

### **3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

#### **3.1 MÉTODOS EXISTENTES DE PROTECCIÓN CONTRA HELADAS EN LOS CAPTADORES SOLARES PLANOS**

En el documento DB HE Ahorro de energía del código técnico de la edificación [17] se especifica el uso de sistemas indirectos para la instalaciones solares de calentamiento de ACS. Debido a esta característica, el sistema de protección frente a heladas recomendado se basa añadir compuestos químicos al circuito primario para que no se produzca la congelación del agua que circula por el del mismo en condiciones climáticas frías.

A pesar de ello, en los siguientes párrafos se mencionarán todo tipo de métodos existentes en la protección de las instalaciones de agua corriente sanitaria calentada por captadores solares. Hay que tener en cuenta que este estudio es a título académico y no olvidar que muchas de las soluciones descritas a continuación no serían posibles bajo la legislación actual. Por otro lado, se abre la posibilidad de aplicación de dichas soluciones en condiciones futuras.

##### **3.1.1 Recirculación del agua en el circuito primario**

La recirculación de agua se trata de un método adecuado únicamente para uso en zonas en las que en su clima sólo existen breves periodos de bajas temperaturas que puedan provocar el congelamiento del agua en el captador [1].

Como se describe en [1] y [18] la protección frente a las heladas consiste en activar la bomba que se encarga de la circulación del agua cuando la temperatura del colector se sitúe levemente por encima de la temperatura de congelación del agua (en torno a los 3°C). Ésta temperatura es detectada por una sonda colocada en el mismo captador, que manda la señal de la medida de temperatura a un dispositivo electrónico llamado central antiheladas encargado de activar la bomba en el momento preciso.

Se trata de un sistema sencillo, con poco trabajo de mantenimiento y, por lo tanto, de bajo coste económico. Esta ventaja compensa el hecho de que parte de la energía acumulada se pierde al hacer circular el caudal del agua por los captadores cuando existen condiciones externas frías. Dicha pérdida de energía se eleva enormemente si el proceso es muy

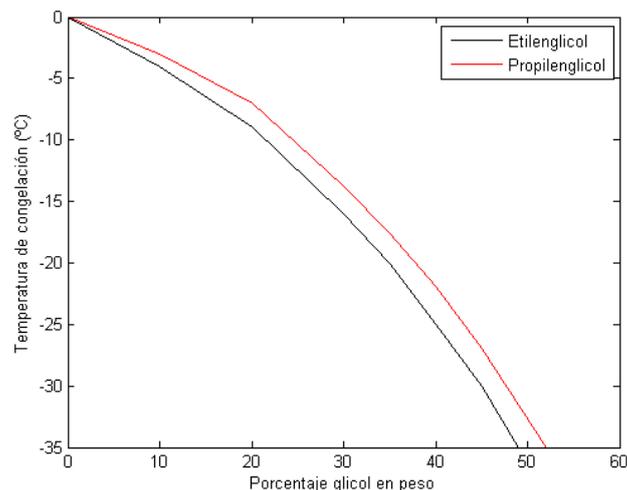
continuado. Esta es la razón por la que este método sólo se recomienda para zonas donde el riesgo de heladas es bajo y se produce por periodos breves de tiempo.

La fiabilidad de la instalación es casi totalmente dependiente de la precisión de la sonda de temperatura y del correcto funcionamiento de la central anti heladas. Estos elementos deben someterse a un mantenimiento adecuado y continuado.

### 3.1.2 Mezcla anticongelantes

Este procedimiento es el recomendado en el código técnico de la edificación [17]. Por lo que es el más extendido entre las instalaciones solares de ACS actuales. No únicamente es mencionado en el ámbito legislativo, sino que se ha sido tenido en cuenta en varios estudios especializados como el caso del artículo escrito por Beckman [5] u otros cómo [32].

El fluido que circula por el lazo del captador solar pasa de ser agua potable para consumo humano a una mezcla de agua con sustancias anticongelantes como etilenglicol o propilenglicol [18]. El punto de fusión de esta mezcla se produce a una temperatura más baja que la del agua pura, evitando así la congelación en condiciones climatológicas adversas. En la Figura 1 se observa la variación de la temperatura de congelación de la mezcla con los líquidos anticongelante mencionados anteriormente.



**Figura 1:** Temperatura de congelación mezclas anticongelantes [18].

Debido a que la composición del fluido que se calienta en los captadores solares no es apta para el consumo humano, es necesario el uso de sistema indirecto. Es decir, se realiza la transferencia de calor del fluido de trabajo al agua para consumo en un intercambiador cuya

ubicación le protege de los efectos de las heladas. Como es conocido, en dicho proceso se produce una pérdida de energía y una disminución de la temperatura del agua de consumo respecto al sistema directo. La razón de esto es la diferencia de temperatura que es necesaria entre los dos fluidos que circulan por el intercambiador intermedio para que se produzca la transferencia de calor en dicho intercambiador.

Otro inconveniente se trata de la menor cantidad de energía transportada por el fluido ya que existe una disminución del calor específico de la mezcla anticongelante respecto al agua potable para el consumo. Esto provoca la menor capacidad de transporte de energía desde el captador hacia el intercambio de energía con el agua a consumir.

La fiabilidad de esta técnica está plenamente reconocida. La seguridad en el uso de mezcla anticongelantes depende fuertemente de la elección de la proporción adecuada de aditivo anticongelante para el clima de la zona donde está situada la instalación a proteger.

Por otro lado, este procedimiento requiere un cierto mantenimiento a la largo de la vida útil de la instalación. Es necesario el control de la concentración del anticongelante en la mezcla de trabajo ya que puede disminuir su concentración con fugas en el circuito. Estas fugas deben de ser repuestas con agua de red. También es indispensable la sustitución del fluido anticongelante de manera periódica porque tiende a perder sus propiedades con el paso del tiempo.

Por último, conviene indicar que es un método muy adecuado para zonas en que las condiciones de heladas se dan con mucha frecuencia ya que con el porcentaje de líquido anticongelante adecuado se puede trabajar con el fluido a temperaturas muy bajas, como se ve en la Figura 1.

.

### **3.1.3 Resistencia Eléctrica en captadores**

La instalación de una resistencia eléctrica [18] a lo largo de los tubos que contienen el agua en el captador es usada como procedimiento de protección frente a la formación de heladas. Esta resistencia se pone en funcionamiento cuando la temperatura del agua esté ligeramente por encima de la congelación, calentando el fluido y evitando así la posible congelación del agua. [38]

Para su funcionamiento es necesario un sistema de control electrónico similar al usado el método de recirculación del agua en el circuito primario. Dicho sistema activa o desactiva

la resistencia eléctrica según la señal que es enviada por una sonda de temperatura situada en el captador.

