ello se requiere de equipos de bombeo que consumen energía eléctrica, que tiene una tarifa, y que supone un coste.

Algunos sistemas de regeneración de aguas grises consumen energía de bombeo y/o aireación en su funcionamiento interno. También consumen energía eléctrica aquellos que utilizan rayos ultravioleta como elemento de desinfección final del agua.

El consumo de fungibles se produce, también principalmente, en los sistemas de tipo fuente alternativa de suministro. El agua debe ser desinfectada en su tratamiento final

en todos los casos (AQUAESPAÑA, 2011). En los sistemas de reutilización de aguas usadas, además, se utilizan productos en los tratamientos iniciales de regeneración.

A la hora de calcular los costes de operación, debido a su diferente naturaleza, se van a considerar por separado los correspondientes al consumo energético durante el funcionamiento del sistema y, los debidos a la utilización de elementos consumibles.

El coste de operación debido al consumo energético es el producto de la energía consumida durante el funcionamiento de dicho sistema por la tarifa eléctrica.

$$COM_{p1,i} = \frac{9,81 \cdot SWD_i \cdot H_B}{3600\eta} T_{ELEC} \quad \text{Ec. 6.41}$$

Donde:  $COM_{p1,i}$  es el coste de operación y mantenimiento debido al consumo energético del sistema de hidroeficiencia 'i', expresado en €/persona/año;  $SWD_i$  es la demanda del sistema de hidroeficiencia 'i', expresado en m<sup>3</sup>/persona/año;  $H_B$  es la altura de bombeo en mca;  $\eta$  es el rendimiento de la bomba;  $T_{ELEC}$  es la tarifa aplicable de la tarifa eléctrica, expresada en €/kWh.

El coste debido al uso de consumibles es el propio coste de adquisición del consumible, expresado como:

$$COM_{p2,i} = \Sigma PVP_{consumible} \quad \text{Ec. 6.42}$$

Donde:  $COM_{p2,i}$  es el coste de operación y mantenimiento debido al uso de consumibles en el sistema de hidroeficiencia 'i', expresado en €/persona/año; y  $PVP_{consumible}$  es el precio de los consumibles utilizados durante un año y repercutido entre el total de personas que utilizan la instalación, en €/persona/ud.

Los costes de mantenimiento correctivo son los debidos al coste de la mano de obra de las operaciones de reparación, más el coste de piezas y elementos que son repuestos o sustituidos como consecuencia de la reparación, y su cálculo es:

$$COM_{MC,i} = \frac{\Sigma MO_u \cdot t_{MO} + \Sigma RPST}{\Sigma pax} \quad \text{Ec. 6.43}$$

Donde:  $COM_{MC,i}$  es el coste de la operación y mantenimiento debido al mantenimiento correctivo en el sistema de hidroeficiencia 'i', expresado en €/persona/año;  $MO_u$  es el precio unitario, por hora, de cada uno de los operarios que intervienen en la operación de mantenimiento, expresado en €/hora;  $t_{MO}$  es el tiempo anual que le dedica cada operario al trabajo de mantenimiento, expresado en horas; el sumatorio se extiende al conjunto de todos los operarios que intervienen en la operación; y,  $RPST$  es el precio de cada uno de los equipos o materiales que son repuestos al cabo de un año, en €; y  $pax$  es el número de ocupantes del edificio.

Además sucede que durante la vida útil del equipo los costes de mantenimiento correctivo no son constantes de un periodo a otro. En los primeros años de vida útil del equipo las averías serán escasas. Por el contrario, al final de la vida útil, debido al desgaste, las averías serán más numerosas lo que significará que los costes de mantenimiento serán mayores.

Teniendo en cuenta todos los términos analizados, los costes por operación y mantenimiento de un determinado sistema de ahorro de agua 'i' son:

$$COM_i = COM_{MP,i} + COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MC,i} \quad \text{Ec. 6.44}$$

Donde,  $COM_i$  son los costes de operación y mantenimiento expresado en €/persona/año.

El primer sumando de la ecuación 44 se corresponde con un coste fijo, y el resto de sumandos son costes variables, aunque todos ellos son recurrentes durante el periodo de funcionamiento del sistema.

Unos excesivos costes de mantenimiento pueden implicar que sea más interesante la reposición completa del elemento. Cada elemento de cada uno de los sistemas tendrá una determinada vida útil, al final de la cual el equipo se supone que ha quedado obsoleto. No obstante, llegado ese momento pueden suceder dos alternativas. Se puede decidir que el equipo debe ser repuesto por uno nuevo, lo que supone que en el análisis económico hay considerar un nuevo coste de inversión transcurridos los 'n' años de vida útil de cada elemento, que se va a denominar " $CIV_{i,N}$ ", coste de inversión por reposición.

Por el contrario se puede decidir que el equipo todavía está en condiciones de prestar sus servicios de forma adecuada. Aunque el equipo haya superado su vida útil y existan equipos más modernos y eficientes, las buenas prestaciones del instalado hacen que no compense su sustitución por otro.

La reposición del equipo supone considerar, al cabo de los 'n' años de vida útil del equipo un nuevo coste de inversión del mismo, denominado *coste de reposición o de reemplazo*. El coste de reposición es no recurrente y se produce en el futuro por lo que debe ser actualizado al instante inicial.

Analizando cada uno de los sistemas de hidroeficiencia, en general, los dispositivos no van a generar coste de manutención y operación por cuanto son elementos pasivos. La operación de los aparatos sanitarios no requiere de energía por lo que sus costes de manutención son nulos. Algunas griferías temporizadas o con actuadores por infrarrojos sí que requieren alimentación eléctrica o baterías para su funcionamiento. El mantenimiento de estos equipos es mayoritariamente correctivo, limitándose a las

reparaciones cuando los aparatos tienen un mal funcionamiento. En algunas redes hidráulicas donde el agua tiene una elevada dureza los residuos calcáreos se depositan en los filtros de, sobretudo, los aireadores y reguladores de chorro. En ese caso, cada cierto tiempo hay que realizar operaciones de limpieza de filtros si los propios aparatos no disponen de dispositivos de autolimpieza.

Los que sí que generan costes de mantenimiento y operación son los sistemas de tipo fuente alternativa.

Así, los costes de mantenimiento de un sistema de reutilización de aguas usadas son debidos a la energía consumida por el depurador (en el sobrepresor, el compresor de aire), el consumo en el desinfectador, ya sea la energía consumida en el ultravioleta o los productos químicos, según sea el método de desinfección utilizado, la energía consumida en la presurización de las aguas regeneradas, y la recuperación y tratamiento de los fangos.

Los costes de mantenimiento se producen en la revisión periódica del depurador, al análisis de la calidad de las aguas regeneradas, la reposición de bacterias aerobias, y en la revisión del sistema de presurización.

Los costes de mantenimiento serán los debidos a la presurización del agua almacenada en condiciones atmosféricas de presión. En caso que el depósito de almacenamiento sea compartido con otros sistemas alternativos de producción de agua, los costes de mantenimiento se repartirán entre todos ellos.

Por último los costes de mantenimiento son los debidos a la limpieza del depósito de almacenamiento, de la bandeja recolectora de condensados de la climatizador, y de las conducciones.

### **7.3. VALORACIÓN DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA INVERSIÓN**

---

Una vez analizados y determinados los ingresos y los costes debidos a la implantación del sistema de ahorro, hay que valorarlos para poder realizar la comparación de los diferentes sistemas y entre éste y otros criterios de selección.

En el capítulo siguiente se van a desarrollar los diferentes métodos de selección de sistemas de hidroeficiencia. Se van a presentar dos enfoques. El enfoque mediante un análisis del coste-beneficio económico, y otro enfoque a través de la valoración multicriterio.

Lo que se desarrolla en este apartado es solamente la valoración de los aspectos económicos para realizar la selección mediante el enfoque multicriterio. El enfoque coste-beneficio, puesto que sólo se va a tener en cuenta aspectos económicos,

desarrolla éstos de una manera mucho más detallada. Cuándo utilizar uno u otro enfoque es una cuestión que se abordará en su momento.

Dentro de los numerosos criterios económicos para la selección de equipos (Cuchiella y d'Adamo, 2015) el que se va a desarrollar aquí no es el más elegido para valorar proyectos (Linn, 2010) sino uno fácilmente interpretable, que proporcione un orden de magnitud claro para cada una de las opciones.

El criterio que se va a utilizar es el periodo de retorno de la inversión (PBi). Se define como el periodo de tiempo que debe transcurrir para que el flujo de caja, diferencia entre flujos de entrada, ingresos, y los flujos de salida, gastos, sea igual al valor de la inversión realizada (Weingartner, 1969).

Toma por expresión:

$$\sum_{N=0}^{PBi} \frac{IF_{i,N} - OF_{i,N}}{(1+r)^N} = CIV_i \quad \text{Ec. 6.45}$$

Donde: PBi es el periodo de retorno de la inversión, expresado en años;  $IF_{i,N}$  son los flujos económicos de entrada de periodo 'N', en €/año;  $OF_{i,N}$  son los flujos económicos de salida de cada periodo 'N', en €/año; r es la tasa de descuento que se aplica al dinero, en tanto por uno; N es la variable tiempo; y  $CIV_i$  es el coste de inversión del sistema de hidroeficiencia i, en €.

Como flujos económicos de entrada económicos se consideran los ingresos económicos anuales como consecuencia del ahorro económico asociado al ahorro de agua y energía y los ingresos atípicos por subvenciones, etc.

$$IF_{i,N} = (IEA_i + IAT_i) \sum pax \quad \text{Ec. 6.46}$$

Donde  $IF_{i,N}$  está en €/año,  $IEA_i$  está expresado en €/persona/año;  $IAT_i$  también está expresado en €/persona/año; luego hay que tener en cuenta  $\sum pax$ , las personas que ocupan el edificio.

Los flujos económicos de salida son los costes recurrentes que se producen cada año, ya sean éstos fijos o variables. Así:

$$OF_{i,N} = (COM_{MP,i} + COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MC,i}) \sum pax \quad \text{Ec. 6.47}$$

Donde:  $OF_{i,N}$  está expresado en €/año;  $COM_{MP,i}$  son los costes fijos anuales por mantenimiento preventivo del sistema de hidroeficiencia 'i';  $COM_{P1,i}$  son los costes

variables anuales debidos al consumo energético del sistema de hidroeficiencia, en €/persona/año;  $COM_{P2,i}$  son los costes variables anuales debidos al consumo de fungibles del sistema de hidroeficiencia, en €/persona/año;  $COM_{MC,i}$  son los costes variables anuales debidos al mantenimiento correctivo del sistema de hidroeficiencia, en €/persona/año; y  $\sum pax$  es el número de ocupantes del edificio.

La tasa de descuento es la apreciación que experimenta con el tiempo un capital como consecuencia de ser invertido en bienes o equipos o en productos financieros. Puede ser (CEDEX, 2010):

- el tipo de interés de mercado a largo plazo,
- la tasa marginal de preferencia temporal,
- la tasa marginal de productividad del capital,
- la tasa de rendimiento mínima aceptable (Sullivan et al., 2004)

En el capítulo siguiente se hará un análisis pormenorizado de la tasa de descuento a aplicar en un estudio de coste-beneficio.

Para la simplicidad que se busca con el indicador aquí definido, se va a hacer el supuesto de considerar la tasa de descuento como cero.

La hipótesis resulta válida para equipos pequeños y de bajo coste, con periodos de retorno de la inversión inferiores de 2 años. La propia financiación de los equipos, y con ello la tasa de descuento, está incluida en el coste de inversión.

Sin embargo en sistemas grandes de elevado precio, o con periodos de retorno elevados, la hipótesis está del lado de la inseguridad. Menos fiable cuanto mayor sea la tasa real de descuento.

La hipótesis resulta fundamental para un cálculo sencillo del periodo de retorno, por cuanto, de no ser considerada, obliga a hacer un desarrollo iterativo para su determinación. No se da la simplicidad que se busca para este apartado. En cualquier caso, como de lo que se trata es de comparar sistemas de hidroeficiencia entre sí, dos sistemas con periodos de retorno similares tendrán errores similares.

Considerando que la tasa de descuento es nula, entonces:

$$PBi (IF_{i,N} - OF_{i,N}) = CIV_i \quad \text{Ec. 6.48}$$

Y sustituyendo por las ecuaciones 46 y 47, y operando:

$$PBi = \frac{CIV_i}{[(IEA_i + IAT_i) - (COM_{MP,i} + COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MC,i}) \sum pax]} \quad \text{Ec. 6.49}$$

Cuanto mayor es el periodo de retorno del sistema de hidroeficiencia 'i', peor es su viabilidad económica. El periodo de retorno puede tomar valores desde muy pequeños, algunos equipos se amortizan en meses, a valores muy elevados, de varias décadas incluso.

Generalmente los sistemas de tipo fuente alternativa tienen periodos de retorno elevados. También es cierto que su reemplazo se produce a muy largo plazo, no como otros dispositivos que por obsoletos son reemplazados a medio plazo.

Para relativizar el efecto de una variabilidad tan grande en el periodo de retorno, se ha establecido el que va a ser el indicador de la viabilidad económico del sistema de hidroeficiencia.

Se define el periodo de retorno relativo de un sistema de hidroeficiencia 'i' como el cociente entre la vida útil del sistema y el periodo de retorno de la inversión multiplicado afectado por una función de corrección:

$$PBR_i = 10 - K_{PBR_i} \frac{PB_i}{VU_i} \quad \text{Ec. 6.50}$$

Donde:  $PBR_i$  es el periodo de retorno relativo del sistema de hidroeficiencia 'i';  $PB_i$  es el periodo de retorno de la inversión del sistema, en años;  $VU_i$  es la vida útil del sistema de hidroeficiencia 'i', en años; y  $K_{PBR_i}$  es un factor de corrección que vale 10 puntos, y que hace que el rango del indicador esté acotado, como el resto de indicadores definidos.

El periodo de retorno relativo de un sistema de hidroeficiencia es el indicador de su viabilidad económica. El indicador puede tomar valores por debajo de 0 y hasta 10 puntos. Cuanto mayor es el valor del indicador, mejor será la viabilidad económica del sistema de hidroeficiencia en comparación con el resto de sistemas.

El sistema de hidroeficiencia será económicamente viable si el indicador es:

$$PBR_i > 0 \quad \text{Ec. 6.51}$$

Si el periodo de retorno relativo es mayor que cero significa que la inversión se recupera antes de agotar la vida útil del equipo. Cuanto mayor sea el periodo de retorno relativo antes se recupera la inversión, y se supone que mayor viabilidad tiene.

Por el contrario, si el periodo de retorno relativo resulta menor que cero, la inversión no se recuperara antes de agotar la vida útil del sistema de ahorro de agua, es decir, antes de que el sistema deba ser repuesto. Es evidente que en este caso la inversión

realizada no producirá ninguna rentabilidad. El sistema de hidroeficiencia no es económicamente viable si:

$$PBR_i \leq 0 \qquad \text{Ec. 6.52}$$

El indicador puede tomar valores por debajo de cero. Para acotar el valor del indicador en el mismo rango que el resto de indicadores del resto de criterios de selección, se fuerza para que el indicador de periodo de retorno relativo valga cero en caso que su cálculo proporcione un valor inferior a cero.

De esta manera, los sistemas de hidroeficiencia muy rentables tomarán valores del periodo de retorno ponderado cercanos a 10. Los sistemas menos viables económicamente tomarán valores cercanos a 0. Los sistemas que no sean económicamente viables tomarán valores exactamente igual a 0.

## 8. CONCLUSIONES

---

Para seleccionar el sistema de hidroeficiencia más adecuado para un determinado edificio no es suficiente con considerar sólo el ahorro de agua que produce. Además se deben tener en cuenta aspectos como el ahorro energético asociado, el impacto socio-ambiental que produce, el diseño del sistema, y la viabilidad económica de su implantación.

Cada uno de estos aspectos se cuantifica con un indicador que lo pone en valor.

El indicador de ahorro de agua tiene en cuenta el ahorro que genera un sistema de hidroeficiencia en comparación con el máximo ahorro que se podría lograr, que sería el caso en que toda la demanda de agua del edificio dejara de ser consumida de la red general de distribución de agua potable.

La máxima valoración del indicador sólo puede ser obtenida con sistemas de tipo fuentes alternativa. Actualmente la legislación nacional no permite el uso de las aguas regeneradas para aplicaciones hidrosanitarias, con lo que no es posible obtener la máxima valoración de este indicador. Es un desarrollo futuro analizar la forma de garantizar que las aguas regeneradas sean aptas para el consumo total y conseguir, así, ahorros del 100%.

El indicador de ahorro de energía compara la energía ahorrada como consecuencia del ahorro de agua con toda la energía utilizada por el agua consumida.

En este caso, un ahorro de agua del 100%, que obligaría a utilizar sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa, produciría valores de ahorro de energía

negativo, por cuanto este tipo de sistemas están obligados a presurizar el agua para ser distribuida y el agua caliente sanitaria hay que calentarla igualmente.

Los indicadores de impacto ambiental y de diseño valoran directamente si un sistema verifica ciertos aspectos relacionados con la influencia que tiene el sistema en el entorno social del edificio en el que se instala, o con la funcionalidad, manejabilidad, etc. del equipo.

Estos indicadores son absolutamente independientes del ahorro y pueden tomar los valores máximos, independientemente de cómo estén valorados el resto de criterios.

Por último, el indicador de viabilidad económica compara el periodo de retorno de la inversión realizada para implantar el sistema de hidroeficiencia con su vida útil. Para que el sistema resulte viable, la vida útil debe resultar mayor que el periodo de retorno de la inversión, lo que en algunos sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa puede no cumplirse.

Como puede observarse, las actuaciones que resultan adecuadas para el indicador de valoración de cierto criterio de selección, puede resultar perjudicial para otro. Es por ello que se hace necesario ponderar cada criterio de selección según las características del edificio en cuestión, para finalmente decidir cuál es el sistema de hidroeficiencia más adecuado.

## 7. VALORIZACIÓN Y SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AHORRO DE AGUA

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En capítulos precedentes se han indicado diferentes sistemas de hidroeficiencia que existen y el procedimiento, llegado el caso, para dimensionar un determinado sistema para una implantación concreta en un edificio.

La cuestión ahora es, ¿de entre todos los sistemas de hidroeficiencia que existen, cuál es el más adecuado para ser implantado en un determinado edificio? Se trata de elegir o seleccionar, de entre la amplia oferta, el sistema o sistemas más adecuado/s para dotar al edificio en cuestión.

Sin embargo, para seleccionar uno o varios sistemas hay que definir un objetivo y, con ello, un procedimiento de selección.

Las soluciones para conseguir ahorro de agua en el edificio son varias. El problema es seleccionar de entre las diferentes soluciones la más adecuada. Es un problema de valoración y elección de soluciones para un problema, el del ahorro de agua. Lo que no está tan claro es la forma de elegir la solución correcta.

Al tratarse de un problema de gestión de recursos naturales, en la literatura existen varias aproximaciones al problema.

Por un lado está el enfoque de elegir un criterio de valoración mediante un análisis de coste-beneficio (Arrojo-Agudo et al., 1998). La mejor solución o la solución viable es aquella que produzca una mayor rentabilidad económica. En este caso, todos los aspectos a considerar para la selección del equipo tienen que ser reducidos a un coste o a un ingreso, con la dificultad que ello puede conllevar.

Por otro lado está el enfoque de quienes consideran que hay aspectos medioambientales, sociales, culturales, que no pueden ser cuantificados económicamente (Aguilera y Alcántara, 2011). Proponen entonces la aplicación de una metodología de valoración multicriterio (entre otras) para el análisis y selección de soluciones.

En este trabajo se van a considerar ambos enfoques por cuanto cada uno tiene su campo de aplicación en función de la tipología de edificio con el que se esté trabajando.

Para el desarrollo de una metodología de selección mediante análisis de coste-beneficio se van a calcular, para cada sistema, los ingresos que se obtienen debidos al ahorro del agua, así como los costes de implantación de dicho sistema. Luego se obtendrán diversos ratios económicos con los que se determinará una rentabilidad del

sistema en cuestión. La elección se realizará desde el sistema más rentable hacia los menos rentables según sea la disponibilidad de la inversión.

Para la metodología multicriterio se van a definir una serie de criterios de selección: económicos, de ahorro, socio-ambientales, estéticos. Estos criterios son valorados en cada uno de los sistemas de hidroeficiencia. Para su adaptación a cada tipología de edificio se definen unos coeficientes de ponderación que tienen en cuenta la importancia que tiene cada criterio en el desarrollo del edificio.

Puede haber edificios en los que se quiere proyectar una imagen hacia el exterior en los que los aspectos estéticos tengan mayor importancia que los de ahorro, o no.

Aplicando la ponderación a cada criterio valorado se obtendrá una valoración multicriterio global de cada uno de los sistemas de ahorro, resultando seleccionado los sistemas de mayor a menor valoración global.

## **2. ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA**

---

El análisis técnico de los diferentes sistemas de ahorro que se ha desarrollado en capítulos anteriores demuestra que cada una de las alternativas genera unos distintos niveles de ahorro, y por tanto de ingresos, y tienen una complejidad técnica diferentes, lo que supone unos costes, preferentemente de inversión y mantenimiento, que varían también de unos a otros.

Cada uno de los sistemas analizados alcanza el objetivo de reducir el consumo de agua. El problema que se plantea no es decidir si un determinado sistema es viable o no, en base a los ingresos y gastos que genera. Al existir múltiples alternativas, el problema consiste en determinar cuál de ellas es la más adecuada para el fin que se busca, teniendo en cuenta que los ingresos y gastos son distintos de unas a otras.

Es evidente que la decisión de elegir la implantación de un determinado sistema, o incluso de varios, debe ser realizada con algún criterio. Aunque existen muchos matices al respecto, uno de los criterios más aceptados es el análisis de coste-beneficio.

El método del análisis de coste-beneficio se basa en la comparación económica de las diferentes alternativas, en este caso los diferentes sistemas de hidroeficiencia, que se quieren valorar. Aquel sistema que produzca mejores resultados económicos, en comparación con el resto, será el elegido para su implantación.

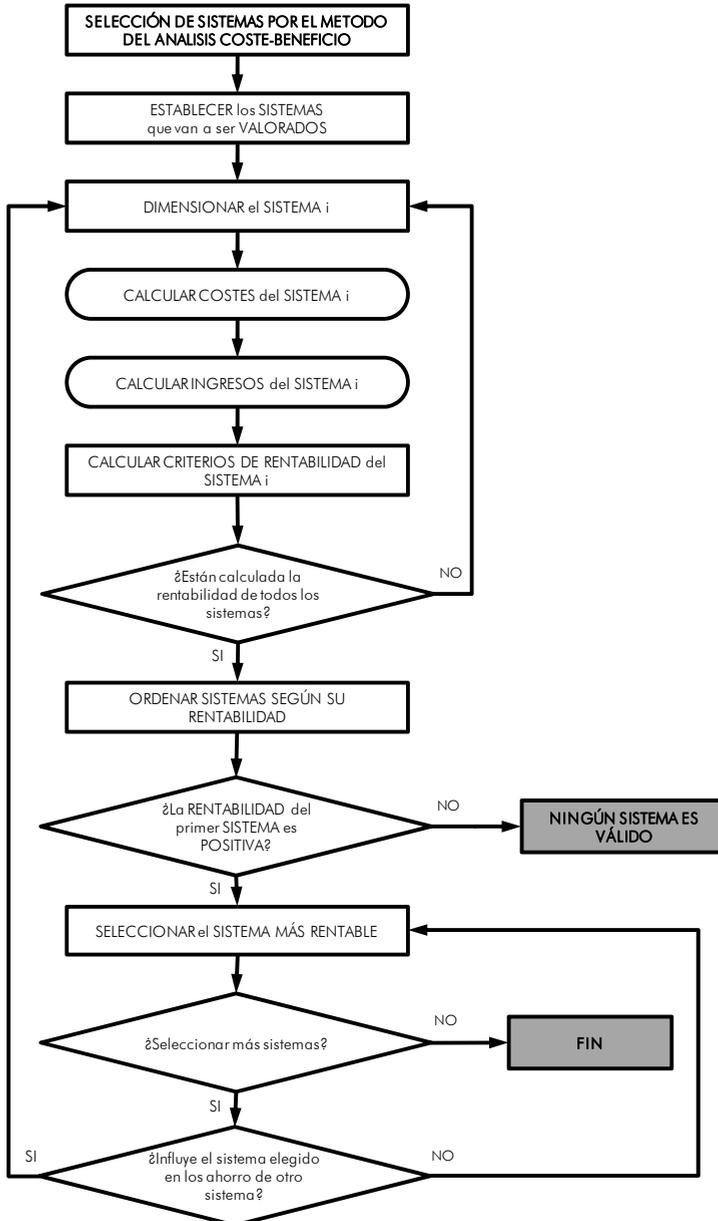


Figura 7.1. Diagrama del proceso de selección mediante al análisis de coste-beneficio

Nunca se elige un sistema en base a un único criterio de rentabilidad (Linn, 2010) sino que se toma la decisión en base a varios de ellos. Si dos de ellos apuntan al mismo sistema de hidroeficiencia, éste es el elegido. Si dos criterios apuntan a diferentes sistemas de hidroeficiencia, se utiliza un tercer criterio para decidir.