El buen funcionamiento de la sonda de temperatura y del sistema de control electrónico son claves en el funcionamiento de este método, siendo los factores más importantes que determinan la fiabilidad del mismo. Un adecuado mantenimiento de estos sistemas es indispensable para un adecuado funcionamiento de la instalación.

El principal inconveniente de este método es el aporte de energía externa al sistema necesario, disminuyendo el rendimiento global del sistema. La bajada del rendimiento será más o menos acusada en función del número de horas al año que sea necesario el uso de la resistencia eléctrica.

Por lo tanto, la instalación de este método es muy poco rentable para zonas donde el uso de la resistencia eléctrica se prolongue durante periodos largos de tiempo. Esto hace que éste método sólo sea recomendable para zonas donde la heladas sean muy poco frecuentes.

La gran ventaja que ofrece el uso de esta técnica es la posibilidad de utilización en zonas donde se alcancen temperaturas extremadamente bajas. La única condición que debe cumplir en estos casos es un dimensionamiento de la resistencia eléctrica adecuado para poder mantener el agua en estado líquido en condiciones tan extremas.

Existe otro tipo de método, no muy extendido con resistencias eléctricas aprovechando el efecto termosifón que permite la colocación del depósito de agua caliente a la intemperie y la protección de heladas de las conducciones que llegan y salen de él. Se menciona el mismo en el artículo realizado por Prapas [28].

La instalación de calentamiento solar de agua sanitaria se realizaría según el esquema mostrado en la Figura 2.



### **3.1.4 Drenaje automático de la instalación**

Esta forma de protección es nombrada en varios estudios como [19] y [5]. Consiste en un método más agresivo que los anteriores ya que evita la presencia del fluido de trabajo en las partes de la instalación que puedan estar expuestas a temperaturas por debajo del punto de congelación del agua. Todo ello se realiza mediante un adecuado sistema de control automático.

Cuando el sensor de temperatura alcanza un valor ligeramente superior al punto de congelación, el sistema de control actúa sobre la bomba (similar al caso de recirculación de agua en el circuito primario) y sobre una electroválvula de drenaje que vacía el circuito de agua de los captadores. Para garantizar un correcto funcionamiento del sistema, el circuito debe de permanecer vacío hasta que se aumente la temperatura en el colector.

En caso de diseño óptimo, el agua drenada se lleva a un depósito auxiliar protegido de las condiciones adversas del exterior. Adicionalmente, es necesario prever un sistema de llenado de la instalación para la recuperación del líquido situado en el depósito auxiliar.

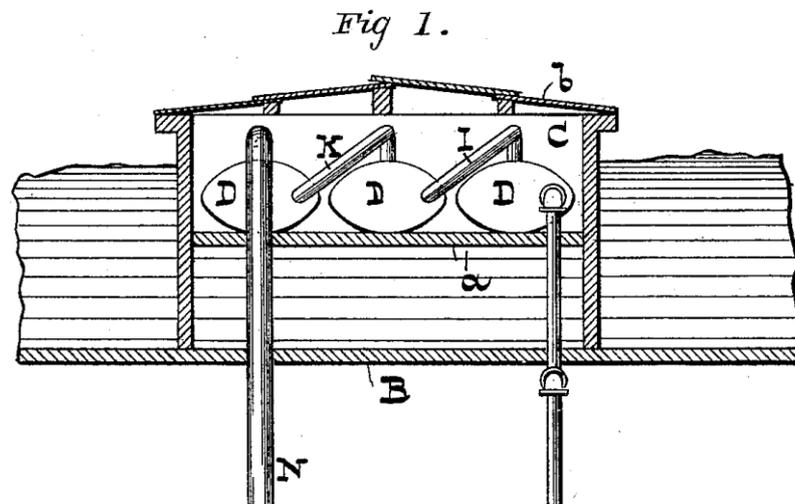
Existen varios inconvenientes para este método descritos en [1]. Uno de ellos es la alta inversión inicial necesaria y las pérdidas de fluido si no se dispone de un depósito auxiliar. Otro sería el gran mantenimiento que requiere la instalación, sobre todo en el proceso de llenado del circuito primario una vez que se han garantizado la desaparición de condiciones de helada que implica la necesidad de purgar de aire este circuito (procedimiento costoso).

Por otra parte, cualquier avería en el sistema de control o en las válvulas que se encargan del drenaje podría tener consecuencias muy graves para la instalación. Si a esto se une la gran cantidad de procesos en los que se pueden presentar problemas como en el vaciado o llenado de agua de la instalación y la purga de aire entre otros, hace que la fiabilidad de la instalación sea muy baja.

Aunque existan bastantes dudas acerca de la fiabilidad del sistema, una de las ventajas que presenta este método es que puede soportar temperaturas muy bajas si todo funciona correctamente. A pesar de esto último, no es método muy recomendable debido a la gran cantidad de inconvenientes que presenta y su alto costo de mantenimiento [1]. Sin embargo, debido a su efectividad (siempre y cuando todos los procesos asociados se lleven a cabo de forma adecuada) ha sido utilizado tanto en lugares dónde las heladas son muy pocas frecuentes [35] como dónde sí lo son [8].

### 3.1.5 Sistema integrado de colección de energía y almacenamiento

Este sistema llamado “*Integrated collector/storage solar water heaters*” (ICSSWH) en inglés combina la función de almacenamiento de agua caliente con la de colector solar en un mismo dispositivo. No se trata de un procedimiento novedoso si se tiene en cuenta el hecho de la idea fue patentada en Estados Unidos en 1891 [19]. El concepto patentado se trata de una serie de recipientes metálicos en los que se almacenaba el agua situados bajo el tejado y protegidos frente a la intemperie por un techo de cristal. El esquema original se muestra en la Figura 3.

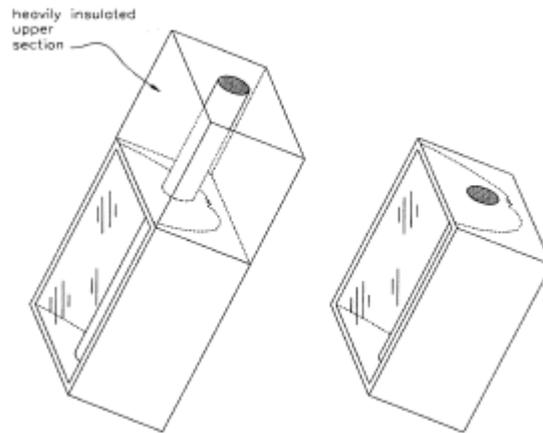


**Figura 3:** Esquema de la patente del sistema conjunto almacenamiento/calentamiento del agua [19].

En los desarrollos modernos de este sistema como el presentado en [33] el concepto del sistema no ha cambiado. Como se aprecia en el esquema de los prototipos usados en este estudio (Figura 4) sigue consistiendo en un vaso metálico de almacenamiento de agua protegido de las condiciones climatológicas por una superficie transparente.

El estudio [33] se centra en la viabilidad de utilización de este dispositivo en zonas de clima atlántico de Europa. La idoneidad del mismo radica es que no existen problemas potenciales de heladas bajo unas condiciones frías exteriores moderadas como la que se suele dar en estas zonas porque el agua almacenada se mantiene en todo momento por encima de la temperatura de congelación gracias al aislamiento con el exterior y a la energía absorbida en los periodos de irradiación solar.

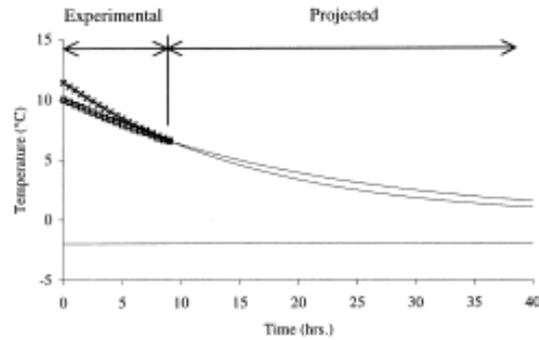
Se prueban dos tipos de prototipos en condiciones de invierno moderadas. Ambos consisten en un recipiente cilíndrico de aluminio situado en el interior de un cajón forrado de superficie reflectante de forma que la radiación incidente se concentre el vaso contenedor. Además el vaso contiene un tubo interior construido según las especificaciones descritas en [34]. Con el fin de evitar las pérdidas de calor por radiación en onda larga se cubre la superficie de cada vaso con una superficie selectiva de la radiación. Los prototipos se muestran en la Figura 4.



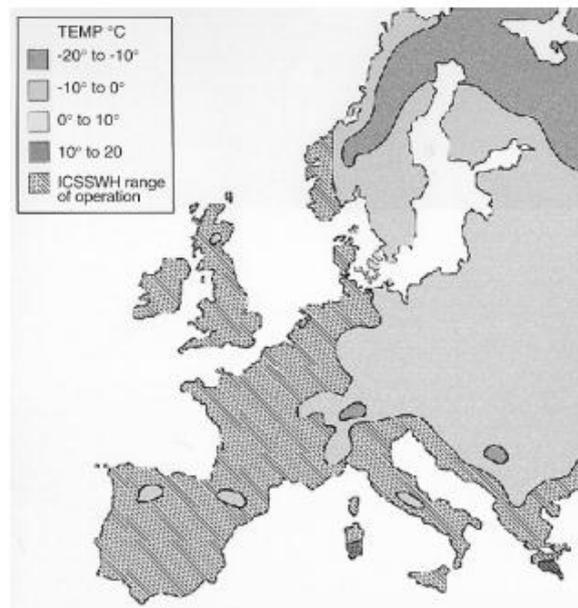
**Figura 4:** Esquema de los prototipos estudiados en [33].

La principal diferencia entre ellos se trata de que la parte superior de uno de ellos se encuentra fuertemente aislada térmicamente del exterior mientras que en el otro no existe diferenciación entre las partes del depósito. La diferencia de densidades hace que el agua más caliente se mantenga en la zona aislada mientras que la más fría se caliente en la zona inferior.

Los sistemas fueron probados a la intemperie durante los meses de invierno en Ulster (Reino Unido) mostrando resultados satisfactorios. No se produjo la congelación del agua en momento alguno. Con los resultados obtenidos se pudo realizar una aproximación del dispositivo a con condiciones exteriores de  $-2^{\circ}\text{C}$  (Figura 5) y con ello realizar un predicción de las zonas de Europa donde tiene una aplicación potencial estos dispositivos (Figura 6).



**Figura 5:** Actuación predicha de los dispositivos estudiados en [33].



**Figura 6:** Zonas de aplicación de los dispositivos estudiados [33].

La Figura 5 muestra que bajo condiciones de heladas moderadas el sistema mantiene su funcionalidad durante varias horas. Este tipo de clima se da en la mayoría del oeste de Europa y el Mediterráneo como se muestra en la Figura 6, pudiéndose implantar este dispositivo en multitud de países.

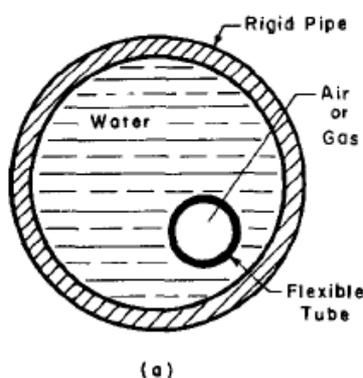
El principal inconveniente que presentan estos dispositivos es la menor eficacia de absorción de la energía recibida de la irradiación del sol respecto a los sistemas convencionales. Esto hace que sea necesaria una mayor superficie de captación para satisfacer una misma demanda de agua caliente sanitaria.

### 3.1.6 Métodos experimentales de protección anti heladas

Existen otros métodos, la mayoría experimentales, para una protección contra heladas que sea pasiva. Hay que destacar que todos los procedimientos que se explicarán a continuación no han sido desarrollados para la comercialización. Por tanto, son soluciones que aún **no se encuentran en el mercado**.

#### - Introducción tubo flexible en los tubos susceptibles de congelación

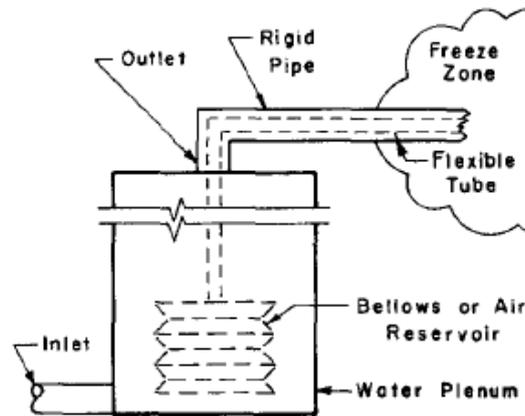
En este método, que se expone en un artículo de investigación [7] se permite la congelación del agua en los tubos haciendo que el incremento de volumen producido en la congelación sea compensado por la contracción de un gas contenido en un tubo flexible situado en el interior de la tubería por donde circula el agua. El esquema del mismo se muestra en la Figura 7



**Figura 7:** Esquema del método experimental.

En este caso, al ser el tubo muy flexible todo el incremento de volumen se emplea en contraer el tubo flexible pudiéndose expandir la mezcla agua-hielo de manera libre. De esta forma se evita la sobrepresión excesiva que se produciría en la tubería si ésta estuviera completamente llena de agua.