El desarrollo del método requiere efectuar algunas operaciones (Azqüeta y Ferreiro, 1994). En primer lugar, hay que identificar los costes y los ingresos que se obtienen con la implantación del sistema de hidroeficiencia. A la hora de caracterizar los sistemas de hidroeficiencia se ha desarrollado esta parte, calculando ingresos y gastos para cada uno de los sistemas.

En segundo lugar, hay que establecer una misma base de comparación tanto para los costes y como para los ingresos. Esto quiere decir, que hay que llevar todos a una misma referencia temporal.

En el lado de los costes, los de inversión en equipos, se producen una sola vez a lo largo de la vida útil del equipo. Los de operación y mantenimiento se producen durante toda su vida útil, pero se calculan por anualidades. Si se suman todos los diferentes costes tal cual, el orden de magnitud de los de inversión es mayor que los de operación y mantenimiento (por lo menos los correspondientes a una anualidad). Si se consideran la suma de las diferentes anualidades de los costes de operación y mantenimiento, y no se tienen en cuenta los efectos de inflación o el precio del dinero, se está favoreciendo los costes que se producen de forma recurrente, frente a los que son no recurrentes.

En el lado de los beneficios o ingresos sucede lo mismo. Los ingresos ordinarios son generados en anualidades. Por el contrario, los ingresos atípicos son no recurrentes (o al menos en la forma en que se consideran en este trabajo).

Es necesario realizar ciertas operaciones para actualizar, o amortizar, costes y beneficios recurrentes y no recurrentes a fin de poderlos comparar.

Hay una serie de beneficios que son consecuencia del ahorro de agua y energía que no son percibidos por el usuario final sino por el conjunto de la sociedad. Estos beneficios son:

- beneficios medio ambientales, por la reducción del uso de los recursos naturales comunes, la mayor disponibilidad de recursos para otros usos, la no sobreexplotación de acuíferos, el mantenimiento de mejores condiciones de calidad del agua en los cauces, etc.
- beneficios sociales de la implantación de un sistema de ahorro, en términos de: riqueza generada por la fabricación del producto, menores necesidades de fondos

públicos destinados a producir una mayor oferta de agua al poderse atender la demanda con los medios disponibles, etc.

La introducción de estos beneficios en el proceso de análisis coste-beneficio se realiza en tanto que es posible establecer una forma de cuantificarlos económicamente, y relacionarlos con la implantación de cada sistema de hidroeficiencia.

Existen referencias sobre la extremada complejidad de la valoración de las infraestructuras para la gestión de recursos naturales (Arrojo-Agudo, 1998). En el alcance de este trabajo no se pretende llegar a tal nivel de concreción, por lo que no se valorarán estos beneficios para la sociedad en el análisis coste-beneficio, aunque sí se tienen en cuenta en la valoración multicriterio (en tanto que en dicha valoración no se cuantifican económicamente sino se hace una valoración subjetiva de los mismos).

## **2.1. CRITERIOS DE RENTABILIDAD EN EL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO**

---

Cualquier análisis económico que se realice debe tener en cuenta el efecto que el precio del dinero tiene en los flujos de efectivo entrantes y salientes durante todo el periodo de estudio, así como su propia duración del periodo de estudio.

Para valorar la rentabilidad económica de las alternativas se van a aplicar una serie de métodos, conocidos como criterios de rentabilidad. Estos métodos utilizan una base comparable de estudio para eliminar el efecto del precio de dinero y del periodo de vida útil de los equipos en su estudio comparativo.

Cada uno de ellos tiene sus posibilidades y limitaciones. Es por ello que la decisión para la selección de una alternativa u otra, aun pudiéndose realizar con el resultado de un solo método, es conveniente que se realice con la combinación del resultado de varios de ellos, como se ha indicado.

La rentabilidad económica que produce cada sistema de hidroeficiencia se va a cuantificar como el beneficio económico anual del mismo. El beneficio es la diferencia entre ingresos y costes, incluyendo los recurrentes y no-recurrentes, y habiéndolos reducido todos ellos a una misma base temporal de comparación.

## 2.2. MÉTODO DEL VALOR EQUIVALENTE DE UN FLUJO DE EFECTIVO.

---

Son varios los métodos en los que los flujos salientes, costes, y entrantes, ingresos, son actualizados a un instante de tiempo, o son anualizados a lo largo de todo el periodo del estudio.

El método del valor actual neto (VAN) calcula el valor equivalente de todos los flujos de efectivo al instante inicial de tiempo. Los ingresos se consideran como flujos positivos, y los costes como flujos negativos.

La alternativa es rentable cuando el VAN es mayor o igual que cero, es decir cuando los ingresos actualizados son superiores a los gastos.

El método del valor futuro (VF) calcula el valor equivalente de los flujos de efectivo al instante final del periodo de estudio. Al igual que el método del VAN, si el resultado es positivo, o igual a cero, la alternativa es rentable. El método del VAN y el VF son equivalentes, y de hecho el valor calculado por uno y otro métodos son equivalente si uno, el de VF, se traspone el instante inicial, o el del VAN se traspone el instante final.

El método del valor anual (VA) consiste en calcular el flujo de efectivo de los ingresos menos los costes anuales y restarle el costo anual equivalente del capital invertido, lo que se denomina "recuperación del capital" (RC).

La diferencia de este método con respecto al método del VAN o VF es que, mientras en aquellos se calculan cantidades totales, en este caso se "anualizan" los flujos de efectivo. Sin embargo, al igual que con los métodos anteriores un resultado del VA positivo o igual a cero supone que la alternativa es rentable. El VA se puede calcular a partir del VAN o del VF sin más que anualizar su valor.

El desarrollo de todos estos métodos requiere del cálculo de los valores equivalentes presentes, futuros y anuales de los diferentes flujos de efectivo que se producen.

Para el cálculo del valor actual (VAN) de los flujos de efectivo es necesario convertir a su valor equivalente los ingresos y los costes que se producirán en cada uno de los años, tanto si estos son constantes como si varían (porque la tarifa se incrementa de un año a otro, por ejemplo).

La relación para obtener el valor presente de una cantidad anual *constante* durante un periodo de N años es:

$$P=A \cdot \left(\frac{P}{A}, i\%, N\right) \quad \text{Ec. 7.1}$$

Donde: "P" es el valor presente de una cantidad; "A" es la anualidad que se quiere convertir calculada al final de cada año; "i%" es la tasa de interés anual expresada en tanto por uno; y "N" es el número de años.

La relación  $\left(\frac{P}{A}, i\%, N\right)$  es el factor de conversión de una anualidad a su valor presente y su valor es:

$$\left(\frac{P}{A}, i\%, N\right) = \left[\frac{(1+i\%)^N - 1}{i\%(1+i\%)^N}\right] \quad \text{Ec. 7.2}$$

En el caso que la anualidad no sea constante cada uno de los años del periodo sino que crezca según una cantidad *uniforme* cada año, el valor presente de la cantidad que se incrementa se calcula como:

$$P = G \left(\frac{P}{G}, i\%, N\right) \quad \text{Ec. 7.3}$$

Donde: "G" es la cantidad uniforme que crece en cada periodo, y  $\left(\frac{P}{G}, i\%, N\right)$  es el factor de conversión de una anualidad a su valor presente y su valor es:

$$\left(\frac{P}{G}, i\%, N\right) = \left[\frac{1}{i\%} \left(\frac{(1+i\%)^N - 1}{i\%(1+i\%)^N} - \frac{N}{(1+i\%)^N}\right)\right] \quad \text{Ec. 7.4}$$

Cuando la anualidad no crece en una cantidad constante, sino que aumenta en una *tasa promedio* "if%", por ejemplo la tasa de inflación, el valor presente de la anualidad es:

$$P = \frac{A_1}{1+i_f\%} \left(\frac{P}{A}, i_{cr}\%, N\right) \quad \text{Ec. 7.5}$$

Donde: "A<sub>1</sub>" es el valor de la anualidad al final del primer año de la anualidad que va a crecer, e "i<sub>cr</sub>%" es la denominada tasa de conveniencia que toma por valor:

$$i_{cr}\% = \frac{1+i\%}{1+i_f\%} - 1 \quad \text{Ec. 7.6}$$

Donde: if% es la tasa de inflación, e i% es la tasa de interés del dinero.

La justificación de la tasa de conveniencia es la depreciación que experimenta una inversión, cuyo valor aumenta cada según la tasa de interés, como consecuencia de la tasa de inflación.

Para el cálculo del valor futuro (VF) será necesario convertir los flujos realizados en el inicio del periodo de análisis (generalmente los costes de inversión) y las anualidades a su valor futuro.

El valor futuro de un único flujo presente se obtiene de la relación:

$$F = P \cdot \left( \frac{F}{P}, i\%, N \right) \quad \text{Ec. 7.7}$$

Donde: "F" es el valor futuro de una cantidad, y a relación  $\left( \frac{F}{P}, i\%, N \right)$  es el factor de conversión de un valor presente a un valor futuro dentro de N años a un tipo de interés i%, y se calcula como:

$$\left( \frac{F}{P}, i\%, N \right) = (1 + i\%)^N \quad \text{Ec. 7.8}$$

Aplicando esta relación se puede obtener el valor futuro de cualquier anualidad que haya sido convertida a su valor presente. No obstante, las relaciones directas de conversión de las diferentes anualidades son:

Para una anualidad constante durante un periodo de N años:

$$F = A \cdot \left( \frac{F}{A}, i\%, N \right) \quad \text{Ec. 7.9}$$

Donde: "F" es el valor futuro de la anualidad, y  $\left( \frac{F}{A}, i\%, N \right)$  es el factor de conversión de una anualidad a su valor futuro, que vale:

$$\left( \frac{F}{A}, i\%, N \right) = \left[ \frac{(1 + i\%)^N - 1}{i\%} \right] \quad \text{Ec. 7.10}$$

Para una anualidad creciente según un gradiente uniforme "G":

$$F = \frac{G}{i\%} \cdot \left( \frac{F}{A}, i\%, N \right) - \frac{N \cdot G}{i\%} \quad \text{Ec. 7.11}$$

Para una anualidad creciente según una tasa promedio if%

$$F = \left( \frac{F}{P}, i\%, N \right) \frac{A_1}{1 + if\%} \left( \frac{P}{A}, i_{cr}\%, N \right) \quad \text{Ec. 7.12}$$

Donde: "A<sub>1</sub>" es el valor de la anualidad al final del primer año de la anualidad que va a crecer, e i<sub>cr</sub>% es la tasa de conveniencia.

En muchos casos, se desarrolla el método del valor anual neto (VAN) de una forma muy simple considerando la anualización al valor presente o el valor futuros de los flujos de entrada y salida, sin considerar los efectos de la inflación.

Si se anualiza una cantidad presente 'P', se aplica:

$$A = P \left( \frac{A}{P}, i\%, N \right) = P \left[ \frac{i\%}{1 - (1 + i\%)^{-N}} \right] \quad \text{Ec. 7.13}$$

donde: A es la anualidad de la cantidad presente 'P'; i% es el interés de dinero ; y 'N' es el número de años en los que se amortiza la cantidad presente 'P'.

Para el caso de anualizar una cantidad futura 'F':

$$A = F \left( \frac{A}{F}, i\%, N \right) = F \left[ \frac{i\%}{(1 + i\%)^N - 1} \right] \quad \text{Ec. 7.14}$$

donde: A es la anualidad de la cantidad futura 'F'; i% es el interés de dinero ; y 'N' es el año en que se genera la cantidad futura 'F'

Como se ha puesto de manifiesto en las relaciones de conversión de los flujos de efectivo a sus valores equivalentes, es necesario en todos los casos aplicar una tasa de interés a la cantidad de dinero. El principal problema a la hora de aplicar estos métodos reside precisamente en el valor de dicha tasa de interés, por cuanto no se corresponde con la tasa de inflación ni con el precio oficial del dinero, valores publicados en estadísticas oficiales de las diferentes administraciones y de fácil conocimiento. Un error al determinar la tasa de interés puede conducir a un resultado incorrecto.

En el caso del análisis de una única alternativa, una tasa de interés elevada provoca que el valor del VAN (y sus equivalentes) obtenido sea menor. Como la alternativa es rentable si su VAN es mayor o igual que cero, cuanto menor sea el VAN menos rentable es la alternativa, y es posible que se deseche siendo una opción realmente atractiva.

Al comparar alternativas, una tasa de interés excesivamente alta penaliza las alternativas con unos elevados costes de inversión, mientras que una tasa de interés excesivamente baja puede penalizar alternativas con reducidos costes de inversión. Al igual que antes es posible que se deseche una alternativa siendo realmente buena.

Existen varias formas de abordar la tasa de interés en función del uso que se le dé al edificio en cuestión.

Cuando en el edificio se desarrolla una actividad productiva, la implantación de medidas de eficiencia va destinada a mejorar la productividad de la actividad que se

desarrolla. En este sentido, la tasa de interés a tener en cuenta es lo que se conoce como la Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable, TREMA, (Minimum Attractive Rate of Return, MARR en inglés) (Sullivan et al. , 2004) que representa una medida de la mínima rentabilidad que se le exige a cada alternativa de inversión de tal forma que cubra: la totalidad de la inversión inicial realizada, los flujos de salida durante la operación de la alternativa, los intereses que se deben pagar de la parte de la inversión financiada con capital ajeno, los impuestos y la rentabilidad que el promotor quiere obtener del capital propio invertido.

La TREMA es una medida del costo de oportunidad de invertir en la alternativa en lugar de destinar esa inversión a otras opciones de mercado. Se puede valorar entorno a un 10%, pero su valor es siempre una estimación por lo que se añade una incertidumbre a todos los cálculos que depende de ella.

La incertidumbre introducida se transmite a la propia validez de los métodos del valor actual neto, valor futuro y valor actual lo que, para mejorar el proceso de selección de alternativas y garantizar su bondad, obliga a complementarlos con otros métodos en los que la TREMA no intervenga.

Para usos no productivos en el edificio, la búsqueda de la rentabilidad no es un objetivo, por lo que las medidas de hidroeficiencia no se implantan por la búsqueda de una rentabilidad alternativa de la inversión.

En tal caso, la mejor aproximación a la tasa de interés financiera para una pequeña economía libre se establece, en el horizonte 2014-2020, en el 4% (Sartori, 2014).

### 2.3. MÉTODO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO

---

El método de la tasa interna de retorno, TIR, calcula el valor de la tasa de interés que hace que se igualen los ingresos, ordinarios y atípicos, con los costos, incluidos los costes de inversión, de una determinada alternativa.

Para igualar el valor de los ingresos y los costes hay que tomar un instante de referencia, que puede ser el inicial o el final. Si se toma como instante de referencia el inicial del periodo, cada uno de los ingresos y gastos debe ser referido a dicho instante aplicando, para cada año del periodo, el factor de conversión correspondiente. Así los ingresos totales "I" al inicio del periodo de estudio son:

$$I = \sum_{k=0}^N I_k \left( \frac{P}{F}; i_{TIR}\%; k \right) \quad \text{Ec. 7.15}$$

Donde: “ $I_k$ ” es la totalidad de los ingresos que se han producido en el año “ $k$ ”, “ $i_{TIR}\%$ ” es la tasa interna de retorno que se busca, y  $\left(\frac{P}{F}; i\%; N\right)$  es el factor de conversión de una cantidad futura producida en el año “ $N$ ” a su valor presente equivalente con un tasa de interés “ $i$ ” y toma por valor:

$$\left(\frac{P}{F}; i\%; N\right) = \frac{1}{(1+i\%)^N} \quad \text{Ec. 7.16}$$

Los costes totales al inicio del periodo serán igualmente:

$$C = \sum_{k=0}^N C_k \left(\frac{P}{F}; i_{TIR}\%; k\right) \quad \text{Ec. 7.17}$$

El método de la tasa interna de retorno establece la igualdad de ingresos y costes luego:

$$\sum_{k=0}^N I_k \left(\frac{P}{F}; i_{TIR}\%; k\right) = \sum_{k=0}^N C_k \left(\frac{P}{F}; i_{TIR}\%; k\right) \quad \text{Ec. 7.18}$$

y teniendo en cuenta los factores de conversión:

$$\sum_{k=0}^N I_k \frac{1}{(1+i_{TIR}\%)^k} = \sum_{k=0}^N C_k \frac{1}{(1+i_{TIR}\%)^k} \quad \text{Ec. 7.19}$$

La resolución de la  $i_{TIR}\%$  se realiza por un procedimiento iterativo, y será diferente para cada una de las alternativas que se valoran.

El valor obtenido de la TIR no ofrece por sí mismo ningún criterio de selección. Para determinar si una alternativa, caso que se valore de forma independiente, es rentable o no hay que comparar la TIR con alguna otra tasa de interés que sirva de referencia a quien realiza el proceso de selección. Esta tasa, generalmente, es la TREMA, pero se pueden utilizar otros parámetros, como el precio del dinero, la tasa de inflación,... Si la TIR es mayor que la TREMA la alternativa es rentable, de otro modo no lo es.

En la comparación de alternativas, la TIR debe ser tomada con mucha precaución. Al calcular los valores presentes de ingresos y costes, los producidos al inicio del periodo de estudio, generalmente los costes de inversión y los ingresos atípicos, no se ven afectados por la TIR. Al comparar las alternativas hay que observar el valor de la TIR

pero en relación a la cuantía de las inversiones realizadas, en lo que se denomina el procedimiento de las inversiones incrementales (Sullivan et al., 2004).

Existe otro problema asociado al método. Al comparar alternativas mediante el método de la TIR y del VAN (o sus equivalentes) pueden aparecer inconsistencias. Es posible que una alternativa que ha sido evaluada calculando la TIR sea rentable, y sin embargo a partir del valor de su VAN no lo sea. Esto es debido a que, por la forma de cálculo de los flujos presentes, el método de la TIR supone que la tasa de rendimiento calculada lo hace con un tasa  $I_{TIR}\%$ , que puede ser mucho mayor que la TREMA, y por tanto tan elevada como para que en el mercado no existan oportunidades de inversión alternativas que produzcan tanto interés, produciendo resultados irreales e inconsistentes.

Teniendo que, como se ha establecido, para que una alternativa sea rentable la TIR debe ser mayor que la TREMA, el método es en sí mismo inconsistente para la toma de decisiones. De hecho, es un método con poca aceptación entre los teóricos del análisis económico, pero es de gran aceptación y aplicación general, razón por la cual se ha incluido en este trabajo.

Para este trabajo se utilizará como método de apoyo a la decisión del método del VAN. Existen otros métodos que calculan tasas de rendimiento, como el método de la tasa externa de retorno (Sullivan et al., 2004), que corrigen en cierta forma los defectos de este método pero, dado que no aportan mejores resultados que los métodos basados en el valor equivalente de un flujo de efectivo, no se van a desarrollar.

## 2.4. MÉTODO DEL PERIODO DE RETORNO O PAY-BACK

---

El método del periodo de retorno indica el número de años que tienen que transcurrir para que los flujos de caja entrante sean iguales a los flujos de caja salientes, sin tener en cuenta el instante temporal en el que se producen, y por tanto sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

$$\sum_{N=0}^{PB_i} \frac{IF_{iN} - OF_{iN}}{(1+r)^N} \geq CIV_i \quad \text{Ec. 7.20}$$

Donde :

- $IF_{iN}$ , es la totalidad de los ingresos anuales que se han producido en el año 'N';
- $OF_{iN}$ , es la totalidad de los gastos recurrentes anuales que se han producido en el año N;
- $CIV_i$ , es el coste de inversión del sistema;

- $r$ , es la tasa de interés;  $y$
- $PB$ , es el número de años.

El valor del periodo de retorno es el 'PB' más pequeño que verifica la ecuación 7.20.

El método no es en sí mismo un método de comparación de alternativas ni de medida de la rentabilidad de un sistema, sino que refleja la liquidez de cualquier iniciativa de inversión.

El método resulta de difícil aplicación si se considera la tasa de interés, pero es muy habitual realizar una simplificación considerando la tasa de interés nula. En tal caso, el método resulta de una gran simplicidad de aplicación, y por ello está muy extendido. Sin embargo, al no contemplar el efecto que el tipo de interés tiene sobre los flujos de caja, ni los flujos de caja entrantes que se obtienen después del periodo de retorno, pero antes de que se agote la vida útil de equipo, simplemente da órdenes de magnitud de la velocidad a la que se recupera la inversión.

Si el periodo de retorno es corto, inferior a 3 anualidades, o el tipo de interés es muy bajo, los resultados obtenidos son más a menos reales.

Por el contrario, si el periodo de retorno es elevado o el tipo de interés elevado, la fiabilidad del cálculo (es decir, la veracidad de que realmente ese sea el periodo de retorno) es muy escasa. En este caso, el error cometido es hacia menores valores de periodo de retorno calculado que el periodo real de recuperación de la inversión.

En general, cuando los tipos de interés son elevados, el método del periodo de retorno sirve para descartar alternativas, o sistemas, pero no para aceptarlas como viables. En tal caso, hay que aplicar otro criterio de rentabilidad más fiable.

## 2.5. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE RENTABILIDAD AL AHORRO DE AGUA

---

Se van a aplicar los criterios de rentabilidad generales analizados, al caso de los diferentes ingresos y costes que se generan en la implantación de los sistemas de hidroeficiencia.

Para el análisis del coste-beneficio se van a aplicar el método del valor actual neto, y de la tasa interna de retorno. En el caso que ambos métodos coincidan en la preferencia de un mismo sistema de hidroeficiencia, ese es el sistema elegido.

En caso que la aplicación de los dos métodos no coincida, entonces se recurre el método del periodo de retorno para decidir.

Así pues, hay que anualizar al primer año los flujos de efectivo recurrentes obtenidos cada uno de los años. Igualmente hay que calcular el valor presente del valor de desecho del equipo y del valor de reposición del mismo al finalizar su vida útil.

En la Figura 7.2 se presenta un esquema de los diferentes costes que intervienen en la implantación de un sistema de hidroeficiencia, analizados en el capítulo anterior. Se ha establecido una clasificación en flujos de salida no recurrentes, y flujos de salida recurrentes, por cuanto que, según el criterio de rentabilidad que se aplique, hay que convertir unos u otros a la misma referencia temporal.

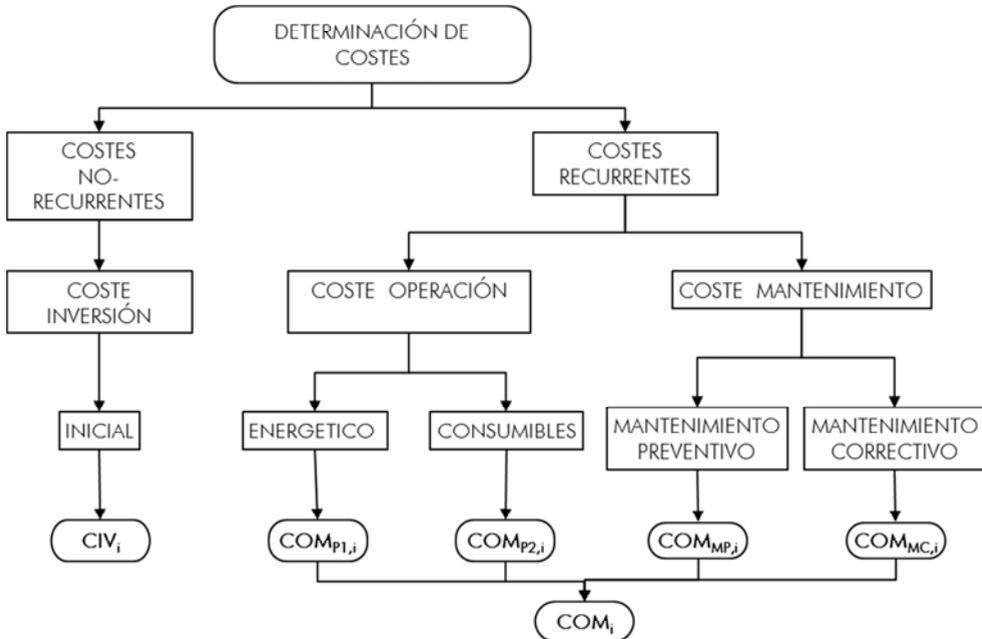


Figura 7.2. Esquema de costes asociados a la implantación de un sistema de hidroeficiencia

Entre los costes no-recurrentes se encuentran:

Los costes de inversión,  $CIV_i$ . Son costes que se producen en el año de implantación del sistema, y no hay que anualizarlos, por lo que se consideran tal cual.

$$VAN(CIV_i) = CIV_i \quad \text{Ec. 7.21}$$

El resto de costes son de tipo recurrente, es decir que se producen cada año. Algunos de tipo fijo, y otros variables.

Los costes energéticos de operación,  $COM_{p1,i}$  se producen de forma anual y aumentan conforme lo hace la tarifa de la energía. A efectos de cálculo se va a considerar que el precio de la energía aumenta año a año según una tasa de inflación 'if<sub>n</sub>%'. Hoy en día, en los países desarrollados, las tasas de inflación están más o menos controladas, por lo que su valor se puede suponer constante e igual al valor medio de los últimos 5 años previos al estudio. De esta forma:

$$VAN(COM_{p1,i}) = \frac{COM_{p1,i}}{1+if_n\%} \left( \frac{P}{A}; i_{cr}\%; N \right) = \frac{COM_{p1,i}}{1+if_n\%} \left[ \frac{(1+i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1+i_{cr}\%)^N} \right] \quad \text{Ec. 7.22}$$

con:

$$i_{cr}\% = \frac{1+i\%}{1+if_n\%} - 1 \quad \text{Ec. 7.23}$$

Donde:

- if<sub>n</sub>% es la tasa anual de inflación;
- N es el número de años al que afecta al análisis económico. Siguiendo el criterio de (Sartori, 2014) se puede considerar un horizonte temporal para el análisis de 30 años.