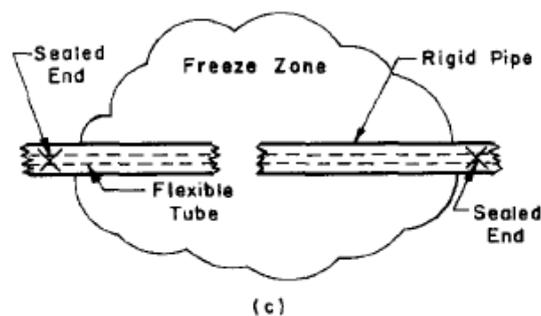
En el artículo [7] se desarrollan dos variantes del mismo método. En la primera el gas situado en el interior del tubo flexible estaría conectado a un reservorio del mismo, por lo que dicho gas no modificaría sensiblemente su presión con el cambio de temperatura y volumen del agua situada en interior del tubo metálico. Esta configuración es mostrada en la Figura 8.



**Figura 8:** Variante del método con conexión con reservorio gas [7].

Para el caso descrito anteriormente el volumen total de aire (si se tiene en cuenta el reservorio de mismo) es mucho mayor que el volumen que aumenta el agua. De esta forma la contracción del aire es pequeña y la presión alcanzada en el interior al aumentar el volumen del agua durante su congelación no es elevada.

En la segunda no existiría tal conexión por lo que había que tener en cuenta la contracción de gas con la temperatura y su compresión al aumentar el volumen del agua exterior. Un esquema de la misma se muestra en la Figura 9.



**Figura 9:** Variante con sin reservorio de aire.

Pese a la correcta descripción realizada del procedimiento realizado en [5], no se mencionan nada acerca sobre los materiales utilizados. Además, las consideraciones sobre las geometría de las dos disposiciones están basadas en ecuaciones de estado algebraicas que cómo se conocen son meras aproximaciones del comportamiento de la sustancias.

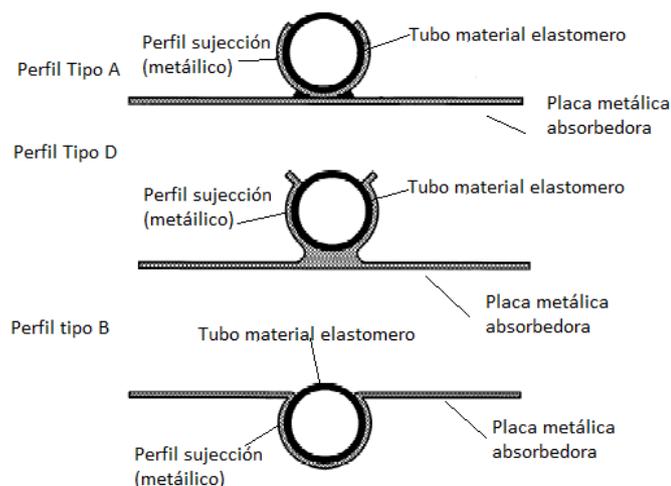
- **Captador compuesto por material elastómero**

En el estudio desarrollado por Bartelsen [4] se describe el desarrollo de un diseño novedoso de captador solar. Este tipo de dispositivo consiste en la combinación de una placa metálica que actuaría como receptora de la radiación solar con tubos de material elastómero usados para el transporte del fluido a calentar (ver Figura 10).

Existen numerosas ventajas que a priori supondría el uso de este dispositivo, entre las que destacan.

- Debido a las características del material elástico, el sistema propuesto no sufre ningún daño como consecuencia de la expansión del fluido en su interior cuando se produce la congelación del mismo. Por lo tanto, no es necesario el uso de aditivos anticongelantes.
- Es posible el uso del colector con fluidos sucios y/o corrosivos como el agua de mar y agua salobre debido a la resistencia química del elastómero y a la menor tendencia de producirse depósitos sobre superficie de este tipo de material.
- El mantenimiento del dispositivo frente a otros sistemas de protección de los efectos de las heladas es prácticamente nulo.
- No consume ninguna energía adicional para la protección de heladas y evita depósitos de cal a diferencias de muchos otros sistemas.

En este artículo se realiza el estudio tanto teórico como experimental de la actuación de distintos prototipos de colector solar basados en esta idea. Algunos de ellos se pueden observar en la Figura 10.



**Figura 10:** Distintos dispositivos usados en el estudio [4].

El principal inconveniente que presenta esta propuesta es la baja conductividad térmica que en general presentan los materiales elastómeros. Para la construcción de los prototipos se han desarrollado nuevos materiales elastómeros añadiendo a los originales distintas cantidades de partículas de carbono y aluminio y así mejorar tanto su conductividad térmica como propiedades mecánicas.

El resultado de los ensayos realizados muestra que para ciertas combinaciones de tipos de perfiles y material se pueden alcanzar conductancias térmicas de transferencia térmicas interior (desde la placa de metal hasta el fluido) del orden de  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Estando este valor para un captador de calidad media entre  $40 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $60 \text{ W/m}^2\text{K}$  [4].

En adicción al resultado anterior, esta técnica muestra una excelente resistencia a las heladas, aunque estas se produzcan de manera continuada y cíclica.

A falta de posteriores estudios para mejorar la conductividad térmica del captador y la reducción del precio total del dispositivo resulta a priori un método eficaz para evitar los problemas asociados a las heladas. Pudiendo hallar su mayor aplicación en lugar con climatología fría.

#### - **Colector solar por medio de tubo termosifón**

El tubo termosifón conocido como “*heat-pipe*” en inglés es un elemento de calor muy utilizado en la industria. La principal característica del mismo es la existencia en su interior de un fluido que se encuentra en cambio de fase. Esta característica hace que la transmisión de calor por convección al exterior del tubo sea elevada.

En el estudio realizado por Mathioulakis [22] estudia la aplicación de un sistema domestico de “*heat-pipe*” que transmita calor por el proceso de ebullición de un fluido en el evaporador (intercambiador de calor) y condensación del mismo fluido el condensador cuya fuente de calor sea la radiación solar.