Los costes de operación en consumibles,  $COM_{p2,i}$ . Estos costes aumentan con el precio de los consumibles. Es razonable establecer la hipótesis que dichos precios aumentan, también, según la tasa de inflación anual 'if<sub>n</sub>%'. Así:

$$VAN(COM_{p2,i}) = \frac{COM_{p2,i}}{1+if_n\%} \left( \frac{P}{A}; i_{cr}\%; N \right) = \frac{COM_{p2,i}}{1+if_n\%} \left[ \frac{(1+i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1+i_{cr}\%)^N} \right] \quad \text{Ec. 7.24}$$

Los costes de mantenimiento preventivo,  $COM_{MP,i}$ . Generalmente es un servicio externalizado y se corresponde con el precio que una empresa de servicios de mantenimiento percibe por realizar dicho mantenimiento. Es de suponer que el precio de este servicio aumenta igualmente con la tasa de inflación 'if<sub>n</sub>%'. Así:

$$VAN(COM_{MP,i}) = \frac{COM_{p1,i}}{1+if_n\%} \left( \frac{P}{A}; i_{cr}\%; N \right) = \frac{COM_{p1,i}}{1+if_n\%} \left[ \frac{(1+i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1+i_{cr}\%)^N} \right] \quad \text{Ec. 7.25}$$

Los costes de mantenimiento correctivo,  $COM_{MC,i}$ . Este coste se debe a las reparaciones de los equipos. Al margen del aumento anual que supone el aumento del precio de la mano de obra y de los repuestos del personal que lleva a cabo las reparaciones, este concepto experimenta un aumento anual debido al mayor índice de fallos que presenta el equipo como consecuencia de su mayor desgaste.

Aunque el aumento de la tasa de fallos es exponencial con los años de funcionamiento del equipo, se va a suponer que el aumento en el coste de reparación es lineal con los años (por simplicidad de cálculo) y en un porcentaje de los costes del primer año. El porcentaje de aumento es 'ts<sub>fl</sub>%'. Dependiendo del sistema puede ser muy bajo, para las griferías que no incorporan equipos electromecánicos, o alto para los sistemas con fuentes alternativas que disponen de varios equipos electromecánicos. Hay griferías en que la tasa de fallo es cero, y no porque no fallen durante su vida útil, sino porque el coste de inversión del equipo es relativamente bajo y, en caso de fallo, en lugar de realizar una reparación se procede a la reposición del grifo. Así:

$$\begin{aligned} VAN(COM_{MC,i}) &= \frac{COM_{MC,i}}{1 + (ts_{fl}\% + if_n\%)} \left( \frac{P}{A}; i_{cr,ll}\%; N \right) = \\ VAN(COM_{MC,i}) &= \frac{COM_{MC,i}}{1 + (ts_{fl}\% + if_n\%)} \left[ \frac{(1 + i_{cr,ll}\%)^N - 1}{i_{cr,ll}\%(1 + i_{cr,ll}\%)^N} \right] \end{aligned} \quad \text{Ec. 7.26}$$

con

$$i_{cr,ll}\% = \frac{1 + i\%}{1 + (ts_{fl}\% + if_n\%)} - 1 \quad \text{Ec. 7.27}$$

donde:

- ts<sub>fl</sub>% es la tasa de fallos; e
- if<sub>n</sub>% es la tasa de inflación

Con todo, el valor actual neto de todos los costes que intervienen en el análisis del sistema de hidroeficiencia, 'i', es:

$$\begin{aligned} VAN(COSTE)_i &= CIV_i + \frac{(COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MP,i})}{1 + if_n\%} \left[ \frac{(1 + i_{crn}\%)^N - 1}{i_{crn}\%(1 + i_{crn}\%)^N} \right] + \\ &+ \frac{COM_{MC,i}}{1 + (ts_{fl}\% + if_n\%)} \left[ \frac{(1 + i_{cr,ll}\%)^N - 1}{i_{cr,ll}\%(1 + i_{cr,ll}\%)^N} \right] \end{aligned} \quad \text{Ec. 7.28}$$

Donde:

$$i_{cr,ll}\% = \frac{1 + i\%}{1 + (ts_{fl}\% + if_n\%)} - 1 \quad \text{Ec. 7.29}$$

Con respecto a los ingresos, la Figura 7.3 muestra el esquema de los que se generan con la implantación del sistema de ahorro. Se han distinguido en ingresos ordinarios, que se producen de forma recurrente durante todo el periodo de operación del sistema, e ingresos atípicos, que se generan de forma no-recurrente. En los ingresos atípicos,

algunos se generan el primer año de implantación del sistema, mientras que los ingresos por valor de desecho del equipo se generan un cierto periodo después. Se ha establecido esa clasificación para agrupar ingresos que deben ser convertidos a una misma referencia temporal.

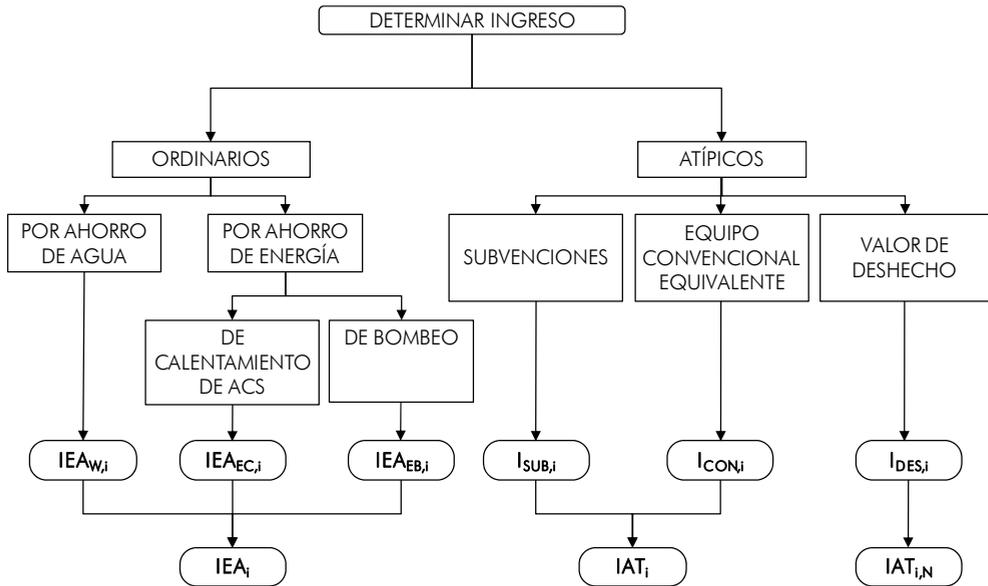


Figura 7.3. Esquema de ingresos asociados a la implantación de un sistema de hidroeficiencia

El ingreso económico anual,  $IEA_i$ . Agrupa al ingreso económico ordinario por ahorro de agua,  $IEA_{W,i}$ , el ingreso económico ordinario por ahorro de energía de calentamiento,  $IEA_{EC,i}$ , y el ingreso económico ordinario por ahorro de energía de bombeo,  $IEA_{EB,i}$ . En un ingreso recurrente que se produce todos los años, y que es necesario convertir a una anualidad del primer año. Experimenta un aumento anual debido al incremento de la tarifa del agua, de la electricidad y/o del precio de los combustibles fósiles. Se puede suponer que dicho aumento es, en todos los casos, la tasa de inflación anual,  $'if_n\%'$ , por lo que se puede considerar una relación de actualización porcentual. Así:

$$VAN(IEA_i) = \frac{IEA_i}{1 + if_n\%} \left( \frac{P}{A}; i_{cr}\%; N \right) = \frac{IEA_i}{1 + if_n\%} \left[ \frac{(1 + i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1 + i_{cr}\%)^N} \right] \quad \text{Ec. 7.30}$$

El ingreso atípico agrupa a los ingresos atípicos por subvenciones, por inversión virtual en equipos convencionales equivalentes, y por valor de deshecho. Los dos primeros se obtienen en el primer año de implantación del sistema. Es por ello que no es necesario convertirlos y su valor actual neto coincide con el valor del ingreso.

El ingreso atípico por valor de desecho del sistema, se obtiene en el n-ésimo año de funcionamiento del mismo. Como se comentó en el análisis de ingresos del capítulo anterior, su valor es de difícil determinación por lo se toma el valor actual de equipos de deshecho equivalentes. Es por ello que tampoco es necesario actualizarlo. Así:

$$VAN(IAT_i) = I_{SUB,i} + I_{CON,i} + I_{DES,i} \quad \text{Ec. 7.31}$$

Dond:  $IAT_i$  es el ingreso atípico del sistema de hidroeficiencia 'i';  $I_{SUB,i}$  es el debido a subvenciones;  $I_{CON,i}$  es el debido a equipos convencionales equivalentes; y  $I_{DES,i}$  es el valor de deshecho.

Con todo, el valor actual neto de los diferentes ingresos de un determinado sistema de hidroeficiencia, 'i', es:

$$VAN(INGRESO)_i = \frac{IEA_i}{1 + if_n\%} \left[ \frac{(1 + i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1 + i_{cr}\%)^N} \right] + IAT_i \quad \text{Ec. 7.32}$$

La rentabilidad de un sistema de hidroeficiencia, 'i', se va a medir en términos del beneficio que se obtiene por la implantación de dicho sistema.

El beneficio anual,  $BEN_{U,i}$ , de un determinado sistema de hidroeficiencia es la diferencia entre los ingresos netos actuales y los costes, de tal forma que:

$$BEN_{U,i} = VAN(INGRESO)_i - VAN(COSTE)_i \quad \text{Ec. 7.33}$$

Y se calcula restando las expresiones

$$BEN_{U,i} = \frac{IEA_i}{1 + if_n\%} \left[ \frac{(1 + i_{cr}\%)^N - 1}{i_{cr}\%(1 + i_{cr}\%)^N} \right] + IAT_i - CIV_i -$$

$$- \frac{(COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MP,i})}{1 + if_n\%} \left[ \frac{(1 + i_{crn}\%)^N - 1}{i_{crn}\%(1 + i_{crn}\%)^N} \right] - \frac{COM_{MC,i}}{1 + (ts_{il}\% + if_n\%)} \left[ \frac{(1 + i_{cr,il}\%)^N - 1}{i_{cr,il}\%(1 + i_{cr,il}\%)^N} \right]$$

Ec. 7.34

A partir de este valor del beneficio anual, obtenido para cada uno de los sistemas de hidroeficiencia que se analizan, se prioriza el sistema que mayor beneficio genere.

Para tener una garantía en la aplicación del análisis coste-beneficio se determina la tasa interna de retorno de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia. Teniendo en cuenta su definición, y particularizando al caso que se desarrolla:

$$\sum_{k=0}^N (IEA_i + IAT_i) \frac{1}{(1 + i_{TIR}\%)^k} = \sum_{k=0}^N (CIV_i + COM_{P1,i} + COM_{P2,i} + COM_{MP,i} + COM_{MC,i}) \frac{1}{(1 + i_{TIR}\%)^k} \quad \text{Ec. 7.35}$$

Donde:

- $IEA_i$  es el ingreso anual del sistema de hidroeficiencia 'i'
- $IAT_i$  es el ingreso atípico del sistema
- $CIV_i$  es el coste de inversión del sistema
- $COM_{P1,i}$  son los costes energéticos de operación del sistema
- $COM_{P2,i}$  son los costes de operación por fungibles del sistema
- $COM_{MP,i}$  son los costes de mantenimiento preventivo del sistema
- $COM_{MC,i}$  son los costes del mantenimiento correctivo del sistema
- TIR es la tasa interna de retorno, el objetivo a buscar
- N es el horizonte temporal del análisis económico, 30 años como se ha comentado.

Cada uno de estos ingresos y costes se produce en un instante determinado y diferente. Para determinar la tasa interna de retorno hay que operar iterativamente.

En este análisis no se tienen en cuenta los efectos de la inflación, ni el aumento de costes de mantenimiento, ni otros efectos asociados a la temporalidad. Sólo sirve como elemento de comparación de sistemas.

El sistema de hidroeficiencia que presente una mayor tasa interna de retorno se comporta mejor que los demás desde el punto de vista económico.

A la hora de decidir la selección del mejor sistema de hidroeficiencia se puede presentar dos situaciones:

- Si el resultado del análisis del Valor Actual Neto y de la Tasa Interna de Retorno apuntan al mismo sistema de hidroeficiencia, ese el sistema de hidroeficiencia elegido, puesto que es el que se comporta mejor que los demás
- Si el resultado del análisis del VAN y el TIR apuntan a dos sistemas de hidroeficiencia diferentes, entonces se desarrolla un análisis económico utilizando

el periodo de retorno de la inversión como variable de decisión, entre los dos sistemas candidatos. Aquel sistema que presente un menor periodo de retorno será el sistema de hidroeficiencia elegido.

Con las limitaciones planteadas, aplicando el método del coste-beneficio se selecciona un sistema de hidroeficiencia que tiene un muy buen comportamiento desde el punto de vista económico. Para una instalación, en la que el criterio de productividad o rentabilidad es el dominante, el método es suficientemente válido.

Sin embargo, hay algunos otros aspectos que no se tienen en cuenta, por lo que se hace necesario realizar un estudio más detallado que sí tenga en cuenta el resto de aspectos.

### 3. SELECCIÓN MULTICRITERIO DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA

---

Aunque la rentabilidad económica de la implantación de un sistema de hidroeficiencia pueda ser muy importante, no es el único criterio que puede ser tenido en cuenta a la hora de seleccionarlo.

En la propia caracterización de los sistemas de hidroeficiencia se han establecido, analizado y cuantificado otros aspectos también importantes, o no. Aspectos que tienen que ver con el impacto ambiental del sistema, con su impacto social, o incluso con su apariencia estética.

Los usos que se le dan en los edificios en los que se implantan este tipo de sistemas son muy variados. Desde el uso residencial, el comercial, el administrativo, o el industrial, la variabilidad de formas y usos de la demanda de agua, fría o caliente, es muy amplia. No es lo mismo el tipo de aparatos, el patrón de demandas, o las temperaturas de utilización, en los aparatos de la instalación interior de suministro de agua en un edificio de oficinas, que en la de un gimnasio.

No es tampoco igual la importancia que se le debe dar a cada uno de los criterios de selección. No en todos los edificios los aspectos estéticos tiene porque tener la misma importancia que los aspectos del ahorro energético. De ahí la necesidad de establecer una ponderación sobre cada uno de los criterios, que varía con cada instalación.

El mejor sistema de hidroeficiencia para equipar un determinado edificio es aquel cuya valoración global, suma de las valoraciones ponderadas de cada uno de los criterios, sea la mayor de los sistemas analizados.

Existe una dificultad para establecer una acertada ponderación entre los diferentes criterios, sobre todo si éstos dependen de la tipología del edificio.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se indican algunos valores de ponderación para los criterios de selección expuestos en el capítulo anterior (López-Patiño et al., 2012). Estos valores están tomados del análisis de diferentes tipologías edificatorias, pero no tienen por qué ser válidos para cualquier implantación.

En la Figura 7.4 se presenta un esquema del procedimiento de selección del sistema de hidroeficiencia más adecuado para equipar un edificio.

El procedimiento comienza por la preselección de una serie de sistemas y dispositivos más adecuados al edificio en cuestión. Para realizar la preselección se utilizan el análisis de cada sistema de hidroeficiencia realizado en el capítulo 3 de éste trabajo.

Establecidos los diferentes sistemas de hidroeficiencia candidatos, denominados 'alternativas' en el proceso de selección, se procede a su dimensionado para el edificio en cuestión.

Para los dispositivos de hidroeficiencia, el dimensionado consiste en establecer el tamaño del dispositivo en cuestión, y su número.

Para los sistemas de tipo fuente alternativa, hay que definir el tamaño de los equipos: depósitos, conducciones, equipos de bombeo, etc.

En cualquiera de las situaciones, hay que localizar un equipo comercial que se ajuste a esas dimensiones. Elegidos los equipos comerciales, se procede a caracterizarlos, con cada uno de los criterios indicados en el capítulo 6 de este trabajo. La información necesaria para caracterizarlos se obtiene de sus especificaciones técnicas y/o de su tarifa.

En este momento se está en disposición de calcular la valoración global de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia, aplicando la valoración ponderada de cada uno de los criterios.

Tabla 7.1. Factores de ponderación propuestos para cada criterio de selección  
(López-Patiño et al., 2012)

EDIFICIO	FACTORES DE PONDERACIÓN				
	F <sub>WS</sub>	F <sub>ES</sub>	F <sub>DIS</sub>	F <sub>ISA</sub>	F <sub>E</sub>
Residencial privada multifamiliar	22	22	16	16	24
Residencial privada unifamiliar	18	18	24	16	24
Hotel 4-5*	18	18	24	8	32
Hotel 2-3*	18	18	16	8	40
Residencial público	18	18	16	8	40
Comercial	18	18	16	8	40
Restauración	18	18	16	8	40
Gimnasio/ Spa	26	26	8	8	32
Cine	18	18	16	8	40
Teatro	18	18	24	8	32
Museo / biblioteca	18	18	24	16	24
Hospital	26	26	8	16	24
Centro de salud /Consultas	22	22	8	16	32
Administrativo privado	26	26	8	8	32
Administrativo público	22	22	8	24	24
Colegio	22	22	8	16	32
Instituto / Universidad	26	26	8	16	24
Estación transporte /aeropuerto	26	26	8	16	24
Industrial / Almacén	22	22	8	8	40

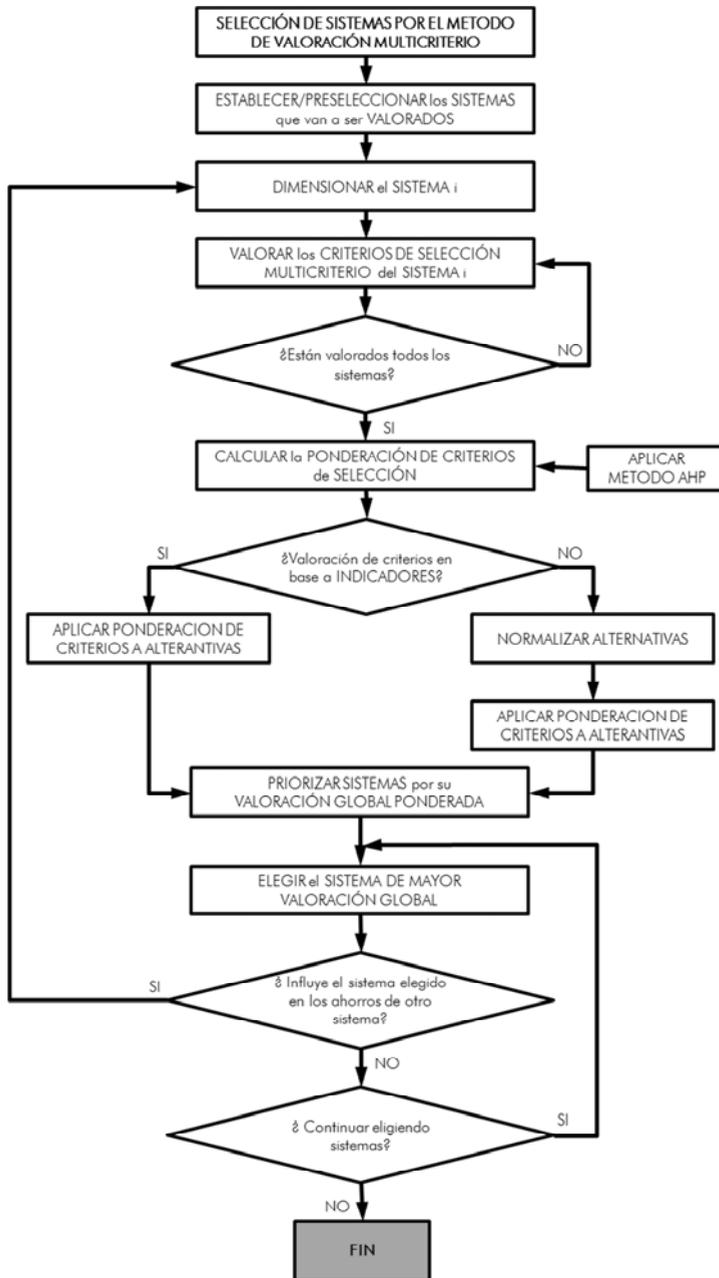


Figura 7.4. Diagrama del proceso de selección multicriterio

Cada criterio de selección tiene su correspondiente factor de ponderación. Se expresan en tanto por cien, siendo la suma de todos los factores de ponderación la misma para cualquiera que sea el edificio en cuestión.

Los factores de ponderación definidos son:

- Factor de ahorro de agua,  $F_{WS}$ . Este factor pondera al criterio ahorro de agua. Toma más importancia para implantaciones en épocas de escasez de recursos y sequía, o en edificios donde no exista un suministro constante desde la red general de distribución.
- Factor de ahorro de energía,  $F_{ES}$ . Este factor pondera al criterio ahorro de energía. Tiene importancia en los edificios donde se demanda un gran volumen de agua caliente sanitaria.
- Factor de impacto socio-ambiental,  $F_{ISA}$ . Pondera el criterio de impacto socio-ambiental. Este factor tiene especial importancia en edificios de titularidad pública por el efecto ejemplarizante que debe transmitir a la sociedad.
- Factor de diseño,  $F_{DIS}$ . Pondera el criterio de diseño. Tiene mayor importancia en edificios en los que la imagen que se transmite de los mismos al usuario tiene cierta relevancia (edificios singulares, edificios emblemáticos,...)
- Factor económico,  $F_E$ . Este factor pondera el criterio viabilidad económica. Tiene más importancia en los edificios en los que se desarrolla una actividad productiva y las actuaciones se deciden en función de su rentabilidad económica: establecimientos comerciales, residencial público, industrias,...

A la hora de obtener la valoración global y aplicar los factores de ponderación de cada uno de los criterios, en el procedimiento de selección se distinguen dos situaciones. Una primera situación es cuando la valoración que se tiene en cuenta es en base a indicadores de valoración. Los indicadores ya están relativizados y toman valores entre 0 y 10. Cuanto mayor es el valor del indicador, mejor es el sistema de hidroeficiencia desde el punto de vista del criterio correspondiente a dicho indicador.

En tal caso, la valoración global del sistema de hidroeficiencia implantado sobre el aparato 'i' es la suma ponderada de cada uno de los indicadores:

$$V_i = \frac{1}{100} (F_{WS} \cdot WRS_i + F_{ES} \cdot ESR_i + F_{ISA} \cdot IMAR_i + F_{DIS} \cdot DISR_i + F_E \cdot PBR_i) \quad \text{Ec. 7.36}$$

Donde:

- $V_i$  es el indicador de valoración global del sistema de hidroeficiencia implantado en el aparato 'i'
- $F_{WS}$  es el factor de ponderación del criterio de ahorro de agua, en %.
- $WRS_i$  es el indicador de ahorro de agua del sistema de hidroeficiencia 'i'. Es un valor entre 0 y 10
- $F_{ES}$  es el factor de ponderación del criterio de ahorro de energía, en %
- $ESR_i$  es el indicador de ahorro de energía del sistema de hidroeficiencia 'i'. Toma valores entre -5 y 10.
- $F_{ISA}$  es factor de ponderación del criterio de impacto socio-ambiental, en %
- $IMAR_i$  es el indicador de impacto socio-ambiental del sistema de hidroeficiencia 'i'. Es un valor entre 0 y 10.
- $F_{DIS}$  es factor de ponderación del criterio diseño, en %
- $DISR_i$  es el indicador de diseño del sistema de hidroeficiencia 'i'. Es un valor entre 0 y 10.
- $F_E$  es factor de ponderación del criterio de viabilidad económica, en %
- $PBR_i$  es el indicador de viabilidad económica del sistema de hidroeficiencia 'i'. Es un valor entre 0 y 10.

Los valores negativos del indicador de ahorro de energía se pueden dar al implantar un sistema de tipo fuente alternativa que consume más energía para presurizar el agua recolectada, que la que ahorra con la reducción del consumo de agua.

El cálculo de los valores de los indicadores está definido en la caracterización del sistema de hidroeficiencia del capítulo anterior. La dificultad reside en la determinación de los factores de ponderación.

Una aproximación a los mismos es la recogida en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Pero para ser más rigurosos se va a aplicar un método de análisis multicriterio.

Son varias las metodologías de análisis multicriterio que se pueden aplicar (Ehrgot et al., 2005) en el desarrollo de proyectos. De entre todas ellas, la más aceptada y extendida es el método del proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 1980)

El método del AHP es un método relativamente simple, muy extendido, intuitivo, consolidado, y relativamente riguroso, pues dispone de mecanismos para comprobar la consistencia de las prioridades. Como la aplicación del método no es intuitiva, se va a detallar de manera específica en un apartado de este capítulo.

La otra situación de cálculo de la valoración global se produce cuando la valoración de cada uno de los criterios se ha realizado de forma absoluta o en base a índices. En este caso, los valores pueden ser muy dispares y, para evitar distorsiones en la ponderación será necesario normalizar los valores de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia, normalizar las alternativas.

Esta normalización se realiza como parte del propio método del AHP. La aplicación del método a esta situación proporciona directamente la valoración global de cada una de los sistemas de hidroeficiencia, considerados alternativas a efectos del AHP.

### **3.1. MÉTODO DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)**

---

El proceso analítico jerárquico, AHP, (Saaty, 1980) se basa en la capacidad innata de las personas para, en base a una cierta experiencia, establecer juicios y valoraciones comparadas entre dos elementos. El proceso permite una forma de valoración objetiva a partir de juicios subjetivos y ratios entre elementos.

Estos elementos son los diferentes criterios desde los cuales se valora la bondad de uno u otro sistema. Al establecer prioridades entre varios criterios se posibilita la toma de decisión multicriterio para la selección, en este caso de sistemas de hidroeficiencia.

Se ha optado por utilizar el método del AHP, en lugar del método de ANP, Analytical Network Process (Saaty y Vargas, 2006) porque es más sencillo de implantar y sus limitaciones, resueltas con el método del ANP, no son de aplicación al caso que se estudia en este trabajo.

El método del AHP trabaja con criterios y alternativas. Los criterios son cada uno de los aspectos que son tenidos en cuenta, con sus diferentes pesos, para la selección de un determinado elemento.

Para que el método se pueda aplicar, no debe existir dependencia entre criterios, o entre éstos y los subcriterios. Para este caso de estudio, no hay definidos subcriterios, y

no hay una dependencia entre los criterios, por cuanto los aspectos que se tienen en cuenta en cualquiera de ellos no tienen influencia directa en los demás.

Sí que habría dependencia directa entre los criterios de ahorro de agua y ahorro de energía, y el criterio de viabilidad económica si sólo se valorara en este último el ingreso anual debido al ahorro. Pero para cuantificar la viabilidad económica se tienen en cuenta muchos otros aspectos, como son los costes asociados al sistema, su inversión, su vida útil, etc., que no tienen relación con la cuantificación del ahorro.

Las alternativas son cada uno de los elementos seleccionables mediante la aplicación del método. En este caso, son cada uno de los sistemas de hidroeficiencia que se analizan para su selección.

Tabla 7.2. Escala fundamental de valoración del método AHP

Importancia	Definición	Observaciones
1	Igual de importante	Los dos elementos contribuyen con la misma importancia al objetivo
3	Moderadamente importante	La experiencia y los juicios se decantan ligeramente a favor de uno de los elementos sobre el otro
5	Fuertemente importante	La experiencia y los juicios se decantan fuertemente a favor de uno de los elementos sobre el otro
7	Muy fuerte o demostradamente importante	Un elemento fuertemente favorecido con respecto al otro para lograr el objetivo. Su dominio está demostrado en la práctica
9	Extremadamente importante	La evidencia que favorece un elemento sobre el otro es la máxima posible
Recíprocos	Si el elemento 'i' tiene una valoración distinta de 0 sobre 'j', entonces 'j' toma el valor inverso cuando se compara sobre 'i'	

El método considera la facilidad que tienen las personas para establecer preferencias entre dos elementos, en este caso entre dos criterios, de forma independiente a las alternativas sobre las que va a ser aplicado.

Estas preferencias entre criterios se establecen sobre una escala cualitativa, que después es llevada a un nivel cuantitativo. En la Tabla 7.2 se indica la escala de preferencias que un criterio tiene sobre otro. Esta escala puede ser matizada con valores intermedios (Aznar y Guijarro, 2012).

El usuario realiza esa preferencia por parejas entre todos los criterios planteados. Las preferencias se recogen en una matriz denominada matriz de comparación pareada.

Esta matriz tiene una dimensión  $N \times N$ , siendo 'N' el número de criterios a analizar. La diagonal de dicha matriz toma de valor 1. Para el caso que se estudia, la matriz de comparación pareada, de dimensión  $5 \times 5$ , es la que se indica a continuación:

$$W = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 7.37}$$

Donde  $w_{ij}$  es la preferencia del criterio  $i$  sobre el criterio  $j$ , con arreglo a la escala de la Tabla 7.2. La matriz de comparación pareada tiene algunas propiedades que debe verificar (Saaty, 2013):

- Positividad. Todos los valores de la matriz deben ser positivos.

$$w_{ij} \geq 0 \quad \text{Ec. 7.38}$$

- Reciprocidad. Implica que si  $w_{ij}$  es la preferencia de un criterio 'i' sobre el criterio 'j', entonces  $1/w_{ij}$  es la preferencia del criterio 'j' sobre el 'i'.

- Consistencia. Implica que si un criterio A tiene preferencia sobre un criterio B, y a su vez el criterio B tiene preferencia sobre el C, entonces el criterio A tiene preferencia sobre el C

$$w_{ij} > 1; w_{jk} > 1 \text{ entonces } w_{ik} > 1 \quad \text{Ec. 7.39}$$

Las dos primeras propiedades son fáciles de verificar, pero la tercera propiedad está sometida a la preferencia que haya manifestado el usuario, que podría no ser coherente con la propiedad de la matriz.

Para evitar errores de consistencia se establece un ratio de consistencia que debe verificarse. En general, para que la matriz de comparación pareada se considere consistente el ratio de consistencia (C.R.) debe ser inferior al 10%:

$$C.R. < 0,1 \quad \text{Ec. 7.40}$$

El ratio de consistencia es el cociente:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad \text{Ec. 7.41}$$

Donde: C.I. es el índice de consistencia; y R.I. es el índice aleatorio de consistencia.

El índice de consistencia, C.I., se calcula como la relación:

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad \text{Ec. 7.42}$$

Donde:  $\lambda_{\max}$  es el autovalor principal de la matriz de comparación pareada; y 'n' es la dimensión de dicha matriz cuadrada.

El índice aleatorio de consistencia, R.I., es un promedio de los índices de consistencia. Su valor está tabulado (Forman, 1990). Depende de la dimensión de la matriz y para una matriz de 5x5 toma por valor R.I. = 1,12.

En caso que la condición de consistencia no se cumpla, hay que modificar las preferencias que correspondan en la matriz de comparación pareada hasta que se verifique.

Una vez la matriz es consistente, se determina el vector de autovalores, autovector, o Eigen vector, según la denominación de la matriz de comparación pareada.

El autovector de la matriz de comparación pareada es el vector de prioridades de cada uno de los criterios. Indica el peso que tiene cada uno de los criterios en comparación con los demás.

Para calcularlo, hay que tener en cuenta que el autovector es el que cumple la condición:

$$\det[W - \lambda I] = 0 \quad \text{Ec. 7.43}$$

donde: W es la matriz de comparación pareada;  $\lambda$  es el autovector; I es la matriz identidad; y 'det' es el determinante de la matriz de cálculo.

El autovector será una matriz de dimensión 5x1 cuyos valores se corresponden con los pesos, en tanto, por uno, de cada uno de los criterios de selección que se están trabajando.

$$\lambda = \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 7.44}$$

Definidos los pesos de cada uno de los criterios, hay que aplicarlos sobre cada una de las alternativas.

El método del AHP está pensado para poder ser aplicado sobre alternativas que se pueden cuantificar o que no son cuantificables.

En éste último caso, hay que establecer, para cada criterio, una matriz de comparación pareada entre alternativas estableciendo las preferencias de cada alternativa sobre las demás teniendo en cuenta sólo los aspectos que tienen que ver con el criterio. Esto hay que hacerlo para cada criterio, de tal forma que se montan tantas matrices de comparación pareada de alternativas como criterios haya.

Esto no es el caso que se está trabajando por cuanto todos los criterios de selección definidos se han hecho cuantitativos.

En tal caso, hay que montar una única matriz de valoración de alternativas, con los resultados de la caracterización obtenida, para cada uno de los criterios, siguiendo las indicaciones del capítulo anterior.

$$A = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 7.45}$$

Donde:  $a_{11}$  es la valoración de la alternativa 1 según el criterio 1;  $a_{12}$  es la valoración de la alternativa 1 según el criterio 2, y así sucesivamente. 'n' es el número de alternativas, que no tiene por qué coincidir con el de criterios.

La matriz de valoración de alternativas tiene una dimensión  $n \times N$ , donde 'n' es el número de alternativas, y 'N' es el número de criterios, 5 para el caso que se desarrolla.

La valoración global de las alternativas es el producto de la matriz de valoración de alternativas por el autovector de la matriz de comparación pareada de los criterios:

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ V_n \end{Bmatrix} = [A][\lambda] \quad \text{Ec. 7.46}$$

Donde:  $V_1$  es la valoración global de la alternativa 1;  $V_n$  es la valoración global de la alternativa 'n'.

### 3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP A LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA

---

El método del AHP es de aplicación en múltiples áreas (Vaidya y Kumar, 2006), si bien no se conocen aplicaciones en la selección de dispositivos de ahorro de agua.

Lo que se va a hacer a continuación es aplicar el método general a la priorización de sistemas de hidroeficiencia teniendo en cuenta los criterios de selección definidos en el capítulo anterior.

Los diferentes criterios de selección definidos se van a denominar:

- Criterio de ahorro de agua: CWS
- Criterio de ahorro de energía: CES
- Criterio de impacto socio-ambiental: CIMA
- Criterio de diseño: CDIS
- Criterio de viabilidad económica: CVE

Teniendo en cuenta estas denominaciones, la matriz de comparación pareada entre estos criterios es la presentada en la Tabla 7.3.

Para completarla sólo es necesario establecer  $\frac{n(n-1)}{2}$  comparaciones puesto que por la propiedad de reciprocidad el resto de comparaciones están definidas.

¿Quién debe establecer las preferencias entre criterios? Para que la matriz de comparación pareada sea consistente, debe ser completada por un experto en la disciplina que se está trabajando. Incluso es recomendable que participen varios expertos (Aznar y Guijarro, 2012).

El proceso de selección no se puede dilatar como consecuencia de la aportación de los 'expertos'. La recomendación es que a la hora de definir la matriz de comparación pareada en la implantación de sistemas de hidroeficiencia en edificios participe el promotor o gestor del edificio y el técnico que realiza la selección de sistemas. El gestor del edificio conoce las premisas sobre las que está concebido el mismo. Si se basa en un concepto más productivo, o pragmático, o ambiental. El técnico tiene experiencia en el desarrollo de esta técnica con edificios similares.

Tabla 7.3. Matriz de comparación pareada para criterios de selección de sistemas de hidroeficiencia

	$C_{WS}$	$C_{ES}$	$C_{IMA}$	$C_{DIS}$	$C_{VE}$
$C_{WS}$	1				
$C_{ES}$		1			
$C_{IMA}$			1		
$C_{DIS}$				1	
$C_{VE}$					1

No obstante, para tener una referencia, se presenta un análisis de diferentes aspectos que deben ser tenidos en cuenta, para diferentes tipologías de edificios, a la hora de establecer las preferencias entre los criterios de selección.

El criterio de ahorro de recursos naturales y energéticos tiene una importancia directa cuando no se dispone de los recursos en cantidad suficiente. En zonas sometidas a frecuentes periodos de sequía la valoración de este criterio debe tomar mayor importancia. Si se reducen los aportes de agua, debidos a una sequía, se deberá ahorrar agua para compensar la situación. El objetivo de ahorro está claramente marcado.

En el caso más general en el que habiendo disponibilidad de recursos, lo que se pretende es gestionarlos de manera más eficiente, la valoración del criterio es muy subjetiva. Depende de la concienciación y educación de los usuarios hacia el uso racional de los recursos.

Atendiendo a la tipología de edificio, los de titularidad pública, por el papel ejemplarizante de la administración frente ante la sociedad, deberían tener una valoración del criterio de ahorro muy elevada.

De entre los edificios de titularidad privada, los residenciales deben tener una valoración entre normal a elevada. Por el contrario los edificios en los que se desarrolla una actividad productiva tienen una valoración del factor de ahorro normal.

El criterio de impacto en la sociedad y el medio ambiente se valora de forma indirecta. Tiene que tener más importancia en los edificios de mayor consumo por cuanto que la influencia que tiene en el conjunto de la sociedad es mayor cuantos más recursos se consumen.

También tienen una importancia mayor en los edificios de titularidad pública por cuanto que es el conjunto de la sociedad el que financia, con sus impuestos, la construcción de ese tipo de edificios, y es el conjunto de la sociedad el que debe obtener un beneficio de ello.

En los edificios de tipo privado la valoración del impacto en la sociedad de las medidas es relativamente baja, por cuanto el promotor o el propietario prioriza su beneficio individual frente al beneficio colectivo. Para potenciar la consecución de un beneficio colectivo de la implantación privada de medidas de ahorro se deben aumentar las exigencias legislativas y reglamentarias obligatorias de este tipo de medidas.

El criterio de diseño está muy relacionado con la idoneidad del producto a la instalación que se presenta. Al contrario que con los casos anteriores, será en los edificios de propiedad privada donde se le preste mayor atención a este aspecto por el valor añadido que se busca al incorporar productos con un cierto nivel de diseño.

A nadie escapa que elevados niveles de diseño en los productos están relacionados con un estatus social y económico elevado del público al que va dirigido. Se busca en el producto de diseño un carácter diferenciador. En los edificios de titularidad pública, en general, éste rol diferenciador y de distinción no existe, por lo que prima sólo la funcionalidad frente a otros aspectos del diseño.

Así, en edificios privados con actividad económica dirigida a un estrato social elevado (hoteles de cuatro y cinco estrellas, sector de la restauración, ocio de alto standing, etc.) tendrán una ponderación elevada a los aspectos de diseño de los sistemas de ahorro..

En un edificio de titularidad pública la valoración de los aspectos de diseño será baja. Eso no quiere decir que los dispositivos que se utilicen no sean duraderos, o no funcionales, sino que no se valoran los aspectos estéticos de los dispositivos, lo que les resta peso.

En edificios privados de tipo residencial, la ponderación de los aspectos estéticos dependerá del destinatario de la vivienda. En viviendas de renta libre los aspectos de diseño se ponderan de forma normal, mientras que las viviendas de protección pública se ponderan a la baja.

El criterio de viabilidad económica es el de más directa cuantificación. Para los edificios que albergan una actividad productiva privada, la propia naturaleza de la actividad

que se desarrolla hace que se busque la rentabilidad de las inversiones que se acometen. Esto significa que el peso que tienen los aspectos económicos de los sistemas de ahorro de agua es muy elevado en el cómputo global. Dentro de esta tipología de edificios entran los comercios y centros comerciales, hoteles, cines, almacenes, industrias, restaurantes, centros deportivos, etc.

En los edificios de promoción o propiedad privada, el efecto es similar aunque menos acusado. El propietario más que buscar el rendimiento económico individual intenta evitar costear de forma individual el beneficio colectivo. Como no busca la rentabilidad económica de la inversión, los aspectos puramente económicos se pueden compensar con otros, de ahí que el peso de la categoría económica sea importante, pero no definitivo. En una escala de baja a muy elevada, se puede considerar elevado.

En los edificios de titularidad pública tampoco se busca una rentabilidad económica de la inversión. Dado el papel ejemplarizante que se le puede exigir a la administración, no deberían tener un peso importante los aspectos económicos de los sistemas. Sin embargo, la administración debe velar por los intereses de los ciudadanos y no debe malgastar los fondos públicos por lo que tampoco se puede no tener en cuenta. La valoración de la categoría económica en este tipo de edificios debe ser normal.

Volviendo al proceso del AHP, definida la matriz de comparación pareada se comprueba la condición de consistencia. En caso que no se verifique hay que modificar adecuadamente las preferencias entre algún/os criterios a fin de lograr la consistencia. En la literatura es posible encontrar métodos a seguir (Gonzalez-Pachón y Romero, 2004).

Si la consistencia está dentro de los límites admisibles, se determina el autovector de la matriz de comparación pareada. De esta manera, se consiguen definir las preferencias globales entre todos los criterios de selección. Estas preferencias se corresponden con los factores de ponderación necesarios para determinar la valoración global de cada sistema de hidroeficiencia. Si los criterios se han colocado en el orden señalado en la Tabla 7.3, los factores de ponderación son:

$$\begin{pmatrix} F_{WS} \\ F_{ES} \\ F_{IMA} \\ F_{DIS} \\ F_E \end{pmatrix} = 100 \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 7.47}$$

Donde:

- $F_{WS}$  es el factor de ponderación del criterio de ahorro de agua, en %.

- $F_{ES}$  es el factor de ponderación del criterio de ahorro de energía, en %
- $F_{ISA}$  es factor de ponderación del criterio de impacto socio-ambiental, en %
- $F_{DIS}$  es factor de ponderación del criterio de diseño, en %
- $F_E$  es factor de ponderación del criterio de viabilidad económica, en %

Para calcular la valoración global hay que tener en cuenta el tipo de valoración que se ha considerado a la hora de caracterizar cada uno de los sistemas de hidroeficiencia: si la valoración se ha realizado en base a indicadores, o en términos absolutos o índices.

Si la caracterización de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia, alternativas, que se ha realizado ha sido en términos de indicadores, entonces la valoración global de un determinado sistema es:

$$V_i = \frac{1}{100} (F_{WS} \cdot WRS_i + F_{ES} \cdot ESR_i + F_{ISA} \cdot IMAR_i + F_{DIS} \cdot DISR_i + F_E \cdot PBR_i) \quad \text{Ec. 7.48}$$

Donde:

- $V_i$  es el indicador de valoración global del sistema de hidroeficiencia implantado en el aparato 'i', es un valor entre 0 y 10.
- $WRS_i$  es el indicador de ahorro de agua del sistema de hidroeficiencia 'i'.
- $ESR_i$  es el indicador de ahorro de energía del sistema de hidroeficiencia 'i'.
- $IMAR_i$  es el indicador de impacto socio-ambiental del sistema de hidroeficiencia 'i'.
- $DISR_i$  es el indicador de diseño del sistema de hidroeficiencia 'i'.
- $PBR_i$  es el indicador de viabilidad económica del sistema de hidroeficiencia 'i'.

La valoración global toma valores entre 0 y 10. Cuanto más alta es la valoración global de un sistema de hidroeficiencia, mejor es en comparación con los demás.

Una vez valorados todos los sistemas de hidroeficiencia de esta manera se continúa con el proceso de selección.

Sin embargo, si la caracterización de los sistemas de hidroeficiencia se ha realizado en base a índices o valoraciones absolutas de cada criterio, los valores que resultan de dicha caracterización son muy dispares y es necesario normalizarlos.

La normalización de alternativas está contemplada dentro del método analítico jerárquico. La normalización es posible porque la valoración de todas las alternativas es cuantitativa. Si bien hay una cuestión a resolver por cuanto el criterio de ahorro de energía puede tomar valores negativos, lo que no está contemplado en el método clásico del AHP.

Para normalizar la valoración de cada alternativa hay dos modos de proceder (Saaty, 2013): El modelo distributivo, y el modelo ideal.

El modelo distributivo modifica la valoración de cada alternativa para un criterio determinado dividiendo su valor por la suma de los valores de todas las alternativas según el criterio:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad \text{Ec. 7.49}$$

Donde:

- $a_{ij}$ , es la valoración de la alternativa 'i' según el criterio 'j'; y
- $n$ , es el número de alternativas

En el modelo distributivo se debe cumplir que  $\sum_{i=1}^n a_{ij}^* = 1$ .

El modelo ideal modifica la valoración de cada alternativa para un determinado criterio dividiéndola por la valoración máxima de las alternativas de ese mismo criterio.

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\max(a_{ij}|_{i=1}^n)} \quad \text{Ec. 7.50}$$

La aplicación del modelo ideal proporciona valoraciones entre 0 y 1, pero no se cumple la regla que la suma de las valoraciones de todas las alternativas, para un determinado criterio, sea igual a 1.

Hay unas consideraciones a realizar con respecto a los criterios de ahorro de energía y de viabilidad económica.

Cuando el criterio de ahorro de energía se valora en base a indicadores, éstos pueden tomar, para una determinada alternativa/sistema, valores negativos, mientras que para otras alternativas el valor es positivo. En esta situación sucede que al ponderar el indicador con el peso del criterio de ahorro de energía, para las alternativas con indicador negativo, la valoración global se reducirá, como es de esperar.

Si la valoración del criterio de ahorro de energía se realiza en base al valor absoluto de ahorro, éste puede resultar igualmente negativo en unas alternativas y positivo en otras. Si se realiza una normalización siguiendo el método clásico del AHP, se llega a resultados incongruentes.

Para normalizar la valoración de las alternativas se pueden aplicar varios métodos. Si la normalización se hace siguiendo un modelo ideal, se puede aplicar el método Bipolar AHP (Millet y Schoner, 2005), o la metodología de la puntuación basada en reglas

(Othman et al., 2010). Si la normalización se hace siguiendo un modelo distributivo, se puede aplicar la metodología de la puntuación basada en reglas de Othman.

La metodología de Othman es más sencilla por cuanto el método Bipolar AHP requiere de la utilización de software para su cálculo.

Siguiendo la metodología basada en reglas, si la normalización se hace siguiendo el modelo ideal, el caso que se plantea al valorar el criterio de ahorro de energía es el que contempla las categorías 1, 2 del método. En ellas la opción con mayor valoración es la más deseable pero el rango de las valoraciones puede ser negativo o positivo. Si la valoración de la alternativa 'i' frente al criterio 'j' es positiva, su valor normalizado es:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\max(a_{ij}|_{i=1}^n)} \quad \text{Ec. 7.51}$$

Si la valoración de la alternativa 'i' frente al criterio 'j' es negativa, entonces su valor normalizado es:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\min(a_{ij}|_{i=1}^n)} (-1) \quad \text{Ec. 7.52}$$

Para el caso de una normalización según el modelo distributivo, se aplica la regla 3 del método:

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}|_{\text{positivas}} - \sum_{i=1}^n a_{ij}|_{\text{negativas}}} \quad \text{Ec. 7.53}$$

Por cuanto que la regla en que  $\sum_{i=1}^n a_{ij}^* = 1$ , ya no se verifica.

El otro criterio en consideración es el de viabilidad económica cuando se valora en base a valores absolutos y no en base a indicadores. Es una situación en la que una menor valoración es más deseable, que se enfrenta al resto de criterios, en los que el mayor valor es más deseable. Por tanto distorsiona la valoración global, en la que un mayor valor significa que el sistema de hidroeficiencia es mejor.

En ese caso, se va a hacer una doble normalización. Se realiza una primera normalización, siguiendo el modelo distributivo o el ideal, como se ha indicado anteriormente. Se obtiene, para cada alternativa, unos valores normalizados  $a_{ij}^*$ , puesto que el criterio de viabilidad económica es el de orden cinco.

Una vez normalizada la valoración de cada alternativa para este criterio, cada una de las valoraciones toma un valor entre 0 y 1. Cuanto más cercana a cero es la valoración de una alternativa mejor es.

Se hace una segunda normalización siguiendo la expresión:

$$a_{i5}^{**} = 1 - a_{i5}^* \quad \text{Ec. 7.54}$$

Donde  $a_{i5}^{**}$  es la valoración corregida del sistema de hidroeficiencia 'i' frente al criterio de viabilidad económica, que toma valores entre 0 y 1, de tal forma que cuanto mayor es el valor, mejor se comporta el sistema de hidroeficiencia desde el punto de vista económico.

La elección de uno u otro método de normalización depende del objetivo que se busca con la aplicación del método del AHP (Millet y Saaty, 2000).

En general, el modelo distributivo se utiliza cuando la decisión se focaliza en determinar cuánto mejor es una alternativa con respecto a las demás. De ahí que Millet, y a partir de él otros más, denominen a éste modelo de 'dominio', en lugar de distributivo.

El modelo ideal se utiliza cuando la decisión se focaliza en determinar cuánto mejor es una alternativa en comparación con un marcado fijo, sin tener en cuenta las demás. Millet denomina a este modelo de 'comportamiento'.

Como en el caso que se estudia, lo que se pretende es elegir una alternativa, un sistema de hidroeficiencia, que sea mejor que los demás para la implantación que se va a desarrollar, sin importar si es mucho mejor o sólo un poco mejor, el modelo elegido para normalizar valores es el distribuido o de dominio.

Eso no quita para que no se pueda aplicar el modelo ideal, pero no aporta más de lo que lo hace el distribuido.

Se dispone ahora de una matriz de valoración de alternativas normalizada, en la que cada uno de los elementos de la matriz toma un valor entre 0 y 1.

$$A^* = \begin{Bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{13}^* & a_{14}^* & a_{15}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* & a_{23}^* & a_{24}^* & a_{25}^* \\ \vdots & & \vdots & & \\ a_{n1}^* & a_{n2}^* & a_{n3}^* & a_{n4}^* & a_{n5}^* \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 7.55}$$

Definido el autovector de la matriz de comparación pareada de criterios, y la matriz de valoración de alternativas para cada criterio, el vector de valoración global de cada alternativa se obtiene por el producto de ambos.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{13}^* & a_{14}^* & a_{15}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* & a_{23}^* & a_{24}^* & a_{25}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^* & a_{n2}^* & a_{n3}^* & a_{n4}^* & a_{n5}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{WS} \\ F_{ES} \\ F_{IMA} \\ F_{DIS} \\ F_E \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 7.56}$$

Donde,  $V_1$  es la valoración global del sistema de hidroeficiencia 1, y  $V_n$  es la valoración global del sistema de hidroeficiencia 'n'.

La valoración global toma valores entre 0 y 10. Cuando mayor es la valoración global de un sistema de hidroeficiencia, mejor se comporta con respecto a los demás.

#### 4. SELECCIÓN DE SISTEMAS DE HIDROEFICIENCIA

La aplicación del método del AHP proporciona una valoración global multicriterio de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia que se analizan. El sistema con mayor valoración global será el que mejor comportamiento tiene, teniendo en cuenta todos los aspectos de selección.