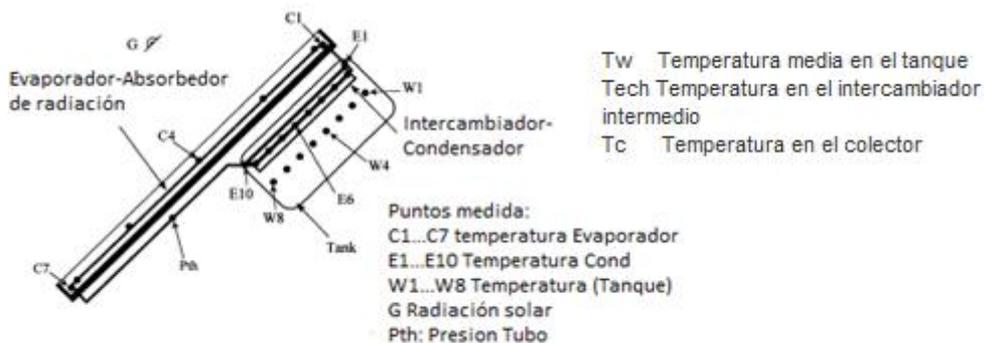
Las principales ventajas del uso de este dispositivo son las siguientes.

- La capacidad del sistema de transportar grandes cantidades de calor a lo largo distancias considerables con la única penalización de una pequeña bajada en la temperatura del fluido.

- En el caso de producirse la congelación en el tubo, esta no produciría ningún daño. Esto se debe a que el tubo está dimensionado para contener fluido en fase líquida y fase gaseosa siendo el volumen específico de la última fase mucho mayor del que se produciría al cambio de fase sólida.
- No existen partes móviles.
- No es necesario energía de bombeo para el sistema.

La forma estudiada en [22] consiste en colocar el evaporador en el captador solar de manera que el calor obtenido de la irradiación solar se invierta en provocar la ebullición del fluido de trabajo. Esta fase gaseosa es transmitida a través del tubo termosifón a un intercambiador situado en el tanque de almacenamiento de agua donde se cede calor al agua contenida en el mismo por medio de la condensación del fluido (condensador).

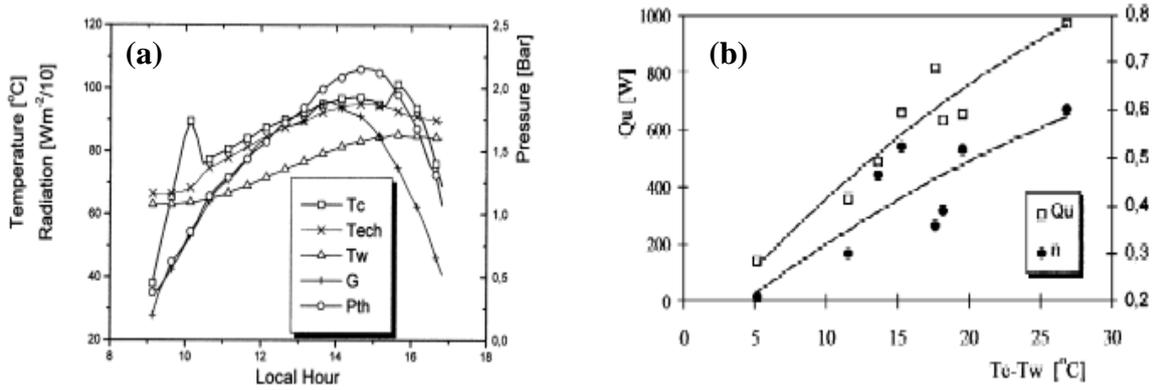
La circulación del fluido se realiza aprovechando la diferencia de densidad del fluido con la temperatura y el cambio de fase (efecto termosifón). Por lo cual no es necesaria la instalación de ningún sistema de impulsión del fluido. El esquema del prototipo se muestra en la Figura 11.



**Figura 11:** Distintos dispositivos usados en el estudio [9].

El fluido de trabajo de este sistema se trata de etanol ( $C_2H_5OH$ ) debido a que punto de cambio de fase (tanto presión como temperatura) están dentro de las temperaturas necesarias para la transferencia de calor a la ACS y presiones que pueden ser soportadas por el tubo.

Se realiza un estudio del comportamiento del sistema para un día soleado, siendo algunos de los resultados de la variación de los parámetros mostrados en la Figura 11 los siguientes.



**Figura 12:** (a) Variación de distintos parámetros [9]. (b) Eficacia captación frente a la temperatura del agua en el tanque [9].

Con  $Q_u$  energía transmitida y  $\eta$  rendimiento de captación.

Las principales conclusiones son dos: el aumento de la radiación no supone un gran aumento de la temperatura del agua como se aprecia en la Figura 12 (a). La energía obtenida se invierte principalmente en subir la presión del tubo termosifón, incrementando así levemente la temperatura del fluido. A pesar de que la eficacia de transmisión aumenta a medida que la temperatura del agua en el tanque sea menor (Figura 12 (b)) existe una gran inercia térmica del dispositivo (se puede ver la lentitud de calentamiento del agua en la Figura 12 (a)) que hace que el calentamiento por este método del agua sea más lento que en otros anteriormente vistos.

### 3.1.7 Comparación de los sistemas

En las Tabla 1 y Tabla 2 se muestra la descripción de las principales ventajas y desventajas de los métodos anteriormente descritos a modo de resumen.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Recirculación del agua en el circuito primario.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillo y de bajo coste.</li> <li>- Poco mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de energía eléctrica adicional y pérdida energía en la recirculación.</li> <li>- Fuertemente dependiente de la fiabilidad del sistema de control.</li> <li>- Recomendado únicamente para zonas con poca posibilidad de helada.</li> </ul>
<b>Mezclas anticongelantes.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método muy fiable.</li> <li>- Válido para cualquier tipo de climatología.</li> <li>- No necesita un sistema de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Obligatoriedad de sistema indirecto (rendimiento menor por el intercambiador).</li> <li>- Mantenimiento (sustitución del fluido anticongelante).</li> </ul>
<b>Resistencia en captadores.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Posibilidad de uso en lugares con climatología extrema (muy fríos).</li> <li>- Coste inicial bajo.</li> <li>-Uso en sistemas directos e indirectos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necesidad de consumo de energía del exterior. (Alto consumo en climas fríos).</li> <li>-Fuertemente dependiente de la fiabilidad del sistema de control.</li> </ul>
<b>Drenaje automático de la instalación.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Válido para cualquier tipo de climatología, puede soportar temperatura extremadamente bajas.</li> <li>-Uso en sistemas directos e indirectos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alto coste de instalación (depósito auxiliar, válvulas).</li> <li>-Problemas asociados al drenaje y llenado de la instalación (acumulación de aire).</li> <li>- Baja fiabilidad.</li> </ul>
<b>Sistema integrado de colección de energía y almacenamiento.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sistema compacto y simple.</li> <li>-Ideal para climas fríos moderados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No muy extendido.</li> <li>- Baja eficiencia de captación.</li> <li>- Lentitud del sistema.</li> </ul>