Sin embargo, la implantación de sistemas de hidroeficiencia en un edificio no tiene por qué limitarse al que mejor comportamiento global tiene.

Siguiendo con el procedimiento de selección indicado en la Figura 7.4, una vez valorados todos los sistemas de hidroeficiencia, éstos deben ser ordenados según su valoración de mayor a menor, en lo que se denomina el proceso de priorización de alternativas.

Se decide implantar el sistema de hidroeficiencia con mayor valoración. En este punto pueden suceder dos cosas: se quiera seguir seleccionando sistemas, o se dé por finalizada la selección.

La decisión de continuar con la selección depende de factores que no tienen que ver directamente con el procedimiento de selección. Los factores que condicionan la continuidad en la implantación de sistemas son:

- Objetivo de ahorro del recurso planteado. Si la decisión de implantar un sistema de hidroeficiencia viene condicionada por un objetivo determinado de ahorro de agua y/o energía. Se pueden implantar sistemas hasta que el ahorro obtenido supere al objetivo fijado.
- Disponibilidad financiera. Si se cuenta con recursos económicos suficientes se pueden seguir implantando sistema de hidroeficiencia hasta que se agoten.

- Rentabilidad de la inversión. Mientras que la rentabilidad del sistema de hidroeficiencia justifique la inversión, incluidos los costes financieros si los hubiera, se continuarán implantando sistemas de hidroeficiencia, pues resulta rentable.
- Exigencia legislativa. Si es la reglamentación o legislación que le es de aplicación al edificio la que ha motivado la implantación de sistemas de hidroeficiencia, se tendrán que instalar tantos como exija ésta, hasta que éste sea verificada. Hay situaciones en que la reglamentación obliga a la implantación de un determinado sistema de hidroeficiencia, en cuyo caso un procedimiento de selección no tiene sentido. Sin embargo, en la mayor parte de situaciones la reglamentación es suficientemente abierta, y ambigua, como poder elegir los sistemas a implantar, hasta cumplir con la regla.

En cualquier caso, la implantación de un nuevo sistema de hidroeficiencia no es tan simple como elegir el segundo de la lista, o sí.

Hay muchas situaciones en las que el ahorro que se consigue al implantar un sistema de hidroeficiencia influye en el comportamiento del resto de sistemas. A modo de ejemplo. Si el sistema a implantar en un reductor de caudal de ducha, el volumen de agua usada que se genera se reduce, con lo cual influye en la caracterización que se había realizado del sistema de reutilización de aguas grises, que verá reducida sus aportaciones.

Es por ello que, llegados a este punto hay que plantear ¿la implantación de un sistema de hidroeficiencia tiene influencia en el resto de sistemas? Si la respuesta es afirmativa, hay que volver a comenzar el proceso de selección volviendo a caracterizar los sistemas de hidroeficiencia restantes para determinar, con arreglo a las nuevas condiciones, cuál de entre los que restan es el mejor.

Este proceso se repite mientras se sigan implantando sistemas y éstos tengan influencia en los que restan.

Una vez se haya llegado a alguna de las limitaciones comentadas y se adopte la decisión de no implantar más sistemas de hidroeficiencia se dará por finalizado el proceso.

Es posible que se haya elegido un único sistema, pero se tiene la seguridad que el elegido es el que mejor se comporta, desde el punto de vista global, y teniendo en cuenta los múltiples criterios de selección.

## 5. CASOS DE APLICACIÓN

---

Para verificar la bondad de la metodología desarrollada y, además, poder extraer algunos resultados con los que poder extraer conclusiones sobre la idoneidad de los sistemas de hidroeficiencia para algunas tipologías de edificios, se van a simular algunos casos prácticos.

Para ello se va a aplicar la metodología a diferentes edificios de 3 tipologías de edificación: vivienda unifamiliar aislada, vivienda multifamiliar, y un hotel.

Para cada una de las tipologías se van a considerar varios casos. En primer lugar se van a considerar dos emplazamientos distintos. Los emplazamientos influyen de diferentes formas. En primer lugar, según el emplazamiento, la entidad que distribuye el agua desde la red general es distinta y las tarifas de abastecimiento y saneamiento, por tanto, también. Para esta aplicación se han elegido emplazamientos en las ciudades de Guadalajara y Murcia. La ciudad de Guadalajara presenta las tarifas de abastecimiento y saneamiento más económicas de entre las capitales de provincia españolas (AEAS, 2013). Por el contrario, la ciudad de Murcia presenta la tarifa de abastecimiento y saneamiento más cara.

Además de la tarifa, el emplazamiento presenta variaciones en la pluviometría, lo que afecta a los sistemas de aprovechamiento de lluvia, sobre todo a las dimensiones del depósito de almacenamiento.

Además del distinto emplazamiento, también se ha considerado una diferente fuente de energía térmica. Así, para cada edificio, se han planteado que pueda estar suministrado de energía térmica mediante gas natural, mediante propano, o mediante gasóleo. Las diferentes tarifas del combustible hacen que los ingresos por ahorro de energía sean distintos en cada uno de los casos.

Por último, se han considerado diferentes topologías en los edificios en altura. Así, para el edificio de viviendas multifamiliar se han considerado 4 configuraciones:

- edificio de 2 alturas, más planta baja, con 4 viviendas por planta;
- edificio de 4 alturas, más planta baja, con 2 viviendas por planta
- edificio de 5 alturas, más planta baja, con 4 viviendas por planta
- edificio de 10 alturas, más planta baja, con 2 viviendas por planta

Con estas morfologías se pretende cubrir un cierto abanico de posibilidades. Los edificios de 2 y 4 alturas disponen del mismo número de viviendas. Éstos se pueden alimentar directamente con la presión de red y no requieren de un grupo de bombeo adicional, con lo que el ahorro de energía por reducción de la demanda de agua será

menor. La configuración de 2 o 4 viviendas por planta afecta a la superficie de cubierta que puede recoger agua en el sistema de aprovechamiento de aguas pluviales.

Los edificios de 5 y 10 alturas ya requieren de un grupo de bombeo adicional, o varios, por lo que el ahorro de energía es mayor que para los casos en los que no hay grupo de bombeo. Igualmente disponen del mismo número de viviendas pero difieren en la superficie de captación de aguas pluviales.

El tipo de vivienda de la tipología unifamiliar y la tipología multifamiliar se ha considerado igual, si bien para el unifamiliar, al disponer de jardín, hay que considerar la demanda de riego que no existe para la tipología multifamiliar.

Se trata de una vivienda de 144 m<sup>2</sup> construidos, 120 m<sup>2</sup> útiles, equipada con dos baños completos: bañera/ducha, inodoro, bidé, lavabo (si bien uno de los baños dispone de un lavabo con dos senos). Dispone de cocina con fregadero, lavadora y lavavajillas. La ocupación de la vivienda se ha supuesto en 5 personas.

Para la tipología de hotel, se han considerado tres morfologías distintas:

- edificio de 2 plantas, más planta baja, y 100 habitaciones por planta
- edificio de 5 alturas, más planta baja, y 40 habitaciones por planta
- edificio de 10 alturas, más planta baja, y 20 habitaciones por planta
- edificio de 2 plantas, más planta baja, y 10 habitaciones por planta

La diferencia en la morfología de las tres primeras alternativas afecta a la necesidad, o no, de grupo de bombeo, y a la superficie de captación de aguas pluviales.

La última opción, con un menor número de habitaciones, permite analizar la influencia del tamaño del sistema de reutilización de aguas grises.

Cada una de las habitaciones dispone de 30 m<sup>2</sup> de superficie, que se mayoran en un 20% para considerar los espacios comunes (pasillos, escaleras, etc.). Dentro de ese espacio se ubica un baño completo: bañera/ducha, inodoro, lavabo, y bidé.

La relación de casos analizados se presenta en las tablas 7.4 y 7.5.

Tabla 7.4. Relación de casos para edificios de viviendas

Emplazamiento	Edificación	Combustible		
		Gas natural	Propano	Gasóleo-C
Guadalajara	Unifamiliar	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Multifamiliar 2 alturas 4 viv/planta	Caso 4	Caso 5	Caso 6
	Multifamiliar 4 alturas 2 viv/planta	Caso 7	Caso 8	Caso 9
	Multifamiliar 5 alturas 4 viv/planta	Caso 10	Caso 11	Caso 12
	Multifamiliar 10 alturas 2 viv/planta	Caso 13	Caso 14	Caso 15
Murcia	Unifamiliar	Caso 16	Caso 17	Caso 18
	Multifamiliar 2 alturas 4 viv/planta	Caso 19	Caso 20	Caso 21
	Multifamiliar 4 alturas 2 viv/planta	Caso 22	Caso 23	Caso 24
	Multifamiliar 5 alturas 4 viv/planta	Caso 25	Caso 26	Caso 27
	Multifamiliar 10 alturas 2 viv/planta	Caso 28	Caso 29	Caso 30

Tabla 7.5. Relación de casos para la tipología hotel

Emplazamiento	Edificación	Combustible		
		Gas natural	Propano	Gasóleo-C
Guadalajara	2 alturas 100 hab/planta	Caso 31	Caso 32	Caso 33
	5 alturas 40 hab/planta	Caso 34	Caso 35	Caso 36
	10 alturas 20 hab/planta	Caso 37	Caso 38	Caso 39
	2 alturas 10 hab/planta	Caso 40	Caso 41	Caso 42
Murcia	2 alturas 100 hab/planta	Caso 43	Caso 44	Caso 45
	5 alturas 40 hab/planta	Caso 46	Caso 47	Caso 48
	10 alturas 20 hab/planta	Caso 49	Caso 50	Caso 51
	2 alturas 10 hab/planta	Caso 52	Caso 53	Caso 54

## 5.1. EDIFICIOS DE VIVIENDAS

Para el proceso de selección de los sistemas de hidroeficiencia que deben equipar los edificios de vivienda, tanto en su tipología unifamiliar como multifamiliar, se aplica el método de selección multicriterio utilizando los indicadores de selección.

Atendiendo al análisis previo de características del capítulo 2, se han pre-seleccionado algunos sistemas de hidroeficiencia que se consideran más adecuados para este tipo de edificación. Se han añadido los sistemas de tipo fuente alternativa, para extraer conclusiones a posteriori. Los sistemas pre-seleccionados son:

- Aireador-perlizador de lavabo para un caudal nominal de 5 l/min, con un coste de inversión de 9 €, que incluye los costes de instalación. Es un elemento que se

- instala en una grifería existente. La vida útil de éste dispositivo se ha estimado en 15 años y no requiere costes de operación ni mantenimiento (aunque requiere de una limpieza periódica, es una operación que puede realizar el propio usuario de la instalación)
- Aireador-perlizador de fregadero para un caudal nominal de 7 l/min, con un coste de inversión de 9 €, que incluye los costes de instalación. Es un elemento que se instala en una grifería existente. La vida útil de éste dispositivo se ha estimado en 15 años y no requiere costes de operación ni mantenimiento (aunque requiere de una limpieza periódica, es una operación que puede realizar el propio usuario de la instalación)
  - Reductor de caudal de ducha de 8 l/min de caudal nominal y con un coste de inversión de 12 €, instalación incluida. Es un elemento que se instala en una grifería existente. La vida útil del dispositivo es de 15 años y no requiere de costes de operación y mantenimiento.
  - Alcachofa de ducha de 9,5 l/min de caudal nominal, con un coste de inversión e instalación de 20 €. Es un elemento de tipo grifería con una vida útil de 15 años. No requiere de costes de operación ni de mantenimiento especializado.
  - Grifo de descarga de inodoro de doble pulsador. Para una descarga completa de 7 litros y un volumen de descarga parcial de 3 litros. Tiene un coste de inversión de 20 €, instalación incluida. Se trata de un dispositivo grifo que se instala en el interior de la cisterna. Tiene una vida útil sin mantenimiento de 15 años (el fallo se produce en la junta elástica que sella la cisterna) y no requiere de costes de operación ni mantenimiento especializado.
  - Sistema de reutilización de aguas grises de tipo depurador mecánico, con dosificador de desinfectante, colorante indicador y sistema de bombeo, para abastecer a un edificio de 5 habitantes. El equipo tiene una vida útil de 30 años y requiere de costes de operación y mantenimiento. La operación consume energía de bombeo del agua de reutilización, así como desinfectante y colorante para el agua depurada. El mantenimiento consiste en la limpieza de filtros cada 2-3 meses. Tiene un coste de inversión de 1512 € + IVA, y no incluye la instalación, que por tratarse de un equipo compacto consiste en la conexión a conducciones existentes.
  - Sistema de reutilización de aguas grises de tipo biológico, con membranas de ultrafiltración MBR, aireador y filtro biológico, y desinfección posterior con rayos ultravioleta. Para una capacidad de depuración de 300 litros/día. Tiene un coste de inversión de 4952 € + IVA, instalación no incluida. Requiere de mantenimiento

especializado y produce unos costes de operación debidos al consumo del aireador, del bombeo de las aguas depuradas, así como la reposición de bacterias.

- Sistema de aprovechamiento de aguas pluviales. Para el emplazamiento en Guadalajara, el equipo es de las mismas características pero de un volumen de almacenamiento de 6000 litros, con un coste de 3123 € + IVA, a lo que hay que añadir los costes de instalación. Para el emplazamiento en Murcia, el equipo es un equipo compacto para un volumen de almacenamiento de 4500 litros, con un coste de inversión de 2773 € + IVA. Ambos sistemas están compuestos por filtros primarios de retención, depósito de almacenamiento, sistema de conmutación de flujo y sistema de bombeo. Requiere de mantenimiento especializado, limpieza una vez al año y costes de operación por bombeo de las aguas almacenadas.

Como resumen, en la Tabla 7.6, se indican los sistemas y características de los preseleccionados.

Tabla 7.6. Sistemas de hidroeficiencia analizados para su implantación en vivienda unifamiliar

	Sistema	Características	PVP	Nº equipos
1	Aireador lavabo	$Q_n = 5 \text{ l/min}$	9 €	3
2	Aireador fregadero	$Q_n = 7 \text{ l/min}$	9 €	1
3	Reductor caudal ducha	$Q_n = 8 \text{ l/min}$	12 €	2
4	Teleducha	$Q = 9,5 \text{ l/min}$	20,00 €	2
5	Grifo inodoro descarga parcial	Vol. descarga = 7 l. Vol. ½ desc, = 3 l.	25 €	2
6	Sistema reutilización aguas grises. Filtración	Capacidad = 5 habitantes	1829 €	1
7	Sistema reutilización aguas grises. MBR	Capacidad = 300 litros/día	5991 €	1
8a	SAP	Capacidad = 6000 l	3778 €	1
8b	SAP	Capacidad = 4500 l	3335 €	1

Para calcular los diversos parámetros de la valoración se ha considerado la demanda tipo indicada en la Tabla 7.7, obtenida de la propuesta en la tabla 2.13.

Con respecto a las tarifas por el servicio de abastecimiento desde la red general, en la Tabla 7.8 se indican las que se han considerado en cada uno de los casos. Se ha aplicado la tarifa por el servicio integral puesto que la tarifa de saneamiento se calcula a partir del consumo de agua de abastecimiento, luego también repercute.

Tabla 7.7. Demanda tipo en vivienda unifamiliar

Aparato	Demanda AF	Demanda ACS
Inodoro	39,6 l/pers/día	
Lavabo	2,0 l/pers/día	18 l/pers/día
Ducha	7,0 l/pers/día	63 l/pers/día
Baño	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Bidé	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Urinario	0,0 l/pers/día	
Vertedero	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Lavadora	6,8 l/pers/día	0 l/pers/día
Lavavajillas	2,9 l/pers/día	0 l/pers/día
Fregadero	0,4 l/pers/día	3 l/pers/día
Riego	5,0 l/pers/día	
DWD,T	148 l/pers/día	

Con respecto a la fuente energética, ésta afecta a los ingresos por ahorro de energía de calentamiento del agua caliente sanitaria. Las tarifas energéticas que se han considerado, para cada uno de los casos, son las indicadas en la Tabla 7.9

Aunque en cada caso varíen los ingresos, de uno u otro tipo, los indicadores económicos utilizados para la valoración multicriterio no tienen por qué variar en todos los sistemas, como de hecho sucede, por cuanto que éstos tienen unos valores límites.

Tabla 7.8. Tarifas (en €/m<sup>3</sup>) de ciclo integral del agua consideradas (AEAS, 2013)

Provincia	Ciclo integral (doméstico)
Guadalajara	0,79
Murcia	2,31

Tabla 7.9. Tarifa energética

PRECIO KWH TÉRMICO CON DIFERENTES COMBUSTIBLES					
	Butano	Propano	Gas natural	Gasóleo C	Electricidad
Tarifa (€/Mwh)					49,83 <sup>4)</sup>
Tarifa (€/l)				0,842 <sup>3)</sup>	
Tarifa (€/kWh)			0,0519 <sup>2)</sup>		
Tarifa (€/kg)	0,872 <sup>1)</sup>	0,872			
Coste (€/kWh térmico)*	0,050	0,049	0,052	0,082	
Coste (€/kWh)					0,0498
* suponiendo un rendimiento del productor igual al 100%					
** Precios no incluyen impuestos directos					
<sup>1)</sup> precios según BOE nº 167 (14/7/2015)					
<sup>2)</sup> Precio de la tarifa de último recurso según Resolución de 26.06.2015 publicada en BOE nº 156 (1/07/2015)					
<sup>3)</sup> Precio medio de mercado según Ministerio de Industria. <a href="http://geportalgasolineras.es/descargas.do?tipoBusqueda=0#">http://geportalgasolineras.es/descargas.do?tipoBusqueda=0#</a> [consulta: el 31 de julio de 2015]					
<sup>4)</sup> Precios medios ponderados mensuales del Mercado Diario en España (€/MWh). TARIFA 2.0. Año 2015. <a href="http://www.esios.ree.es/web-publica/">http://www.esios.ree.es/web-publica/</a> [consulta: el 31/8/2015]					

Con respecto a la valoración de cada uno de los criterios de selección mediante al método del AHP, se ha creado la matriz de comparación pareada de cada uno de los criterios. Comprobada la consistencia de la misma, y obtenidos los autovalores, los resultados son los indicados en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10. Matriz de comparación pareada de criterios de selección para viviendas

	AHORRO AGUA	AHORRO ENERGIA	DISEÑO	IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL	VIABILIDAD INVERSIÓN
AHORRO AGUA	1,00	1,00	5,00	7,00	0,33
AHORRO ENERGIA	1,00	1,00	5,00	7,00	0,33
DISEÑO	0,20	0,20	1,00	3,00	0,14
IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL	0,14	0,14	0,33	1,00	0,11
VIABILIDAD INVERSIÓN	3,00	3,00	7,00	9,00	1,00

A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los casos.

Tabla 7.11. Resultados de la valoración de sistemas de hidroeficiencia en una vivienda unifamiliar

Descripción	Valoración global					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 16	Caso 17	Caso 18
Aireador 5 l/min	0,75	0,58	1,94	2,58	2,57	3,04
Fregadero 7 l/min	4,05	4	4,4	4,58	4,56	4,71
Reductor ducha 8 l/min	<b>5,33</b>	<b>5,33</b>	<b>5,38</b>	<b>5,41</b>	<b>5,34</b>	<b>5,42</b>
Teleducha 9,5 l/min	3,43	3,35	3,92	4,19	2,43	4,38
Inodoro doble descarga	4,45	4,45	4,45	5,07	5,07	5,07
RAU AMN 230L	0,14	0,14	0,14	3,29	3,29	3,29
RAU (MBR) GREM 300	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
SAP REMOSA DRP	-0,44	-0,44	-0,44	-0,47	-0,47	-0,47

Se puede observar como el mejor sistema, en todos los casos, resulta ser el reductor de caudal de ducha de 8 l/min, seguido del inodoro de doble descarga. El mejor equipo se mantiene al no haber cambiado el patrón de demanda de un caso a otro. En el

momento en que, por motivo de aplicar cualquier medida activa de ahorro, se reduzca la frecuencia o la duración de la duchas, el mejor sistema sería el inodoro de doble descarga, o el aireador de fregadero.

Además, se pueden observar algunas otras situaciones. En general, la valoración de los casos 1a 3 son menores que las valoraciones de los casos 16 a 18. Esto es debido a que la tarifa es mucho más barata. Cuanto mayor es la tarifa, más se aprecian los ahorros económicos, y por tanto suben las valoraciones.

Hay equipos, como el aireador de lavabo, donde sube mucho la valoración al cambiar de tarifa, mientras que en otros, por ejemplo el reductor de caudal de 8 l/min, no se nota tanto. Esto es debido a que en el aireador de lavabo, las mayores valoraciones se obtienen en el criterio económico, mientras que en el reductor de ducha, las mayores valoraciones no son económicas.

Se observa como los sistemas de aprovechamiento de lluvia tienen una valoración muy pequeña, por debajo de 0. Esto es porque son equipos de una gran inversión, que consumen energía, y reducen el consumo de equipos que no consumen energía térmica, como son los inodoros.

En la misma línea están los sistemas de reutilización de aguas grises, si bien los volúmenes de aportación de éstos son mayores, con ello los ahorros de agua, y de ahí su mejor valoración. Por otro lado, ésta depende mucho del coste de inversión del equipo. Los de menor coste, de tecnologías más burdas, y por tanto más peligrosas, se valoran mejor que los de tecnologías más avanzadas, más seguros pero más caros.

Aunque no se refleja en las tablas, los periodos de amortización de los sistemas superan los 30 años, mucho más en el caso de los sistemas de aprovechamiento de pluviales.

Con respecto al combustible que da servicio de energía térmica al edificio, cuanto mayor es su coste, mayor valoración de los sistemas.

## **5.2. EDIFICIOS RESIDENCIALES MULTIFAMILIARES**

---

La aplicación se realiza ahora a una tipología de edificio residencial para varias viviendas que se desarrolla en altura. La vivienda es equivalente a la analizada en el caso de los aislados, pero no dispone de jardín.

Se han pre-seleccionado la mayoría de sistemas ya analizados en el caso de los unifamiliares. Se mantienen los mismos dispositivos y el sistema de aprovechamiento de pluviales, pero sólo se considera el sistema de reutilización de aguas grises de

tecnología MBR, por cuanto es el único que da garantía para su funcionamiento con más de una vivienda.

Las dimensiones del sistema de aprovechamiento de lluvia y del sistema de reutilización de aguas grises cambian de una morfología a otra.

Como resumen, en la Tabla 7.12, se indican los sistemas y características de los preseleccionados.

Tabla 7.12. Sistemas de hidroeficiencia analizados para su implantación en edificio multifamiliar

	Sistema	Características	PVP	Nº equipos
1	Aireador lavabo	$Q_n = 5 \text{ l/min}$	9 €	3 x vivienda
2	Aireador fregadero	$Q_n = 7 \text{ l/min}$	9 €	1 x vivienda
3	Reductor caudal ducha	$Q_n = 8 \text{ l/min}$	12 €	2 x vivienda
4	Teleducha	$Q = 9,5 \text{ l/min}$	20 €	2 x vivienda
5	Grifo inodoro descarga parcial	Vol. descarga = 7 l. Vol. ½ desc. = 3 l.	25 €	2 x vivienda
6a	Sistema reutilización aguas grises. MBR	Capacidad = 2500 l/día	16589 €	1
6b	Sistema reutilización aguas grises. MBR	Capacidad = 10000 l/día	36227 €	1
8a	SAP	Capacidad = 40000 l.	13951 €	1
8b	SAP	Capacidad = 20000 l.	9183 €	1

El patrón de demanda se ha mantenido con respecto a la vivienda unifamiliar, salvo en la eliminación del riego, que en este caso no procede. Sus valores se indican en la Tabla 7.13.

Con respecto a las tarifas por el servicio de abastecimiento desde la red general, en la Tabla 7.8 se indican las que se han considerado en cada uno de los casos. Se ha aplicado la tarifa por el servicio integral puesto que la tarifa de saneamiento se calcula a partir del consumo de agua de abastecimiento, luego también repercute.

Tabla 7.13. Demanda tipo en vivienda unifamiliar

Aparato	Demanda AF	Demanda ACS
Inodoro	39,6 l/pers/día	
Lavabo	2,0 l/pers/día	18 l/pers/día
Ducha	7,0 l/pers/día	63 l/pers/día
Baño	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Bidé	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Urinario	0,0 l/pers/día	
Vertedero	0,0 l/pers/día	0 l/pers/día
Lavadora	6,8 l/pers/día	0 l/pers/día
Lavavajillas	2,9 l/pers/día	0 l/pers/día
Fregadero	0,4 l/pers/día	3 l/pers/día
Riego	0 l/pers/día	
DWD,T	143 l/pers/día	

Los valores correspondientes a la tarifa de distribución y saneamiento para los dos emplazamientos analizados son los mismos que para los casos de las viviendas unifamiliares, y son las indicadas en la Tabla 7.8.

Igualmente sucede con las tarifas energéticas. Se han aplicado las correspondientes a la Tabla 7.9.

La valoración multicriterio de los criterios de selección de sistemas de hidroeficiencia es la misma que para las viviendas unifamiliares y se corresponde con la indicada en la Tabla 7.10.

A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los casos.

Tabla 7.14. Resultados de la valoración de sistemas de hidroeficiencia en edificios multifamiliares

<b>Valoración global</b>												
<b>Emplazamiento Guadalajara</b>												
Descripción	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14	Caso 15
Aireador 5 l/min	0,79	0,61	1,97	0,83	0,65	1,99	0,84	0,67	2	0,92	0,75	2,04
Fregadero 7 l/min	4,25	4,2	4,59	4,26	4,21	4,6	4,27	4,22	4,6	4,29	4,24	4,61
Reductor ducha 8 l/min	5,54	5,53	5,59	5,54	5,53	5,59	5,54	5,53	5,59	5,54	5,54	5,59
Teleducha 9,5 l/min	3,46	3,39	3,95	3,48	3,41	3,96	3,49	3,41	3,97	3,52	3,45	3,98
Inodoro doble descarga	4,81	4,81	4,81	4,83	4,83	4,83	4,84	4,84	4,84	4,88	4,88	4,88
RAU (MBR)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
SAP	-0,43	-0,43	-0,43	-0,47	-0,47	-0,47	-0,48	-0,48	-0,48	-0,49	-0,49	-0,49
<b>Emplazamiento Murcia</b>												
Descripción	Caso 19	Caso 20	Caso 21	Caso 22	Caso 23	Caso 24	Caso 25	Caso 26	Caso 27	Caso 28	Caso 29	Caso 30
Aireador 5 l/min	2,62	2,56	3,07	2,63	2,57	3,08	2,63	2,57	3,08	2,66	2,6	3,1
Fregadero 7 l/min	4,78	4,76	4,91	4,78	4,76	4,91	4,78	4,76	4,91	4,79	4,77	4,92
Reductor ducha 8 l/min	5,61	5,61	5,63	5,61	5,61	5,63	5,61	5,61	5,63	5,61	5,61	5,63
Teleducha 9,5 l/min	4,22	4,2	4,41	4,23	4,2	4,41	4,23	4,2	4,42	4,24	4,22	4,42
Inodoro doble descarga	5,43	5,43	5,43	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44
RAU (MBR)	2,80	2,8	2,8	2,76	2,76	2,76	3,02	3,02	3,02	2,95	2,95	2,95
SAP	-0,45	-0,45	-0,45	-0,48	-0,48	-0,48	-0,49	-0,49	-0,49	-0,5	-0,5	-0,5

La mayor tarifa de la ciudad de Murcia, hace que sea muy más valorado el sistema de reutilización de aguas grises que en la ciudad de Guadalajara, donde difícilmente es amortizado. La tarifa del agua, y de la energía, son importantes para conseguir la implantación de sistemas de hidroeficiencia.

### 5.3. HOTEL

---

Se van a seleccionar los sistemas de hidroeficiencia más adecuados para equipar diferentes morfologías de edificios de tipo hotelero. El edificio hotelero viene caracterizado por disponer de una serie de habitaciones, diferentes según la morfología, equipadas con un único baño completo. No se han considerado para este análisis los consumos debidos al uso restaurante, o a otros usos secundarios que se puedan producir.

Tabla 7.15. Demanda tipo en hotel

Aparato	Demanda AF	Demanda ACS
Inodoro	38,0 l/pers/dia	
Lavabo	16,7 l/pers/dia	12 l/pers/dia
Ducha	18,3 l/pers/dia	25 l/pers/dia
Baño	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Bidé	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Urinario	0,0 l/pers/dia	
Vertedero	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Lavadora	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Lavavajillas	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Fregadero	0,0 l/pers/dia	0 l/pers/dia
Riego	0,0 l/pers/dia	
DWD,T	110 l/pers/dia	

El edificio en cuestión, independientemente de la morfología, es un hotel de tipo vacacional, de 4 estrellas de categoría. La habitación del hotel es de ocupación doble, con un único baño equipado con bañera/ducha, lavabo, bidé e inodoro. Los consumos son los indicados en la Tabla 7.15, obtenidos del estudio sobre el hotel Rey Don Jaime de Valencia (López-Patiño, 2005a), sobre los que se ha aplicado una tasa de ocupación media del 75% según (Bosch et al., 2013).

Tabla 7.16. Dimensiones del sistema de aprovechamiento de pluviales para cada caso.

Edificio tipo Hotel

	Guadalajara	Murcia
2 alturas 100 hab/planta	Capacidad = 250000 l.	Capacidad = 150000 l.
5 alturas 40 hab/planta	Capacidad = 100000 l.	Capacidad = 50000 l.
10 alturas 20 hab/planta	Capacidad = 50000 l.	Capacidad = 30000 l.
2 alturas 10 hab/planta	Capacidad = 25000 l.	Capacidad = 15000 l.

Tabla 7.17. Dimensiones del sistema de reutilización de aguas grises para cada caso.

Edificio tipo Hotel

	Guadalajara	Murcia
2 alturas 100 hab/planta	Capacidad = 10000 l/día	Capacidad = 10000 l/día
5 alturas 40 hab/planta	Capacidad = 10000 l/día	Capacidad = 10000 l/día
10 alturas 20 hab/planta	Capacidad = 10000 l/día	Capacidad = 10000 l/día
2 alturas 10 hab/planta	Capacidad = 2500 l/día	Capacidad = 2500 l/día

Cada habitación dispone de una superficie, incluyendo el baño de 30m<sup>2</sup>. La superficie en planta corresponde con la suma de la de las habitaciones mayorada en un 20% para tener en cuenta los espacios comunes: pasillos, escaleras, office, etc. A partir de dicha superficie, y con los registros pluviométricos correspondientes a los municipios donde se emplaza el hotel (AEMET, 2012) se ha dimensionado el sistema de aprovechamiento de aguas pluviales. Los resultados del dimensionado para cada uno de los casos de la Tabla 7.5 se muestran en la Tabla 7.16.

Igualmente se ha realizado el dimensionado del sistema de reutilización de aguas grises para cada uno de las morfologías analizada, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.17.

Para aplicar el método de selección de sistemas de hidroeficiencia, se han pre-seleccionado algunos dispositivos de ahorro, y se han incluido en el análisis los sistemas de aprovechamiento de pluviales y de reutilización de aguas grises, según las dimensiones calculadas. Se ha elegido un dispositivo de ahorro por habitación, y un sistema de aprovechamiento de pluviales y aguas grises para todo el conjunto del edificio. En la Tabla 7.18 se presentan las características de los dispositivos analizados.

Con respecto a los casos analizados de las viviendas, se ha incorporado un dispositivo aireador de 9 l/min, mucho más económico que el de 5 l/min, pero con peor eficiencia.

Para la elección del mejor sistema se ha aplicado el método de selección multicriterio. Se ha realizado la matriz de comparación pareada para cada uno de los criterios de selección y se han calculado los autovalores de dicha matriz, tal y como se muestra en la Tabla 7.19. Hay que hacer notar que al tratarse de un edificio donde se desarrolla una actividad productiva y debido a la categoría del edificio, 4 estrellas, toman más importancia los aspectos económicos y de imagen del aparato, que los demás.

Tabla 7.18. Sistemas de hidroeficiencia analizados para su implantación en edificio hotel

	Sistema	Características	PVP	Nº equipos
1	Aireador lavabo	$Q_n = 5$ l/min	9 €	1 x habitación
2	Aireador lavabo	$Q_n = 9$ l/min	3 €	1 x habitación
3	Reductor caudal ducha	$Q_n = 8$ l/min	12 €	1 x habitación
4	Teleducha	$Q = 9,5$ l/min	20 €	1 x habitación
5	Grifo inodoro descarga parcial	Vol. descarga = 7 l. Vol. ½ desc. = 3 l.	25 €	1 x habitación
6a	Sistema reutilización aguas grises. MBR	Capacidad = 10000 l/día	36227 €	1 x edificio
6b	Sistema reutilización aguas grises. MBR	Capacidad = 2500 l/día	16314 €	1 x edificio
8a	SAP	Capacidad = 250000 l.	74358 €	1 x edificio
8b	SAP	Capacidad = 150000 l.	44615 €	1 x edificio
8c	SAP	Capacidad = 100000 l.	29743 €	1 x edificio
8d	SAP	Capacidad = 50000 l.	14871 €	1 x edificio
8e	SAP	Capacidad = 30000 l.	11585 €	1 x edificio
8f	SAP	Capacidad = 25000 l.	10677 €	1 x edificio
8g	SAP	Capacidad = 15000 l.	8187 €	1 x edificio

Tabla 7.19. Matriz de comparación pareada y vector de autovalores para los criterios de selección para hoteles

	AHORRO AGUA	AHORRO ENERGIA	DISEÑO	IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL	VIABILIDAD ECONOMICA	VECTOR PROPIO
AHORRO AGUA	1,00	1,00	0,33	5,00	0,11	<b>0,089</b>
AHORRO ENERGIA	1,00	1,00	0,33	5,00	0,11	<b>0,089</b>
DISEÑO	3,00	3,00	1,00	9,00	1,00	<b>0,297</b>
IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL	0,20	0,20	0,11	1,00	0,11	<b>0,029</b>
VIABILIDAD ECONOMICA	9,00	9,00	1,00	9,00	1,00	<b>0,497</b>

Una vez aplicada la metodología de selección, y realizado el análisis, los resultados obtenidos, para todos los casos, son los que se indican en la Tabla 7.20.

A la vista de los resultados se observa que apenas hay diferencias entre el aireador de 5 l/min y el reductor de caudal de ducha de 8 l/min. En según qué casos resulta ligeramente más ventajoso uno que otro. Incluso en algún caso, resulta más ventajosa la implantación de la teleducha de 9,5 l/min

Donde sí que se observa una notable diferencia es en la valoración del sistema de reutilización de aguas grises de un emplazamiento a otro. El emplazamiento diferente afecta en el régimen pluviométrico, y en la tarifa de suministro y saneamiento. El régimen pluviométrico no tiene influencia sobre el sistema de reutilización de aguas grises por lo que la mayor valoración del sistema para el emplazamiento en Murcia se debe a la mayor tarifa. Esto demuestra el hecho que cuanto mayor es el precio del agua más rentables son los sistemas de hidroeficiencia.

Tabla 7.20. Resultados de la valoración de sistemas de hidroeficiencia en hoteles

Valoración global												
Emplazamiento Guadalajara												
Descripción	Caso 31	Caso 32	Caso 33	Caso 34	Caso 35	Caso 36	Caso 37	Caso 38	Caso 39	Caso 40	Caso 41	Caso 42
Aireador 5 l/min	6,20	6,18	6,3	6,21	6,19	6,31	6,22	6,2	6,32	4,34	4,27	4,87
Aireador 9 l/min	6,03	6,02	6,12	6,03	6,02	6,12	6,04	6,03	6,12	4,7	4,63	5,14
Reductor ducha 8 l/min	<b>6,26</b>	<b>6,25</b>	<b>6,36</b>	<b>6,26</b>	<b>6,25</b>	<b>6,36</b>	<b>6,27</b>	<b>6,26</b>	<b>6,37</b>	<b>4,76</b>	<b>4,68</b>	<b>5,25</b>
Teleducha 9,5 l/min	5,98	5,95	6,19	5,99	5,96	6,2	6	5,97	6,2	2,86	2,7	3,93
Inodoro doble descarga	4,83	4,83	4,83	4,89	4,89	4,89	4,97	4,97	4,97	1,81	1,81	1,81
RAU (MBR)	3,10	3,1	3,1	2,77	2,77	2,77	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
SAP	1,46	1,46	1,46	1,33	1,33	1,33	1,29	1,29	1,29	1,35	1,35	1,35
Emplazamiento Murcia												
Descripción	Caso 43	Caso 44	Caso 45	Caso 46	Caso 47	Caso 48	Caso 49	Caso 50	Caso 51	Caso 52	Caso 53	Caso 54
Aireador 5 l/min	6,43	6,42	6,46	6,43	6,42	6,46	6,43	6,43	6,46	6,55	6,54	6,56
Aireador 9 l/min	6,17	6,17	6,2	6,17	6,17	6,2	6,17	6,17	6,2	6,27	6,26	6,28
Reductor ducha 8 l/min	6,42	6,41	6,46	6,42	6,42	6,46	6,42	6,42	6,46	6,53	6,53	6,55
Teleducha 9,5 l/min	6,29	6,28	6,38	6,3	6,28	6,38	6,30	6,29	6,38	6,53	6,52	6,57
Inodoro doble descarga	6,11	6,11	6,11	6,12	6,12	6,12	6,13	6,13	6,13	6,45	6,45	6,45
RAU (MBR)	5,99	5,99	5,99	5,95	5,95	5,95	5,90	5,9	5,9	4,36	4,36	4,36
SAP	2,90	2,9	2,9	3,32	3,32	3,32	1,48	1,48	1,48	1,32	1,32	1,32

## 6. CONCLUSIONES

---

El procedimiento de selección se puede desarrollar desde diferentes perspectivas. De un lado, el método de selección puede desarrollarse mediante un procedimiento coste-beneficio, que tiene en cuenta sólo los aspectos económicos relacionados con la implantación del sistema de ahorro de agua.

De otro lado, la selección se puede realizar siguiendo un método multicriterio para tener en cuenta todos los criterios que caracterizan al sistema de ahorro, y que van más allá de los estrictamente económicos. De entre los diferentes métodos de selección multicriterio, el proceso analítico jerárquico se muestra como perfectamente válido y aplicable a la selección de sistemas de ahorro de agua.

De la aplicación del proceso analítico jerárquico para la selección de sistemas de hidroeficiencia se obtiene la ponderación de cada uno de los criterios de selección, para una determinada implantación.

Aplicando la ponderación al indicador de valoración de cada uno de los criterios se puede obtener una valoración global del sistema de hidroeficiencia. El sistema con mayor valoración es el más adecuado para equipar el edificio en estudio, y el primer candidato a ser seleccionado.

La selección se puede extender al resto de sistemas valorados, siguiendo el orden de valoración, siempre y cuando la implantación de un determinado sistema no influya en la caracterización de los demás.

Esta influencia es frecuente que se produzca y obliga a rehacer el proceso de selección si se quiere implantar más de un sistema en un mismo edificio.

Con el objeto de verificar la bondad del método, se ha aplicado para la simulación de diferentes escenarios. A la vista de las simulaciones realizadas se puede establecer que los sistemas más ventajosos, en general, son aquellos que se instalan sobre aparatos hidrosanitarios que consumen energía térmica ( duchas, lavabos, etc.) por cuanto que el coste energético es relativamente elevado.

Igualmente se puede concluir que la tarifa del agua tiene una gran importancia en la valoración de los sistemas de ahorro de agua. En aquellos casos en que la tarifa es reducida, la valoración global de los sistemas de ahorro es baja, mientras que si la tarifa es elevada, la valoración de los sistemas aumenta. Este resultado, no es una novedad y resulta esperado. Sin embargo, el efecto de la tarifa se nota especialmente en los sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa. Con tarifas elevadas los sistemas pueden resultar rentables, mientras que con tarifas reducidas, no se llegan a amortizar durante su periodo de vida útil. En ese caso, es más económico consumir

agua de red que producirla con una fuente alternativa. De ahí la necesidad de ajustar la tarifa del agua al coste real de producción.

Cuanto mayor es la tarifa unitaria del agua de distribución de red mayor es la valoración de los sistemas de hidroeficiencia. Existe, por tanto, un precio del agua a partir del cual cualquier sistema de hidroeficiencia es rentable.

Si el precio del agua se fija por criterios técnicos, y no políticos, sería viable la implantación de sistemas de hidroeficiencia en las que las amortizaciones de los equipos quedasen garantizadas en un periodo razonable.

## 8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

## 1. CONCLUSIONES

---

Es una realidad que en nuestro entorno existe un déficit hídrico que afecta tanto al consumo agrícola de agua dulce como al consumo urbano de agua potable. Las condiciones ambientales de cambio climático agravarán la situación en los próximos años. La gestión eficiente de los recursos hídricos es, y será, un tema importante para la sociedad que debe ser abordado desde un punto de vista social y tecnológico.

El uso agrícola del agua supone un 70% del uso total de agua dulce. Su problemática es muy particular por cuanto que se utiliza para una actividad productiva, y su uso está fuertemente regulado. No ha sido abordado en esta tesis.

Por su parte el uso urbano del agua es principalmente doméstico. Se caracteriza por una fuerte aleatoriedad debida al comportamiento humano. Aunque predecible, la demanda varía fuertemente según toda una serie de factores, emplazamiento, tipología de edificio, nivel socio-económico de los usuarios, climatología, estacionalidad, etc.

Su problemática es muy específica y el tipo de soluciones que se plantea al problema de la falta de recursos hídricos también. En el consumo urbano de agua la gestión eficiente del recurso se resuelve desde dos perspectivas: el aumento de la oferta y la reducción de la demanda.

El aumento de la oferta, a través de un aumento de las captaciones, trasvases desde cuencas excedentarias, o desalación implica la realización de una serie de nuevas inversiones. La obligatoriedad de repercutir los costes de amortización de las inversiones en la tarifa lleva consigo que este tipo de medidas supongan, necesariamente, un aumento en dicha tarifa, que no siempre el consumidor está dispuesto a asumir.

La reducción en la demanda también puede conllevar un aumento en las inversiones, pero éstas no se repercuten en la tarifa, y se compensan con el menor volumen consumido. El usuario ve con mejor perspectiva este tipo de medidas.

Dentro de las medidas de reducción de la demanda, existen las de tipo conductual en las que el usuario, de forma activa, consigue reducir su consumo de agua potable. Influyen en ese comportamiento toda una serie de factores. Uno de los más notorios es la tarifa o la estructura tarifaria por el servicio de suministro de agua potable. Aunque la bibliografía muestra influencias muy dispares, en general si la tarifa es lo suficientemente elevada, el aumento de la misma reduce la demanda de agua de los consumidores. Si la tarifa es artificialmente reducida, el aumento del precio no tiene influencia en el consumo por cuanto apenas afecta a la economía del usuario.

Las medidas de educación, divulgación y concienciación sobre la necesidad del ahorro de agua sólo se muestran eficaces cuando están diseñadas para la implicación directa del usuario.

Las medidas reglamentarias y normativas que obligan al ahorro son eficaces, pero la obligatoriedad hace que se cumplan en el mínimo legal que permite no trasgredir la norma. Generalmente la normativa impone la aplicación de medidas de carácter tecnológico, por lo que es importante que las dimensiones de los equipos se correspondan con el edificio sobre el que se va a implantar. Un dimensionado óptimo de los mismos favorece su implantación y evita la picaresca.

Otro tipo de medidas de reducción de la demanda son de carácter puramente tecnológico, las denominadas medidas pasivas. En ellos, la tecnología utilizada en los sistemas de suministro de agua permite que se reduzcan los consumos, aún sin la intervención consciente del usuario. Dentro de este grupo se encuentran los dispositivos de bajo consumo y los equipos que producen agua para su uso no hidrosanitario dentro del edificio, como los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, los sistemas de reutilización de aguas grises, y los sistemas de aprovechamiento de condensados en equipos de climatización.

Los ahorros que se obtienen son muy dispares según el equipo, y según el edificio en el que se instalan, de tal forma que se requiere de una metodología que evalúe la idoneidad de cada uno de ellos para una implantación en concreto. En general, los ahorros específicos o potenciales que se pueden obtener de la implantación de uno o más sistemas tecnológicos de ahorro pueden estar entre el 10% hasta el 70% del consumo global del edificio, dependiendo de la tecnología utilizada.

Los ahorros que se obtienen para los aireadores de grifos (lavabos, bidés, o fregaderos) ofrecen un rango de ahorro específico entre el 33%, para los equipos más básicos y económicos, y el 63% para los equipos más eficientes pero costosos.

Para los reductores de caudal de duchas el rango de ahorro potencial se encuentra entre el 17% y el 58%. En el caso de los cabezales de ducha, los equipos comerciales actuales generan unos ahorros entre el 17% de los más económicos y el 47% de los más eficientes.

Con respecto a los inodoros de bajo consumo, los ahorros potenciales difieren según el mecanismo de ahorro. Para los que disponen de doble pulsador, el ahorro está entre el 44% y 70%, según sea la regulación del mecanismo de descarga. La regulación está relacionada con el diseño de la taza del inodoro, por cuanto que volúmenes de descarga excesivamente bajos, sin un diseño ajustado a tan bajo caudal, puede provocar falta de limpieza y la reiteración innecesaria en las descargas.

Los inodoros que disponen de mecanismos de descarga interrumpible pueden conseguir ahorros potenciales entre el 55% y el 60%. Sin embargo, presentan una desventaja, su falta de distinción con un mecanismo de descarga única. Un usuario puede no ser consciente de la posibilidad de la interrumpibilidad de la descarga y, consiguientemente, no llegar a utilizarla.

Las griferías temporizadas ofrecen la posibilidad de regulación del tiempo de descarga. Ofrecen unos ahorros potenciales en torno al 70% del consumo cuando están funcionando. El mecanismo de regulación en la temporización, en algunos casos electrónico y en otros mecánico, permite modificar los volúmenes de descarga hasta lograr estos valores de ahorro de agua. Sin embargo, su mayor potencial de ahorro está en evitar los consumos innecesarios, es decir, la temporización del suministro permite evitar que las griferías queden abiertas por descuido o dejadez, logrando importantes ahorros no por reducción del caudal sino por reducción de fugas de agua no consumida.

Con las válvulas reductoras de presión, se consigue reducir el caudal entregado a partir del punto donde se ubica la válvula. La reducción es muy relativa por cuanto que el usuario puede abrir más los grifos si observa que el caudal suministrado no es de su confort, con lo cual el ahorro que producen no es tal en algunos casos. En general, el ahorro depende de la presión de alimentación y puede estar entre un 9% para los aparatos con menor presión de alimentación, hasta un 29% para los aparatos con mayores presiones de alimentación. Se podrían obtener mayores ahorros para instalaciones con presiones superiores a las que obliga la reglamentación española, pero esos casos son anómalos puesto que ya no cumplen la normativa.

Los dispositivos de apertura en dos posiciones, en los edificios con exceso de presión producen ahorros potenciales del 50%. Si la presión no es excesiva los ahorros son algo menores.

En el caso de los sistemas de reutilización de aguas usadas el ahorro depende del consumo en los inodoros y en el riego de jardines del edificio. Si la aportación del sistema es mayor que la demanda en inodoros y riego, entonces se puede suplir todo el consumo con las aportaciones de éstos. El ahorro es el 100% de la demanda de los inodoros y el 100% de la demanda de riego de jardines. Para este caso, además, la utilización de un sistema de aguas grises es incompatible con la utilización de otros sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa.

En el caso que la demanda sea mayor que la aportación entonces el ahorro es el porcentaje de demanda cubierto, inferior al 100%. Para este caso, todos los sistemas de tipo fuente alternativa son complementarios y se pueden utilizar simultáneamente.

Los ahorros reales que se pueden obtener en el conjunto del edificio dependen, en gran medida, de la forma de consumir de los usuarios del edificio, y eso puede variar de unos edificios a otros.

No es lo mismo la forma de consumir de un edificio multifamiliar de viviendas en medianera que la forma de consumir de un edificio unifamiliar exento, o la forma de consumir en un centro docente que en un edificio de oficinas. No es lo mismo la forma de consumir en una ciudad que en otra, condicionado por sus costumbres, climatología, o simplemente el emplazamiento.

De ahí la necesidad de realizar una caracterización de la forma de consumir en cada uno de los edificios donde se van a implantar sistemas de ahorro de agua, para determinar cuáles son los equipos que mejor se van a adaptar al edificio.

Existe en la bibliografía estudios de consumo doméstico en ciudades como Barcelona, Madrid (y sus respectivas áreas metropolitanas), pero no hay estudios sobre el consumo en el área de Valencia.

Dentro del desarrollo de esta tesis, como su primera contribución, se ha realizado un estudio de consumos domésticos de agua de personas que viven en la ciudad Valencia o su área de influencia en base a encuestas, similar a otros estudios realizados en el área metropolitana de Barcelona. Para ello, a lo largo de una serie de años, se han efectuado encuestas de consumo doméstico a los alumnos de las asignaturas que tienen que ver con las instalaciones de fluidos, todos ellos de cursos avanzados con suficiente conocimiento como para llevar a cabo las medidas necesarias.

Los datos reflejan unos patrones de consumo muy similares a los de una ciudad costera como es Barcelona, pero ligeramente superiores a una ciudad de interior como es Madrid. Los patrones de consumo permiten inferir hábitos y costumbres que se pueden corregir mediante la aplicación de medidas activas de gestión de la demanda.

Frente a una frecuencia de ducha, por persona y día, de 0,93 para Valencia, y 0,8 para Barcelona, en Madrid la frecuencia media de duchas es de 0,5 veces por persona y día. La frecuencia de uso de los inodoros en Valencia es de 5,2 veces por persona y día, similar a las 4,6 veces de Barcelona, pero superior a las 3,2 veces por persona y día de Madrid.

La frecuencia de uso de la lavadora y lavavajillas, allí donde los hay, es muy similar en las tres ciudades, en torno a 0,6 veces por día y vivienda.

Siendo importante el patrón de consumos, la valoración del ahorro global en cada aparato sanitario facilita el análisis de dónde se producen las mayores pérdidas de agua y, por tanto, dónde hay que incidir en las medidas de ahorro.

Las encuestas de consumo realizadas indican que los consumos del lavabo en Valencia son menores, 15,5 l/persona/día, que en Madrid y Barcelona. Sin embargo, el consumo en duchas es bastante más elevado, 60 l/persona/día, frente a 30 y 40 respectivamente. El consumo en inodoros en Valencia es de 34 l/persona/día, superior a los 27 l/persona/día de Barcelona y 19 l/persona/día de Madrid. Los consumos en lavadoras y lavavajillas son muy similares.