**Tabla 1:** Comparación de los métodos descritos.

En la Tabla 2 se muestran las desventajas y ventajas potenciales de los métodos enmarcados dentro de los llamados experimentales. Se tratan de procedimientos o ideas todavía no plenamente desarrolladas y no disponibles en el mercado.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Introducción tubo flexible en los tubos susceptibles de congelación.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Uso en sistemas directos e indirectos.</li> <li>-Posibilidad de ser un método contra incrustaciones.</li> <li>-No hay necesidad de mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Experimental y no desarrollado.</li> <li>- Montaje complejo.</li> <li>- No hay especificaciones sobre el material a usar.</li> </ul>
<b>Captador compuesto por material elastómero.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Uso con agua sucia o pretratada.</li> <li>-Configuración similar a los captadores usuales.</li> <li>-Poco mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta inversión inicial (materiales nuevos y complejos).</li> <li>-Transmisión de calor limitada.</li> </ul>
<b>Colector solar por medio de tubo termosifón.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Posibilidad de transporte de la energía a larga distancias.</li> <li>- No hay posibilidad de daños por congelación independientemente de lo extremo del clima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complejidad instalación.</li> <li>-Uso de fluido de trabajo no común.</li> <li>- Alto coste inicial.</li> <li>- Lentitud del sistema.</li> </ul>

**Tabla 2:** Comparación de los métodos experimentales descritos.

### **3.2 MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LOS DEPÓSITOS DE CAL EN LOS COLECTORES SOLARES**

La destrucción de los depósitos de sales sobre las paredes de las tuberías de instalaciones de agua caliente sanitaria (ACS) una vez formados suele ser difícil y en muchos casos imposible. Por lo tanto, las medidas de protección frente a este tipo de problemas consisten en técnicas capaces de impedir la formación de depósitos, moderar el crecimiento de los mismos y, aunque sea más difícil, eliminar los depósitos ya existentes.

El documento básico HE (Ahorro de energía) del Código técnico de la edificación [17] se especifican una serie de condiciones del fluido de trabajo (agua) en el circuito primario en cuanto salinidad y contenido de sales. Si no se cumple dichos requerimientos el agua deberá ser tratada.

En este apartado se describirán distintas soluciones en el mercado para el tratamiento de agua para reducir su salinidad. En principio muchos de ellos pueden ser usados tanto en sistemas indirectos como directos ya que las condiciones establecidas sobre la salinidad del agua no la hacen inadecuada para el consumo humano. Aunque existen ciertos métodos que implican la adición de sustancias nocivas para el consumo humano que obligarían a usar un sistema indirecto.

Aun así se considerará el uso de sistema indirecto como un método aparte para la protección del problema de la cal, siendo el resto de métodos propuesto para el tratamiento de agua de la red para su uso en sistemas directos.

#### **3.2.1 Uso de sistema indirecto**

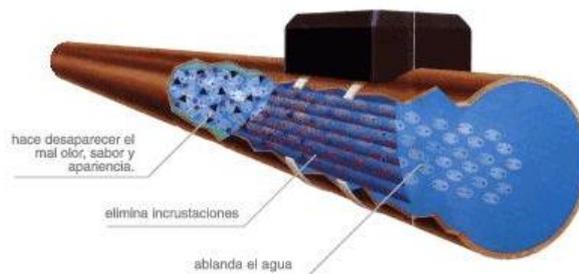
El agua destinada al consumo y el fluido que recoge la energía solar (pasa por el captador y la transfiere al agua sanitaria mediante un intercambiador) no son el mismo. El agua del circuito que pasa por el intercambiador (circuito primario), como se ha visto anteriormente suele ser agua tratada y se procura que sea un agua con dureza baja para que no se produzca el indeseado problema de los depósitos en el captador.

Es un sistema muy fiable [1], el cual no necesita apenas mantenimiento. Al ser usar agua tratada la cantidad de cal que lleva el agua para consumo que se usa en la zona no tiene ninguna restricción. Por lo que se recomienda su uso para zonas con agua de elevada concentración en cal.

Por otro lado, la existencia de un intercambiador intermedio hace que el rendimiento de la instalación en la transferencia de la energía captada baje. Además de esto, el coste inicial de la misma aumenta debido al mismo intercambiador y la existencia de mayor número de tuberías que en el sistema directo.

### 3.2.2 Descalcificador magnético

Este dispositivo consiste en la colocación de imanes alrededor de la tubería por donde pasa el agua a tratar (Figura 13). El campo magnético provocado por esos imanes modifica la agregación de los cristales de carbonato cálcico haciendo que esta sustancia no tenga tendencia a incrustarse en las paredes [1]. Esto se realiza sin cambio en la composición química del agua tratada.



**Figura 13:** Esquema descalcificador Magnético.

Se puede usar tanto imanes naturales o permanentes como electromagnéticos (solenoides), la diferencias entre uno y otro son la necesidad de consumo eléctrico (aunque bajo) por parte del solenoide aunque el campo de influencia del imán permanente es menor.

Es un sistema con pocos fallos [1], con apenas requerimientos de mantenimiento y sin restricciones en cuanto a la cantidad de sales que contenga el agua a tratar. Otra gran ventaja es su atractivo para su montaje ya que apenas tiene partes móviles.

A pesar de lo descrito en [1] existe cierta controversia sobre el funcionamiento este tipo de dispositivos en el tratamiento de agua. Según la revisión del estado de la tecnología llevado a cabo por Baker [3] existen muchas dudas acerca de la efectividad debido a:

- Falta de acuerdo sobre las causas del efecto (se atribuyen como causa efectos en la configuración atómica de los elementos participantes, contaminación del agua con

sustancias cuya disolución es favorecida por los campos magnéticos, efectos sobre la iteración interatómica e intermoleculares y efectos sobre las superficie donde se producen los depósitos entre otros)

- Resultados contradictorios llevados por distintos estudios experimentales. La causa de esta incoherencia se atribuye a la falta de control de parámetros fundamentales como el PH [3]

Sin embargo según los textos consultados en [3] queda patente la efectividad de este método si el flujo del agua circula de forma ortogonal al campo magnético inducido y cuando se realiza el tratamiento en circuitos que producen una recirculación del agua (existe movimiento del agua dentro de la tubería).

### **3.2.3 Descalcificador iónico**

Se trata de uno de los procedimientos más utilizados en el tratamiento de agua doméstica (ver Figura 14), muchas veces a conocida simplemente como el descalcificador.

Este método consiste en hacer pasar el agua a tratar por a través de resinas o arcillas especiales como la zeolita o resinas de poliestireno sulfuradas. Estos materiales tienen la propiedad de permutación, es decir, produce una reacción en que se cambia el ion Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) u otro ion metálico (normalmente Magnesio,  $\text{Ma}^{++}$ ) responsables de la dureza del agua por el ion sodio de la arcilla y resinas, formándose  $\text{CaCl}$  y  $\text{MgCl}$  que son evacuados [27].

Hay que tener en cuenta que el sistema modifica la composición química del agua al introducir el ion Sodio ( $\text{Na}^{++}$ ). Sin embargo, el sodio es bastante inocuo para el consumo humano.

La reversibilidad de la reacción de permutación hace posible la recuperación de la zeolita haciéndola pasar por una solución de cloruro sódico del 7 al 14 %. Por lo que en necesario un consumo de cloruro sódico para el correcto funcionamiento del sistema.

A pesar de ser un sistema muy fiable como los anteriores, requiere un mantenimiento exhaustivo para reponer la sal (cloruro sódico) necesaria para la recuperación de la arcilla. Además, no soporta una elevada concentración de sales en el agua ya que es sistema se haría muy grande por la existencia del depósitos de con sal y la cantidad de arcilla usada convirtiéndose en un sistema costoso.



**Figura 14:** Ejemplos instalación doméstica de descalcificadores iónicos [25].

### 3.2.4 Descalcificadores eléctricos

Este método descrito en [18] se procede a la utilización de un circuito electrónico que produce una corriente eléctrica variable que mediante electrodos y/o solenoides generan un campo electromagnético variable. Se encuentra dentro de los llamados métodos PWT (*Physical Water Treatment*).

El campo eléctrico variable provoca el choque de partículas de  $\text{Ca}^{++}$  con  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , provocando la formación de pequeños cristales de  $\text{CaCO}_3$  que pueden actuar como núcleos preferentes de precipitación del resto de iones disueltos. De esta forma se eliminan la tendencia a depositarse sobre las paredes de los tubos. Es decir, este método aumenta la tendencia a producirse la nuclearización de partículas en la corriente del agua [36]. Estos microcristales formados son evacuados por el sistema de desagüe una vez que se utilice el agua.

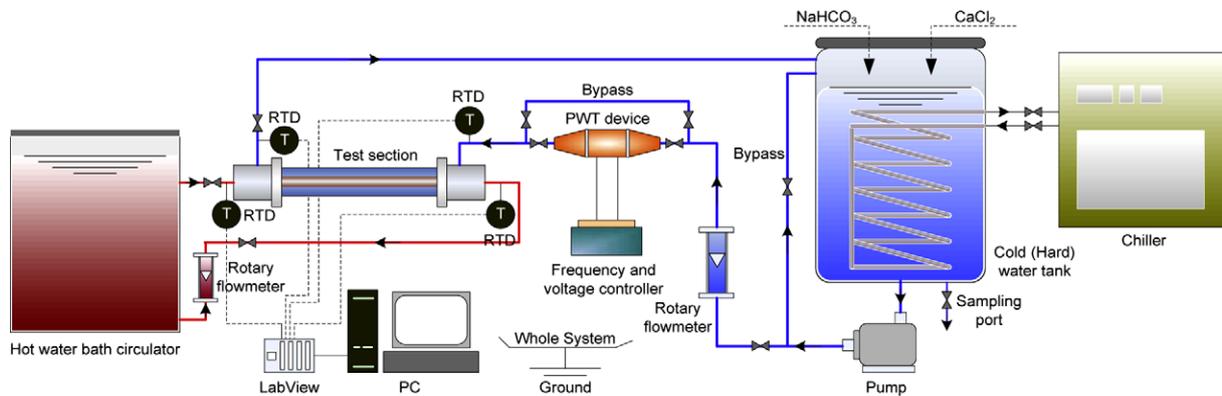
A largo plazo es posible, aunque no esté garantizada la eliminación de incrustaciones anteriormente existentes en la instalación ya que la alteración física del agua al haber forzado la precipitación de sales hace que pueda disolver minerales en mayor cantidad. Por lo tanto, las capas duras de cal se suavizan, poco a poco, y con la corriente del agua, desaparece.

Tiene la gran ventaja de que no presenta restricciones frente a la cantidad de sales disueltas contenida en el agua tratada.

Un inconveniente es el hecho de que estos descalcificadores son elementos relativamente recientes. Por lo tanto, todavía no se ha demostrado su fiabilidad (fuertemente dependiente del adecuado funcionamiento del controlador electrónico). Su coste de instalación es elevado.

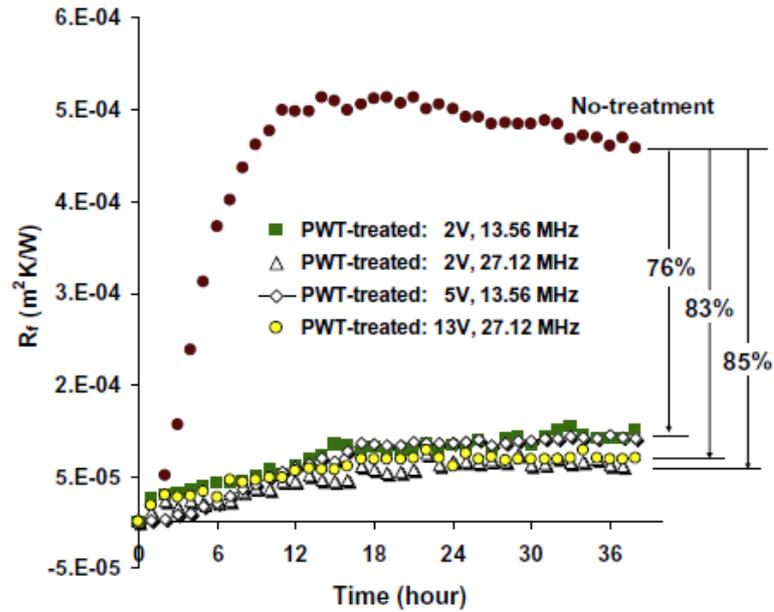
Debido a su no demostrada fiabilidad, existen varios estudios realizados para comprobar la efectividad de este método. Uno de ellos es el llevado a cabo por Leonard D. Tijing [36] en que se estudió la efectividad de la aplicación de campos eléctricos variables generados por electrodos de grafito a lo largo de la corriente de agua dura creada artificialmente que circula por intercambiador de calor hecho de tubos de cobre.