Los datos de consumo de todas estas referencias pueden ser utilizados cuando la morfología del edificio es similar a la estudiada. Cuando no lo es hay que recurrir a la realización de una auditoría del consumo de agua del edificio en cuestión, si la actuación de hidroeficiencia se va a realizar en un edificio existente, o de un edificio similar si es una actuación en un edificio de nueva ejecución.

En una segunda aportación a esta tesis se ha indicado los pasos necesarios para desarrollar la auditoría del consumo de agua de un edificio, fruto de la experiencia del autor en este tipo de actuaciones, y con indicación de las principales dificultades que supone la realización de la auditoría.

El ahorro real que se genera por la implantación de cada sistema de hidroeficiencia depende del ahorro teórico o potencial y del porcentaje de uso de cada uno de los aparatos en el global del edificio con arreglo al patrón de demandas del mismo.

En los dispositivos de hidroeficiencia el ahorro es directamente una reducción del agua potable que se consume en la red por reducción de la demanda. Sin embargo en los sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa, el ahorro de agua no es tal. Se puede reducir el consumo de agua suministrada desde la red general sin que se produzca una reducción de la demanda, simplemente es un cambio en la fuente de aportación del recurso.

Los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales han sido objeto de un estudio más pormenorizado. Utilizan un recurso muy económico como es el agua de lluvia. Con ellos la demanda de agua no tiene por qué reducirse, pero se sustituye un recurso de un cierto coste para el usuario, como es el proveniente de la red general de distribución, por otro recurso cuyo coste es verdaderamente reducido.

Sin embargo, a pesar del nulo valor del agua de lluvia, el metro cúbico de agua producida desde el sistema de aprovechamiento de pluviales sí que tiene un cierto coste. Los costes unitarios del agua producida son los costes de amortización de equipos, más los costes de operación del sistema.

Como los costes de amortización son una buena parte de los que tiene el sistema, una adecuada selección y un ajustado dimensionado de los equipos que forman parte del sistema son fundamentales para que sea interesante seleccionar este tipo de sistema.

El elemento de captación del sistema de aprovechamiento de aguas pluviales, ya sea la cubierta del edificio o la solera de la parcela en la que se ubica, debe ser lo más impermeable posible para aprovechar al máximo las precipitaciones. En cualquier caso, el material no debe contaminar el agua, lo que en algunas superficies asfálticas no sucede.

La zona de captación de las pluviales debe estar lo más despejada posible de vegetación para evitar los filtros primarios, que no solo encarecen la instalación sino que hacen que pierda eficiencia.

El separador de primera lluvia debe tener sus dimensiones ajustadas a las de la superficie de captación. Un volumen excesivo del separador, sobre todo en zonas con escasez de precipitaciones abundantes, puede llevar a una eficacia del sistema de aprovechamiento de pluviales inferior al 20%. Para ello en la tesis, en otra de las aportaciones originales, se ha desarrollado un método para el dimensionado óptimo de los separadores de primera lluvia. Este desarrollo ha generado una publicación en el Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable y publicado en su libro de actas (López-Patiño et al., 2009)

La metodología se basa calcular el volumen de precipitación caído en el tiempo que transcurre desde que se inicia la lluvia hasta que llega al punto de captación la lluvia caída en el punto más alejado de la superficie de captación. La metodología permite ajustar hasta un 50% las dimensiones del separador con aumentos de eficacia de hasta el 2%, según el emplazamiento y el régimen de lluvias.

El depósito de almacenamiento es el elemento del SAP que más influye en el coste del sistema. Un volumen excesivo del depósito puede propiciar que no se llene nunca al 100%, cuando el dimensionado se realiza desde el lado de la aportación, o que haya un volumen muerto de agua que no se llegue a utilizar, cuando el dimensionado se realiza desde el lado de la demanda.

Por el contrario, un volumen demasiado pequeño no llega a recoger toda la precipitación posible y se pierde eficacia en el sistema de aprovechamiento de pluviales, sea cual sea el modo de dimensionado.

La eficacia del SAP, cuando el dimensionado se hace desde el lado de la aportación, es una función dependiente del volumen del depósito que tiende asintóticamente hacia un valor que es la relación entre la aportación y la demanda.

En una aportación original de la tesis se indica cómo dimensionar el volumen del depósito para lograr la máxima eficacia posible.

Un análisis de la función de eficacia demuestra que es posible reducir el volumen del depósito de manera notable, sin que ello afecte de igual forma a la eficacia, con lo que se gana en rentabilidad económica del sistema. De esta manera se puede realizar un dimensionado económico del depósito del sistema de aprovechamiento de aguas pluviales. Es una aportación original de la tesis que ha dado lugar a una contribución en la revista "Tecnología y Ciencias del Agua" indexada en la base de datos ISI (JCR) (López-Patiño et al., 2011).

El problema general del sistema de aprovechamiento de pluviales es la gran dependencia que tiene con el régimen de precipitaciones. Si éstas no se producen de una forma regular en cada periodo, las aportaciones son muy variables y el sistema funciona de forma muy inestable. Además, en periodos de estío, cuando las demandas de agua son mayores, las aportaciones son todavía más escasas.

Para compensar el defecto de aportaciones en verano, se pueden aprovechar los condensados que se producen en los sistemas de climatización. El agua de condensación se produce al enfriar el aire húmedo exterior. Las aportaciones de condensados son mayores en verano que en invierno, justo al revés que en los SAP, luego se complementan.

El volumen de agua de condensación en los sistemas de aprovechamiento de condensados depende del caudal de aire tratado, e indirectamente de la potencia de climatización, de la humedad exterior, y de la ocupación y actividad del edificio.

Los edificios donde resulta más ventajosa su utilización son edificios de gran volumen de acondicionamiento de aire, ubicado en una zona cerca de la costa, con una ocupación relativamente pequeña, y que disponen de equipos de climatización centralizados.

En edificios de viviendas, el aprovechamiento de los condensados presenta ciertos problemas debido a la dispersión de los equipos de climatización en cada una de las viviendas, lo que impide centralizar el agua de condensación de una forma barata y asequible.

Para determinar el verdadero potencial de generación de condensados, se ha realizado un estudio sobre el sistema de climatización de un edificio de despachos en la Universitat Politècnica de València, en lo que es una nueva contribución de la tesis. Este estudio ha sido presentado en el XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, organizado por la International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), y publicado en su libro de actas (López-Patiño et al., 2008).

Los resultados demuestran que cuando el sistema de climatización trabaja 100% con aire exterior el potencial de generación de condensados es de 0,7 l/h/kW térmico. En

cambio, si se trabaja sólo con aire de recirculación el potencial se reduce a 0,4 l/h/kW térmico. La combinación de aire exterior con aire de retorno produce valores intermedios en la proporción que corresponda.

Se ha observado que, en los días en que la humedad exterior es mayor, la producción de condensados es mayor que en días con menor humedad, lo que era de esperar.

Así, teniendo en cuenta que el aprovechamiento de agua de condensación, debido a su calidad, se limita al uso en inodoros y riego, el potencial de ahorro varía con el potencial de uso de los inodoros en el edificio.

El ahorro global de agua de red que se obtiene es, según la tipología del edificio: para edificios de viviendas del 3,6%; en edificio de oficinas del 1,5%; en hoteles del 3,6%; en la zona de hospitalización de los hospitales del 13%; en centros comerciales del 8%; en gimnasio del 10%; en la zona de vestuarios de piscinas climatizadas del 14%, y en museos del 10%.

El coste de implantación de un sistema de aprovechamiento de condensados, cuando se complementa con un SAP es relativamente pequeño. La evacuación de los productos de condensación se tiene que producir de todas formas, por lo que el coste adicional de su aprovechamiento es el coste adicional de las conducciones que transportan al agua condensada hasta el depósito del SAP. El transporte es, generalmente, por gravedad, lo que no supone coste energético adicional.

El ahorro de agua no es el único criterio que se debe utilizar para seleccionar sistemas de hidroeficiencia, pues se dejarían de considerar múltiples aspectos que influyen en la decisión. Además hay que tener en cuenta el ahorro de energía, tanto térmica como eléctrica para bombeo, el impacto socio-ambiental, el diseño del sistema, y su viabilidad económica.

Todos estos aspectos se valoran a través de una serie de indicadores que se proponen en esta tesis. El indicador de ahorro de agua es la relación entre el ahorro que se consigue con la implantación de un determinado sistema de hidroeficiencia y la demanda total de un edificio. El indicador sólo puede ser máximo cuando se utilizan sistemas de hidroeficiencia del tipo fuente alternativa, y siempre y cuando el sistema cuente con un proceso de potabilización que permita suministrar el 100% de la demanda.

Con dispositivos de hidroeficiencia que se implantan en un determinado aparato no se puede lograr el máximo valor del indicador, por cuanto que el propio aparato no representa la demanda total del edificio.

El indicador de ahorro de energía representa la energía que se deja de consumir, como consecuencia del ahorro de agua, con respecto a la energía total utilizada en el edificio para atender la demanda de agua, tanto fría como caliente de uso sanitario.

El indicador de ahorro de energía es fácil que tome valores negativos para los sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa, por cuanto que consumen energía para presurizar las aportaciones almacenadas en sus depósitos.

El indicador de impacto socio-ambiental es la suma de la valoración de los diferentes aspectos que se consideran que intervienen. Son aspectos que tienen que ver con la reducción de los recursos naturales, del tipo que sean, con la reducción de la contaminación o la generación de CO<sub>2</sub>, con el fomento de los hábitos de ahorro, con el desarrollo tecnológico y la creación de empleo, y otros.

El indicador de impacto socio-ambiental es importante porque es el único que da más importancia al entorno que al propio usuario de la instalación.

Igualmente, el indicador de diseño tiene en cuenta los aspectos relacionados con la funcionalidad, usabilidad, mantenimiento, ergonomía, y con la estética del sistema de hidroeficiencia. Su valor es la suma de las valoraciones de cada uno de estos aspectos. El diseño tiene importancia en determinados tipos de edificios en los que la apariencia es un valor añadido: hoteles de lujo, edificios singulares, etc.

El indicador de viabilidad económica tiene en cuenta que la implantación de un sistema de hidroeficiencia no suponga, al menos, una pérdida económica con respecto a la situación de partida. En algunos edificios destinados a una actividad productiva la implantación de sistemas de hidroeficiencia deben generar, además, una rentabilidad económica.

Este indicador es la relación entre el periodo de retorno de la inversión y la vida útil del equipo. En algunos sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa es fácil encontrar indicadores que viabilidad negativos, pues la inversión nunca se llega a amortizar con los ahorros económicos que se logran.

La definición de los indicadores, así como la metodología para calcularlos es una aportación original de la tesis. Los desarrollos preliminares de definición de indicadores, así como una versión simplificada del procedimiento de selección, están publicados en una guía editada por el Instituto Valenciano de Edificación (López-Patiño et al., 2012), y en una ponencia en el Congreso de Inovação na Construção Sustentável (Navarro-Escudero, M.; López-Patiño, G.; Valero, A., 2012).

El proceso final de selección se realiza según diferentes métodos. Cuando el edificio está destinado a realizar una actividad productiva, el método de selección es

estrictamente económico, mediante un procedimiento coste-beneficio. Se elige el sistema de hidroeficiencia que mayor beneficio bruto genere. Para calcularlo se computan los ingresos recurrentes obtenidos por el ahorro económico asociado a la reducción del consumo de agua de red. A éstos se le restan los costes, recurrentes y no recurrentes, debidos a la inversión realizada y a la operación del sistema de hidroeficiencia. Por otro lado se busca el sistema de hidroeficiencia con mayor tasa interna de retorno. Si coinciden los sistemas de hidroeficiencia que mayor beneficio generan y mayor tasa interna de retorno, se selecciona ese sistema. Si no coinciden se calcula el periodo de retorno de la inversión para cada uno de los dos sistemas elegidos, y se selecciona el que menor periodo de retorno genere.

Cuando el edificio no está destinado a un uso productivo, o como método general, se utiliza como procedimiento de selección un método multicriterio.

Cada uno de los criterios se pondera según su importancia en cada uno de los edificios. Así, en edificios ubicados en zonas áridas, con escasez de recursos hídricos toma más peso el criterio de ahorro de agua. En edificios públicos toma más importancia las consideraciones de impacto socio-ambiental, por el carácter ejemplarizante de la administración pública. En hoteles de categoría alta tiene más peso el diseño, o la viabilidad económica.

Como método para establecer una ponderación adecuada, el proceso analítico jerárquico se muestra suficientemente válido. En otra contribución original de la tesis, se ha desarrollado la aplicación del método AHP a la selección de sistemas de ahorro de agua.

De la aplicación del método del AHP resulta un sistema de hidroeficiencia con mayor valoración que los demás, que será el seleccionado. Para la selección de sistemas de hidroeficiencia adicionales hay que tener en cuenta la interacción entre sistemas.

La implantación de un determinado sistema de hidroeficiencia puede, o no, repercutir en los ahorros obtenidos por el resto de sistemas. Si es el caso, hay que recalcular los indicadores de selección de cada uno de los criterios, teniendo en cuenta los nuevos ahorros, y volver a aplicar la metodología para implantar más de un sistema en el edificio en cuestión.

La metodología desarrollada se ha puesto en práctica, a través de una serie de casos de estudio, simulando el proceso de selección de dispositivos en edificios de viviendas, tanto unifamiliares como multifamiliares, y en hoteles. En total se han analizado un total de 54 casos.

En general, si en una determinada tipología de edificio, cambiando su morfología, se mantiene el patrón de demandas, los sistemas de hidroeficiencia mejor valorados

vienen a ser los mismos. De ahí la necesidad de contar con una curva de demanda lo más ajustada posible a las características del edificio. Es necesaria la realización de una auditoría del consumo de agua siguiendo la metodología indicada en el capítulo 2 de esta tesis, o llevar a cabo algún tipo de prospección para conocer la curva de demanda más ajustada del edificio.

En general, los sistemas de hidroeficiencia que se instalan en aparatos sanitarios que consumen agua caliente sanitaria son los mejor valorados, al unirse el ahorro energético al ahorro de agua.

Los sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa, aprovechamiento de aguas pluviales, aprovechamiento de aguas grises, o aprovechamiento de condensados, sólo abastecen aparatos que consumen agua fría, y además consumen energía. Sus periodos de amortización son muy elevados en comparación con otros dispositivos.

Para ubicaciones en las que la tarifa del agua suministrada desde la red general de distribución es baja, los sistemas de tipo fuente alternativa tienen periodos de retorno entre 35 y 100 años, dependiendo del sistema de hidroeficiencia. Para ubicaciones con tarifa del agua más cara, los periodos de retorno se pueden reducir a valores entre 10 y 35 años, que resultan más altos que otros sistemas.

Cuanto mayor es la tarifa unitaria del agua de distribución de red, mayor es la valoración de los sistemas de hidroeficiencia. Existe, por tanto, un precio del agua a partir del cual cualquier sistema de hidroeficiencia es rentable.

Si el precio del agua se fija por criterios técnicos, y no políticos, sería viable la implantación de sistemas de hidroeficiencia en las que las amortizaciones de los equipos quedasen garantizadas en un periodo razonable.

La metodología expuesta se ha mostrado también válida para procesos diferentes de la selección de sistemas a implantar en un edificio. Con la metodología desarrollada se ha comprobado la validez de un nuevo sistema de hidroeficiencia, antes de entrar en fase de producción y comercialización, comparándolo con los sistemas de hidroeficiencia existentes. Así se refleja en la ponencia presentada en las pasadas Jornadas de Ingeniería del Agua (López-Patiño et al., 2013)

A modo de resumen, son aportaciones originales de esta tesis:

- El desarrollo de estudio de patrones de consumo de agua en edificios de viviendas, unifamiliares y multifamiliares, en el entorno urbano de la ciudad de Valencia, en base a medidas y encuestas de consumo a los usuarios.

- El desarrollo de la metodología del dimensionado óptimo de los separadores de primera lluvia que equipan los sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, que mejoran la eficiencia del sistema en un 2%.
- El desarrollo de la metodología para el dimensionado económico de los depósitos de almacenamiento de agua en los sistemas de aprovechamiento de pluviales. Con el dimensionado económico se logra reducir el coste de inversión del sistema sin tener una merma significativa en la eficiencia del sistema, lo que redundará en una reducción del periodo de retorno de la inversión y hace más viable la implantación de este tipo de sistemas.
- El desarrollo de las mediciones para la verificación práctica de la validez del método teórico de determinación del volumen de condensación de agua en sistemas de climatización de edificios.
- El análisis y definición de los criterios de selección de sistemas de ahorro de agua en edificios, teniendo en cuenta aspectos de ahorro, impacto-social, diseño y viabilidad económica.
- El desarrollo de la metodología para la caracterización de los sistemas de hidroeficiencia para cada uno de los criterios de selección. Se logra de esta manera poner en valor, para cada sistema de hidroeficiencia, cada uno de los criterios de selección.
- El desarrollo de la metodología de selección multicriterio y la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) para la selección más adecuada de los sistemas de hidroeficiencia a implantar en un edificio.

Con ello se da respuesta a los objetivos generales y específicos planteados al inicio de esta tesis.

## 2. DESARROLLOS FUTUROS

---

La tesis que se presenta supone un paso adelante en el proceso de mejora de la eficiencia en la demanda de agua potable en edificios. No obstante, a partir de esta investigación se evidencian algunas actuaciones futuras para desarrollar.

En primer lugar, como se indica en el documento, una de las medidas que más influyen en la gestión eficiente de la demanda, y por ende en la reducción del consumo de agua en los edificios, es el desarrollo normativo que obligue a la adopción de medidas de ahorro. Sin embargo, toda obligatoriedad genera rechazo y picaresca. Hay que evitar que el cumplimiento de la normativa se realice sólo para cubrir el expediente.

En este sentido, existe una necesidad de analizar la eficacia, influencia, posibilidades, y viabilidad de las medidas tecnológicas de ahorro, y desarrollar una normativa de carácter prestacional que garantice la incorporación de los sistemas de hidroeficiencia en los edificios como una técnica constructiva habitual.

La normativa se debe enfocar hacia limitar el máximo consumo de agua potable permisible en el edificio en función de su tipología, y ocupación. Para ello, se debe disponer de información suficiente sobre la demanda mínima que se puede lograr en cada tipología de edificio, manteniendo siempre unas condiciones de confort suficientes para el usuario. La información se obtiene de un análisis detallado de cada tipología de edificio, las tecnologías de ahorro disponibles, y el alcance de los ahorros que se pueden obtener con la implantación de los sistemas de hidroeficiencia que sean viables.

Una segunda línea de desarrollo, que complementa la anterior, es la generación de una extensa base de datos con información fiable y suficientemente sobre los patrones de consumo para cada una de las tipologías de edificación y en diferentes emplazamientos geográficos. La información se obtiene desarrollando campañas de medición del consumo de agua no sólo en edificios de viviendas, las más extendidas actualmente, sino en otro tipo de edificación: edificios administrativos, comerciales, residencial público, etc.

La disponibilidad de esa base de datos de información permitiría afinar en el proceso de selección de sistemas de hidroeficiencia. De esta manera los resultados de ahorro de agua y ahorro económico serían más ajustados a la realidad. Así, crece la credibilidad del proceso de implantación de los sistemas de hidroeficiencia, lo que favorecería su difusión y aceptación entre los usuarios, y en el fondo aumentaría el ahorro.

Igualmente, la disponibilidad de una extensa base de datos de consumos evitaría el desarrollo de costosas auditorías del consumo de agua en edificios. La información obtenida de las auditorías queda a disposición de quien la ha realizado, no favoreciendo la difusión de la implantación de sistemas de hidroeficiencia.

Un nuevo desarrollo futuro es el desarrollo del proceso inverso de definición de la tarifa del servicio de agua potable. Se ha demostrado la influencia que tiene la tarifa del agua, tanto en los hábitos de consumo, como en la implantación de medidas tecnológicas. Se plantea el desarrollo del proceso inverso. Fijado un potencial de ahorro, o una demanda máxima, en atención a la disponibilidad de recursos hídricos establecer la estructura de la tarifa del agua.

Si se tiene en cuenta que la viabilidad de implantación de cada uno de los sistemas de hidroeficiencia es función de la tarifa, existe una tarifa a partir de la cual cada sistema

resulta viable económicamente. Como cada sistema de hidroeficiencia está asociado a un ahorro global de agua, existe una relación entre la demanda máxima permisible y la tarifa del agua con la que se logra, desde el punto de vista exclusivamente tecnológico. Por tanto, tiene interés realizar un estudio que permita establecer el método para determinar dicha tarifa.

En ésta tesis, el tratamiento que se ha realizado de los sistemas de reutilización de aguas usadas se ha basado en la implantación de equipos compactos comerciales. No obstante, existen otras tecnologías: estaciones depuradoras de distrito, sistemas de lagunaje, etc., que deberían ser también considerados. Igualmente, se ha trabajado sobre la hipótesis de dimensionado de los sistemas de reutilización que establece la normativa. Como resultan sistemas excesivamente costosos, con periodos de retorno de la inversión muy amplios, un desarrollo futuro es el estudio del dimensionado económico de los equipos que forman parte del sistema, en una línea similar al realizado en esta tesis en el estudio económico de los sistemas de aprovechamiento de pluviales. Un dimensionado de éstas características mejoraría la valoración de los sistemas de aprovechamiento de aguas usadas, que actualmente resultan muy penalizados en la valoración, para la mayor parte de los edificios.

En cuanto al procedimiento de selección en sí mismo, hay desarrollos por llevar a cabo. La selección por coste-beneficio, actualmente limitada a los edificios cuyo uso se destina a una actividad productiva, se podría extender al resto de edificios si se pudiera definir, de forma real y válida, el coste asociado a todos los factores que no son estrictamente económicos. Así, los aspectos que tienen que ver con el impacto socio-ambiental deberían estudiarse para establecer el coste económico real que suponen. Cuestiones como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la reducción en la construcción de nuevas infraestructuras de transporte, sufragadas por vía de impuestos o repercutidas en la tarifa, la generación de empleo asociado al desarrollo de nuevas tecnologías, etc., deben estudiarse desde el punto de vista de su impacto económico en la sociedad y deben ser llevadas, como ingresos o costes, al proceso de selección coste-beneficio.

En toda la investigación realizada se ha evidenciado el gran potencial de ahorro que presentan los sistemas de hidroeficiencia de tipo fuente alternativa. Sin embargo hay una restricción normativa en cuanto a su aplicabilidad, por cuestión de la calidad del agua obtenida. Es un campo de desarrollo futuro el análisis de los sistemas de regeneración de aguas usadas, aguas pluviales, y aguas procedente de condensación desde el punto de vista de la calidad de sus aguas. El problema no está tanto en el tratamiento que se puede hacer de las aguas, tecnología que está desarrollada, como en los sistemas de deben permitir asegurar la calidad de las aguas en todo momento,

tratándose de instalaciones en edificios cuyo mantenimiento corre a cargo de los propietarios, y no siempre ofrece las garantías suficientes.

Por último, la investigación llevada a cabo se ha centrado en los sistemas y dispositivos de ahorro agua. No se han abordado cuestiones que tienen que ver con la propia instalación de distribución de agua fría en el interior del edificio. Aspectos como la morfología del esquema de las conducciones, el escalonamiento de presiones en el edificio, el número de grupo de bombeo y la limitación de plantas que deben suministrar, el posicionamiento de acometidas con respecto a los puntos de consumo, la propia distribución de los puntos de consumo en el edificio. Son todos aspectos que podrían influir en la reducción de la demanda, aunque está por determinar en qué cuantía. Es por ello que el análisis de la propia configuración de la red de distribución de agua de consumo en el edificio es un tema para un posible desarrollo futuro.

En esencia, la tesis que se presenta es un primer paso para resolver el gran problema de la escasez de agua potable, desde la perspectiva del consumo urbano en edificios, y que presenta ciertas posibilidades de desarrollo futuro.