El esquema experimental se muestra en la Figura 15:



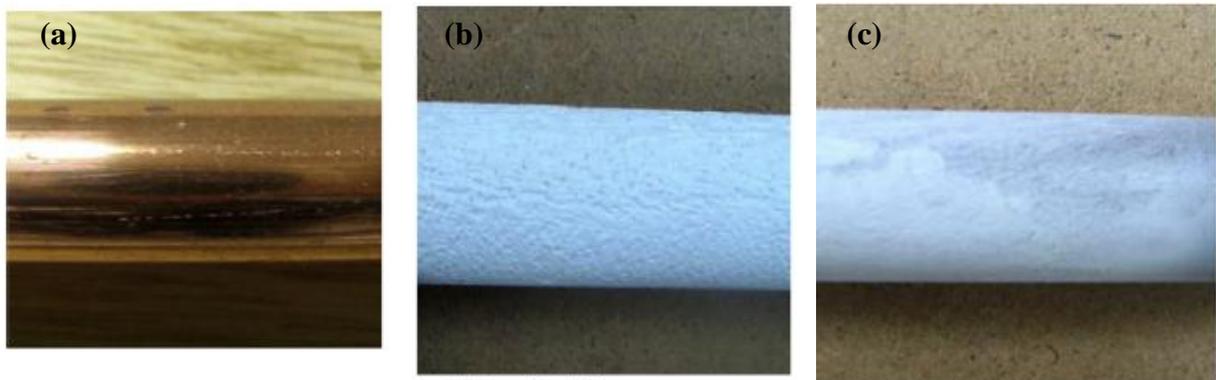
**Figura 15:** Esquema del montaje [16].

La cantidad de cal depositada en los tubos se mide durante el ensayo a través del calor intercambiado. Este flujo de calor disminuirá a medida que la resistencia de transmisión de calor por los depósitos de cal (*fouling*) aumente. Se relaciona este incremento de resistencia al flujo de calor con el espesor de la capa depositada en el tubo. La evolución de dicha resistencia a lo largo del tiempo del ensayo para distintas intensidad eléctrica del dispositivo utilizado es representada en la Figura 16.



**Figura 16:** Evolución de la resistencia al flujo de calor para dispositivos usados en el estudio [16].

Como se observa en la Figura 16 la reducción de la resistencia por suciedad es del orden del 80% con respecto al agua no tratada. Esta reducción de los depósitos sobre el tubo del mismo también es apreciable a simple vista.



**Figura 17:** (a) Tubo de cobre antes del ensayo [16]. (b) Tubo de cobre tras el ensayo (agua no tratada) [16]. (c) Tubo de cobre tras el ensayo (agua tratada) [16].

En todas las ocasiones en la que se hace el uso del intercambiador existen depósitos de cal (esto se observa si se comparan la Figura 17 (a) con (b) y (c)). Sin embargo, el tratamiento

con campos eléctricos del agua produce una reducción de los depósitos (Figura 17 (c)) respecto al agua no tratada (Figura 17 (b)).

### **3.2.5 Adicción de polifosfatos**

Esta forma de tratar el problema de la cal [1] se basa en la adicción al agua de varios compuestos con estructura lineal y fórmula genérica:  $M_4P_2O_7, n$  (MPO<sub>3</sub>). Los polifosfatos tienden a formar complejos con iones magnéticos, especialmente con los del calcio y magnesio. Los complejos resultantes son muy solubles en agua y con las mismas características que las sales de sodio. Por lo tanto, el agua tratada con este método se comporta como un agua sin dureza, evitándose así las deposiciones indeseadas.

El gran inconveniente de estos componentes es su descomposición progresiva por hidrólisis. La velocidad a la que se produce la reacción de hidrólisis aumenta con la temperatura no pudiéndose garantizar la eficacia del método a temperaturas superiores a 60°C. Otro aspecto es su requerimiento en mantenimiento ya que es necesario reponer las sustancias al menos cada año.

Por otro lado, siempre que la proporción de los polifosfatos sea la adecuada y exista una adecuada reposición de los mismos, se trata de un método fiable y útil sea cual sea la dureza del agua a tratar.

Por lo anteriormente dicho, es un método totalmente recomendable, como en el caso anterior, para instalaciones de intercambio directo para agua caliente sanitaria a baja temperatura. Esto es así siempre que se tenga en cuenta el efecto de la temperatura sobre la eficacia de la instalación.

### **3.2.6 Sistemas de osmosis inversa**

Es un tratamiento radicalmente diferente a los anteriores. Se basa en hacer pasar el agua a través de una membrana semipermeable con orificios lo suficientemente reducidos como para impedir el paso de los iones que provocan la dureza del agua. Se usa para aguas de gran dureza pudiendo llegar a proporcionar agua con 85% menos de sales.

Este sistema necesita una gran cantidad de requerimientos: primero que el agua esté pretratada para que no pueda precipitar CO<sub>3</sub>Ca, los caudales no deben de ser muy elevados y que la presión del suministro sea alta y estable.

Por todas las características anteriores se trata de un método muy caro comparado con el resto de métodos aunque la calidad del agua resultante es excelente. Otro gran inconveniente es su complejo y costoso mantenimiento y sobre todo, el desaprovechamiento de una gran cantidad de agua que no pasa por la membrana semipermeable, (entre el 80 y 90 %) [27]. Por lo que se trataría de una solución extrema nada recomendable.

### 3.2.7 Comparación de los métodos descritos

En la Tabla 3 se muestra en una tabla la descripción de las principales ventajas y desventajas de las técnicas enumeradas a modo de resumen.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Descalcificador magnético.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillo y de bajo coste</li> <li>- Poco mantenimiento.</li> <li>- Poco espacio ocupado.</li> <li>- No se le añade ninguna sustancia al agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controversia sobre su efectividad.</li> </ul>
<b>Descalcificador iónico.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método muy fiable.</li> <li>- Muy extendido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento exhaustivo (reposición arcillas y limpieza).</li> <li>- No apto para agua de extrema dureza.</li> </ul>
<b>Descalcificadores eléctricos.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nulo mantenimiento.</li> <li>- Poco espacio ocupado.</li> <li>-Efectivo para aguas de extrema dureza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necesidad de consumo de energía del exterior.</li> <li>-Fiabilidad no certificada.</li> </ul>
<b>Adición de polifosfatos.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efectividad demostrada.</li> <li>- Coste no elevado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mantenimiento elevado (adecuada concentración de polifosfatos).</li> <li>- Destrucción de polifosfatos por hidrólisis.</li> <li>-Se añade al agua sustancias químicas (uso sistema indirecto).</li> </ul>
<b>Sistemas de osmosis inversa.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua resultante de gran calidad.</li> <li>- Funciona con agua de dureza extrema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto coste de energía.</li> <li>- Sólo factible para cantidades pequeñas de agua.</li> </ul>

**Tabla 3:** Comparación de los métodos para la lucha contra depósitos de cal descritos.