BIBLIOGRAFIA

---

- AEAS (2013). "Encuesta del consumo de agua en España". Madrid: AEAS.
- AEMET (2015). Catálogo de datos oficiales abierto del AEMET. <[http://www.aemet.es/es/datos\\_abiertos/catalogo](http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/catalogo)> [consulta: 24 de julio de 2015]
- AEMET (2012). *Guía resumida del clima en España (1981-2010)*. Madrid: AEMET.
- AENA (2012) "Información ambiental. Aeropuerto de Madrid-Barajas. 2012". Madrid: Aena aeropuertos.
- AENOR (1997). *Intercambiadores de calor. Procedimientos para determinar las prestaciones de los recuperadores de calor aire/aire y aire/gases de combustión*. UNE-EN 308. Madrid: AENOR.
- AENOR (1998). *Grifería sanitaria. Mezcladores mecánicos (PN10). Especificaciones técnicas generales*. Norma UNE-EN 817. Madrid: AENOR
- AENOR (2005). *Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la demanda de energía térmica*. UNE 94002:2005. Madrid: AENOR.
- AENOR (2006). *Pequeñas instalaciones de depuración de aguas residuales para poblaciones de hasta 50 habitantes equivalentes. Parte 3: Plantas de depuración de aguas residuales domésticas prefabricadas y/o montadas en su destino*. UNE-EN 12566-3. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008). *Grifería Sanitaria. Grifos simples y mezcladores para sistemas de suministro de agua tipo 1 y 2. Especificaciones técnicas generales*. UNE-EN 200. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008a). *Ventilación de edificios. Criterios de diseño para el ambiente interior*. UNE-CR 1752 IN. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008b). *Ventilación de los edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos*. UNE-EN 13779. Madrid: AENOR.
- AENOR (2009). Auditorías energéticas. UNE 216501:2009. Madrid: AENOR.
- AENOR (2012). Auditorías energéticas. Partes 1 a 4. UNE-EN 16247. Madrid: AENOR.
- Agudelo-Vera, C.M. et al. (2013). "Evaluating the potential of improving residential water balance at building scale". *Water Research*, vol. 47. p. 7287-7299
- Aguilera, F.; Alcántara, V. (2011) "De la economía ambiental a la economía ecológica". Ed. CIP-Ecosocial

- <<http://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Actualidad/2011/Aguilera-Alcantara.pdf>> [consulta: 24 de julio de 2015]
- Alcobendas. "Ordenanza municipal para el ahorro del consumo de agua en Alcobendas". Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, 26 de diciembre de 2001, num. 306, p. 157-158
- AQUAESPÑA. (2011). *Guía técnica española de recomendaciones para el reciclaje de aguas grises en edificios*. Barcelona: AQUAESPÑA.
- Arbués, F.; García-Valiñas, M.A.; Martínez-Espiñeira, R. (2003). "Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review". *Journal of Socio-Economics*, vol. 32, p. 81-102, doi:10.1016/S1053-5357(03)00005-2
- Arizmendi, L. J. (2005). *Calculo y normativa básica de las instalaciones en los edificios (tomo i): instalaciones hidráulicas, de ventilación y suministros con gases combustibles*. Pamplona: EUNSA.
- Arrojo-Agudo, P.; et al. (1998) "El análisis de coste-beneficio y su vigencia relativa en la valoración de grandes proyectos hidráulicos". I Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del Agua. Zaragoza, 14-18 de septiembre de 1998. Zaragoza. Zaragoza: Fundación nueva cultura del agua.
- ATECYR (2012). *Guía técnica de ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Madrid: IDAE.
- Aznar, J., Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración Modelos multicriterio*. Valencia: Editorial UPV.
- Azqüeta, D; Ferreiro, A. (1994). *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Madrid: Alianza Editorial
- BAKEAZ; ECODES. (2008). Memoria del Plan integral de ahorro de agua de Vitoria-Gasteiz. (AMVISA, Ed.)  
<<http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/eu/17/02/41702.pdf>> [Consulta: 24 de julio de 2015]
- Beal, C.D.; Makki, A.; Stewart, R.A. (2012). "Identifying the Drivers of Water Consumption: a Summary of Results from the South East Queensland Residential End Use Study". D. K. Begbie, S. L. Wakem, S. J. Kenway and S. M. Bierman (Eds.), *Science Forum and Stakeholder Engagement: Building Linkages, Collaboration and Science Quality*, 19-20 June 2012, Brisbane, Queensland: Urban Water Security Research Alliance.

- Belmeziti, A.; Coutard, O.; de Gouvello, B. (2013). "A New Methodology for Evaluating Potential for Potable Water Savings (PPWS) by Using Rainwater Harvesting at the Urban Level: The Case of the Municipality of Colombes (Paris Region)" *Water*, vol. 5, p. 312-326; doi:10.3390/w5010312.
- Bosch, A., Barriuso, M., & Muños, F. (2013). *Indicadores económicos de la industria hotelera española. Año 2012*. Ernst & Young.
- Brittain, R., Foster, K., Karpiscak, M. (1994). "Desert House: a demonstration, experimentation in efficient domestic water and energy use". *Water Resources Bulletin*, vol. 30, num. 2, p. 329-333.
- Brown, S.R. et al. (2014). "Water efficiency interventions in a non-domestic Building - technical versus behavioural change". Smyth, B. and Jenkins, J. (Eds.), *Proceedings of the Water Efficiency Conference 2014, 9-11 September 2014, Brighton, UK: WATEF.Network/University of Brighton*
- Bruvold, W. (1990). "Extending the model of residential water conservation". *Proceedings of CONSERV 90. The National Conference and Exposition Offering Water Supply Solutions for the 1990s, 12-16 august 1990, Phoenix, Arizona: National Water Well Association.*
- Campbell, H. E.; Johnson, R. M.; Larson, E. H. (2004). "Prices, devices, people, or rules: The relative effectiveness of policy instruments in water conservation". *Review Policy Research*, 21(5), 637-661.
- Carrier Ltd. (2009). *Manual de aire acondicionado*. Barcelona: Marcombo.
- Catalá Moreno, F. (1989). *Cálculo de caudales en las redes de saneamiento*. Barcelona: Paraninfo
- CEDEX (2010). *Evaluación económica de proyectos de transporte*. Madrid: CEDEX.
- Cejudo, J. M. (2009). *DTIE 9.05. Sistemas de climatización*. Madrid: ATECYR.
- CEN (2005). *Pequeñas instalaciones de depuración de aguas residuales para poblaciones de hasta 50 habitantes equivalentes. Parte 3: Plantas de depuración de aguas residuales domésticas prefabricadas y/o montadas en su destino*. EN-12566-3. Bruselas: European Committee for Standardization.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L.W. (1994). "Tormentas de Diseño", en *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Europea (2008). "Comunicación de la Comisión Europea al Parlamento Europeo y al Consejo. Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en

- a la Unión Europea. COM (2007) 414". Bruselas: Parlamento Europeo, 19 de diciembre de 2008.
- Comisión Europea (2009). "DIRECTIVA 2009/125/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de octubre de 2009 por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía". Diario Oficial de la Unión Europea, 21 de octubre de 2009.
- Coombes, P.J. (2002). *Rainwater Tanks Revisited: New Opportunities for Urban Water Cycle Management*. Thesis. University of Newcastle, N.S.W., Australia
- Coombes, P.J. (2007) "Energy and Economic Impacts of Rainwater Tanks on the Operation of Regional Water Systems". *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 11, No. 2, p. 177-191.  
<<http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=901872481586900;res=IELENG>> [consulta: 24 julio de 2015].
- Cubillo, F.; Moreno T.; Ortega, S. (2008). *Cuadernos de I+D+i n°4. Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Subdirección de Comunicación y RR.PP. Canal Isabel II.
- Cuchiella, F., d'Adamo, I. (2015). "A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments". *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2015, Article ID 627454.
- Dalhusien, J. M. et al. (2003). "Price and income elasticities of water demand: A meta-analysis". *Land economics*, vol. 79, num. 2, p. 292-308.
- Dixon, A.; Butler, D.; Fewkes, A. (1999) "Water saving potencial of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination". *Water Resources Research*, vol. 39, num. 5, p.25-32.
- Dole, S. (1964). *Habitable planets for man*. Blaisdell Publishing Company.
- Domenech, L.; Saurí. D. (2011) "A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multifamily buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs". *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, p. 598-608
- Doyle, K.C. (2008). *Sizing the First Flush and its Effect on the Storage-Reliability-Yield Behavior of Rainwater Harvesting in Rwanda*. Master degree. Massachusetts Institute of Technology

- Dworak, T., et al. (2007). "EU Water saving potential (Part 1 –Report)". Berlin: ECOLOGIC-Institute for International and European Environmental Policy.
- ECODES (2008). *Catálogo de tecnologías ahorradoras. Documento técnico de tecnologías ahorradoras de agua para viviendas y edificios de uso público*. Zaragoza: Fundación Ecología y Desarrollo.
- Ehrgot, M., Figueira, J., Greco, S. (2005). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer.
- enHealth Council (2011). "Guidance on use of rainwater tanks". Australian Government Department of Health and Ageing.
- ESPAÑA (1995). "Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el cual se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas". BOE, de 30 de diciembre de 1995, num.312, p. 37517-37519. Madrid: BOE.
- ESPAÑA (1998). Decret 296/1998, de 17 de novembre, pel qual s'amplia l'àmbit del distintiu de garantia de qualitat ambiental als serveis. DOGC nim 2772. (DOGC num 2772). Barcelona: GENERALITAT DE CATALUÑA.
- ESPAÑA (2001). "Ley 10/2001, de 5 de julio de 2001, del Plan Hidrológico". BOE, 6 de julio de 2001, num.161
- ESPAÑA (2003a). "Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis". BOE num. 171. Madrid: BOE.
- ESPAÑA (2003b). "Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social" BOE, núm. 313, de 31 de diciembre de 2003, p.46874 -46992.
- ESPAÑA (2005). "Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica el Plan Hidrológico Nacional". BOE, 23 de junio de 2005, num.149, p. 21846 – 21856
- ESPAÑA (2006a). "REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación" . BOE, 28 de marzo de 2006, num.74, p. 11816-11831
- ESPAÑA (2006b). "Ley 6/2006, de 21 de julio, sobre incremento de las medidas de ahorro y conservación en el consumo de agua en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia". BOE, 8 noviembre 2006, num.267, p. 38889-38892.

- ESPAÑA (2007a). Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. BOE num. 207. Madrid: BOE.
- ESPAÑA (2007b). "Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas". BOE, de 8 de diciembre de 2007, num. 294, p. 50639-50661. Madrid: BOE.
- ESPAÑA (2011). "Real Decreto 187/2011, de 18 de febrero, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía". BOE, 3 de marzo de 2011, num.53, p. 24169-24187.
- ESPAÑA (2013). "R.D. 234/2013, de 5 de abril, por el que se establecen normas para la aplicación del Reglamento (CE) .º 66/2010 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2009, relativo a la etiqueta ecológica de la Unión Europea". BOE num. 97. Madrid.
- ESPAÑA (2015). "Código de Aguas. Edición actualizada a 31 de agosto de 2015" Madrid: Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
- Fewkes, A. (1999). "The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system". *Building and Environment*, vol. 34, p. 765-772
- Fidar, A.; Memon, F.A.; Butler, D. (2010). "Environmental implications of water efficient microcomponents in residential buildings" *Science of the Total Environment*, vol. 408, p. 5828-5835
- Forman, E. (1990). "Random Indices for incomplete pairwise comparasion matrices". *European Journal of Operation Research*, vol. 48, p.152-155.
- France, G. (1989). *Evaluating the effectiveness of a community water conservation demonstration/education project: Casa del Agua. Tucson, Arizona. M.A.* Thesis. Tucson.
- Friedler, E.; Galil, N. (2003). "On site greywater reuse in multi storey buildings: sustainable solution for water saving". 2th International Conference on Efficient use and management or urban water supply. EFFICIENT 2003, 2-4 April 2003. Tenerife: Cabildo de Tenerife.
- Fuertes-Miquel, V.; et al. (2004) "Conceptos básicos sobre el flujo en lámina libre". En *Fundamentos de hidráulica Urbana*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia
- Fuertes-Miquel, V.; Iglesias-Rey, P.L. (2005). *Instalaciones Interiores de Suministro de agua*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia

- Galindo, J. (2014). *Auditoria del consumo de agua del edificio 7D de la UPV*. Trabajo fin de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia
- Generalitat Catalunya (2009) "Resolución MAH/2407/2009, de 29 de abril, por la que se establecen los criterios ambientales para el otorgamiento del distintivo de garantía de calidad ambiental a los productos y a los sistemas que favorecen el ahorro de agua". DOGC, 8 de septiembre de 2009, num. 5460, p. 66627-66632.
- Generalitat Valenciana (2011). "RESOLUCIÓN de 5 de septiembre de 2011, del presidente de la Agencia Valenciana de la Energía, por la que se convocan ayudas del Plan Renove de Electrodomésticos, destinadas a la adquisición de electrodomésticos de alta eficiencia energética". DOGV, de 26 de septiembre de 2011, num. 6616, p. 33003-33009. Valencia: DOGV
- Ghisi, E., Lapolli, D., Martini, M. (2007). "Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil". *Building Environment*, vol.42, p.1654-1666.
- Gilg, A., Barr, S. (2006). "Behavioural attitudes towards water saving? Evidence from a study of environmental actions". *Ecological Economics*, vol. 57, p. 400-414 doi:10.1016/j.ecolecon.2005.04.010).
- González-Pachón, J.; Romero, C. (2004). A method for dealing with inconsistencies in pairwise comparisons. *European Journal of operational research*, 158, 351-361.
- Henderson, J. ; Woodard, G. (2000). *Functioning of aging low-consumption toilets in Tucson a follow-up with rebate program participants*. Phoenix: Water Resources Research Center. The University of Arizona
- Ibáñez J.C.; Martínez, V.; Pérez, D. (2009). *Cuadernos de I+D+i nº7. Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas*. Madrid: Subdirección de Comunicación y RR.PP. Canal Isabel II.
- ICSID. (2015). *Definition of design*.  
<<http://www.icsid.org/about/about/articles31.htm>> [consulta: 24 de julio de 2015]
- Idelchik, I.E. (1986). *Handbook of Hydraulic Resistance. Second Edition*. Hemisphere Publishing Corporation. USA 1986.
- INE (2008). "Estadísticas e indicadores del agua". Madrid: INE.
- INE (2014). "Encuesta del suministro y evacuación de agua. 2012". Madrid: INE.

- IVE (2014). Guía de Proyecto del Perfil de Calidad específico de ahorro de energía y Sostenibilidad  
<[http://www.perfildecalidad.es/pdf/descargas/GUIA\\_DT01\\_V02\\_090114.pdf](http://www.perfildecalidad.es/pdf/descargas/GUIA_DT01_V02_090114.pdf)  
> [consulta: el 24 de julio de 2015]
- Junta de Andalucía. "Decreto 47/2004, de 10 de Febrero, de Establecimientos Hoteleros". BOJA, 2 de marzo De 2004, num 42.
- Karpiscak, M.M.; Brittain, R.G.; Emelty, M.A. (1993). "Residential water conservation and reuse demonstration: Casa del Agua and Desert House". Katherine Hon (Ed) Water management in the 90's : a time for innovation-Proceedings of the 20<sup>th</sup> anniversary conference, 1-5 May 1993. Seattle: American Society of Civil Engineers.
- Kenney, D.S. et al. (2008). "Residential Water Demand Management: Lessons from Aurora, Colorado". Journal of the American Water Resources Association, vol 44, num. 1, p. 192-207.
- Krishna, H.J.; et al. (2005) *The Texas Manual on Rainwater Harvesting*. Austin: Texas Water Development Board
- Lallana, C. et al. (2001). *Sustainable water use in Europe (part 2). Demand Mangement. EAA Enviromental issue report n° 19*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Lee, M.; and Tansel, B. (2013). "Water conservation quantities vs customer opinion and satisfaction with water efficient appliances in Miami, Florida". Journal of Environmental Management, vol. 128, p. 683-689
- Li, D.H.; Yang, L.; Lam, J.C. (2012). "Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones – A review". Energy, Volume 42, num. 1,p. 103-112.
- Linn, M. (2010). "Cost-benefit analysis: a primer". The Bottom Line, Vol. 23, num. 1, pp. 31 - 36.
- López-Patiño, G.; et al. (2003). "Regulación de estaciones de bombeo". Estaciones de bombeo en hidráulica urbana. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- López-Patiño, G. (2005a). *Proyecto AECO2. Estudio de consumos del Hotel Rey Don Jaime en Valencia*. Valencia: UPV
- López-Patiño, G. et al. (2005b). "Análisis de la implantación de medidas de gestión de la demanda en un hotel urbano". 5<sup>o</sup> Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua (SERA 2005) Valencia: UPV

- López-Patiño et al. (2008a). Aprovechamiento del agua de condensación como fuente alternativa de suministro a edificios. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (págs. 1-9). IAHR.
- López-Patiño et al. (2008b). Dimensionado económico de depósitos domésticos de almacenamiento de agua de lluvia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR.
- López-Patiño et al. (2009). Dimensionado de discriminadores de lluvia para aguas poco contaminadas en cuencas de reducido tamaño. 9º Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable (SEREA 2009) (págs. 1237-1245). Valencia: UPV.
- López-Patiño, G; Martínez-Solano, F.J. (2010). *Máquinas Hidráulicas*. Valencia: Editorial UPV
- López-Patiño et al. (2011). Dimensionado económico de depósitos domésticos de aguas pluviales mediante series temporales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2, 51-64.
- López-Patiño, G.; Navarro, M.; Valero, A. (2012). *Guía de sistemas de ahorro de agua*. Valencia: Fundación Instituto Valenciano de Edificación
- López-Patiño et al. (2013). Evaluación de la idoneidad de nuevos dispositivos y sistemas que reducen la demanda urbana de. "III Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2013) (págs. 99-106). Valencia: Marcombo ediciones técnicas.
- Madrid (2006). "Ordenanza de gestión y uso eficiente del agua en la ciudad de Madrid". Boletín Oficial del Ayuntamiento de Madrid, de 22 de junio de 2006. num. 5709 p. 2410-2443.
- Maggioni, E. (2015). "Water demand management in times of drought: What matters for water conservation". *Water Resources Research*, vol.51, p.125-139.
- MAGRAMA (2014). "Confederación Hidrográfica del Júcar. Plan hidrológico de cuenca 2009-2015". Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Martínez-Solano, F.J.; et al. (2005). "Interpretación del concepto de tiempo de concentración en modelos hidrológicos basados en métodos de depósito. Aplicación al módulo de cálculo hidrológico del programa SWMM 5". V Seminario sobre planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua, 29/11-2/12 de 2005. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

- Martinson, B.; Thomas, T. (2002). "Economically viable domestic roofwater harvesting". 28th WEDC Conference, 18-22 november 2002. Calcutta, India, 2002
- Méndez, C.B.; et al. (2011) *Effect of roof material o water quality for rainwater harvesting systems- additional physical, chemical, and microbiological data*. Austin: Texas Water Development Board
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Waste water treatment. Treatment and reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Meter Master (2015). Trace Wizard.  
<[http://www.meter-master.com/products/software/trace\\_wizard.html](http://www.meter-master.com/products/software/trace_wizard.html)>  
[consulta: 24 de julio de 2015]
- Millet, I., Saaty, T. (2000). "On the relativity of relative measures accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP". *European Journal of Operational Research*, vol. 121, p. 205-212.
- Millet, I., Schoner, B. (2005). "Incorporating negative values into Analytic Hierarchy Process". *Computers and Operations Resarch*, vol.32, p.3163-3173.
- MMA (2000). *Libro Blanco del Agua*. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente.
- MMA (2010). *Plan nacional de reutilización de aguas. Informe de sostenibilidad ambiental*. Madrid: Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente.
- Molina et al. (2004). *Estudi del consum d'aigua als edificis de la regió metropolitana de Barcelona. Situación actual i possibilitats d'estalvi*. Barcelona: Fundació AGBAR.
- Mourad, K.A.; Berndtsson, J.C.; Berndtsson, R. (2011). "Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria". *Journal of Environmental Management*, vol. 92, p. 2447-2453.
- Navarro-Escudero, M.; Lopez-Patiño, G.; Valero, A. (2012). Guide of water saving systems in buildings. *Inovação na Construção Sustentavel. Innovation on Sustainable Construction. CINCOS 2012* (págs. 900-910). Plataforma para a Construção Sustentavel.
- Olmstead, S.M.; and Stavins, R.N. (2009). "Comparing price and nonprice approaches to urban water conservation". *Water Resources Research*, vol. 45, doi:10.1029/2008WR007227
- Opitz, E.M. et al. (1999). *Residential end uses of water*. Denver, CO: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

- Othman, M., Repke, J.-U., Wozny, G. (2010). "Incorporating negative values in AHP using rule-based scoring methodology for ranking of sustainable chemical process design option". Pierucci, S. (Ed.) en 20th European Symposium on computer aided process engineering. Porto, 6-9 june 2010. Elsevier.
- Parkpoom, S.; Harrison, G.P.; Bialek, J.W. (2004). "Climate change impacts on electricity demand". 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. Vol. 3, págs. 1342 - 1346. Bristol, UK: IEEE.
- Peñate, B., García-Rodríguez, L. (2012). "Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology". Desalation, vol. 284, p.1-8.
- Pérez-Urdiales, M.; García-Valiñas, M.A; Martínez-Espiñeira, R. (2014). "Responses to Changes in Domestic Water Tariff Structures: A Latent Class Analysis on Household-Level Data from Granada, Spain". Environmental and Resource Economics, DOI 10.1007/s10640-014-9846-0
- Persyn, R.A; Porter, D.O.; Silvy, V.A. (2004) Rainwater Harvesting . Austin: Texas Cooperative Extension. The Texas A&M University System
- Pinazo, J. M. (1997). *Manual de climatización. Tomo I: Transformaciones psicrométricas*. Valencia: UPV.
- POST (2000). Water efficiency in the home. Parliamentary Office of Science and Technology. Note 135. London: Parliamentary Office of Science and Technology.
- RainHarvesting, Ltd. (2015) <<http://rainharvesting.com.au/product/downpipe-first-flush-diverters>> [consulta: 24 de julio de 2015]
- REMOSA (2014). Tarifa General 2014.  
<<http://www.gduran.com/gxpareas/Tarifas2/REMOSA.pdf>> [consulta: 24 de julio de 2015]
- Roebuck, R.M.; Oltean-Dumbrava, C.; Tait, S. (2011). "Can simplified design methods for domestic rainwater harvesting systems produce realistic water-saving and financial predictions?". Water and Environment Journal, doi:10.1111/j.1747-6593.2011.00295.x
- RST. (2015). RST Watersavers for the tap.  
<<https://www.rstcom.de/Cat/watersavers%20for%20the%20tap>> [consulta: 24 de julio de 2015]

- Saaty, T. (1980). "The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation". New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. (2013). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T., Vargas, L. (2006). *Decision making with the analytic network process. Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. Springer.
- Sapag, N. (2007) "Evaluación de proyectos de inversión en la empresa". Méjico: Pearson Educación
- Sartori, D. (2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*. Bruselas: European Comission.
- Shiklomanov's, I. (1993). "World fresh water resources". P. H. Gleick (Eds.), *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press.
- South Australia Government (2006a). "South Australia Housing Code. Amendment 13. Clause D.11. Water Efficiency". South Australian Government.
- South Australia Water (2006b). *Rain Water Plumbing Guide*. South Australian Water. [guide.pdf](#)> [consultado: 24 de julio de 2015]
- Still, G.T.; Thomas, T.H. (2002). "The Optimum Sizing of Gutters for Domestic Roofwater Harvesting" Warwick: WP56. DTU. University of Warwick
- Sullivan, W. G.; Wicks, E.M. ; Luxhoj, J.T. (2004). "Ingeniería económica de DeGarmo". Méjico: Pearson Education
- TEXAS (1997). "Texas water code. Art. 11.036". Acts 1997, 75th Leg., Sept. 1, 1997. Texas: Texas Legislative Council
- TEXAS (2005a). "Texas water code Art. 36.1071". Acts 2005, 79th Leg., September 1, 2005. Texas: Texas Legislative Council
- TEXAS (2005b). "Texas Health and Safety Code. Art. 341.042". Acts 2005, 79th Leg., june 17, 2005. Texas: Texas Legislative Council
- Texas Rainwater Harvesting Committee (2006). *Rainwater Harvesting Potential and Guidelines for Texas*. Austin, Texas: Texas Water Development Board.
- Thomas, R., Wilson, A. (1994). "Water Supply for Roman Farms in Latium and South Etruria". *Papers of the British School at Rome*, Vol. 62, pp. 139-196 .

- Ueda, T., Hata, K. (1999). "Domestic wastewater treatment by a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration". *Water Research*, vol. 33, num.12, p.2888-2892.
- Unión Europea (2000). "Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas". DOUE, núm. 327, de 22 de diciembre de 2000, p.1-73 Luxemburgo: Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- United Nations (1948). "Resolución 273 A (III). Declaración Universal de los Derechos del Hombre". Paris.
- United Nations (1966). "Pacto Internacional sobre derechos económicos, sociales y culturales". Paris.
- United Nations (2002). "The right to water (arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights)". Ginebra.
- URALITA (2005). *Manual de depuración*. Madrid: Paraninfo.
- USDA NRCS (1986). "Urban hydrology for small watersheds. Technical Release n° 55" Washington D.C.: Soil Conservation Service.
- USGS (2015). "The USGS Water Science School".  
< <http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html> > [consulta: 24 de julio de 2015]
- Vaidya, O., Kumar, S. (2006). "Analytic hierarchy process: An overview of applications". *European Journal of Operation Research*, vol. 169, num.1,p.1-39.
- Villareal, E.L.; Dixon, A. (2005). "Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden". *Building and Environment*, vol. 40, p. 1174–1184.
- Viñuales, V. (2000). "Zaragoza, ciudad ahorradora de agua". *Informes de la Construcción*, Vol. 51, p.465.
- Viñuales et al. (2001). *La Ecoauditoría del Agua en la Oficina*. Zaragoza: Fundación Ecología y Desarrollo.
- Weingartner, H. M. (1969). "Some New Views on the Payback Period and Capital Budgeting Decisions". (T. U. College of Business Administration, Ed.) *Management Science*, 594-607.
- Wilkes, C. et al. (2005). "Quantification of exposure-related water uses for various U.S. subpopulations". USEPA Exposure and Dose Research Branch. EPA/600/R-06/003. Las Vegas: U.S.EPA.

- Worthington, A. C., Hoffman, M. (2008). "An empirical survey of residential water demand modelling". *Journal of Economic Survey*, vol.22, num.5,p. 842-871.
- Zadeh, S.M.; Hunt, D. V.L.; Rogers, C.D.F. (2014). "Socio-Technological Influences on Future Water Demands". *Water*, vol.6, p.1961-1984, doi:10.3390/w6071961