

5. ENSAYOS REALIZADOS

5.1 OBJETIVO DE LOS ENSAYOS

El modelo desarrollado en el apartado estudio teórico para la aproximación del comportamiento de la solución propuesta en este proyecto indica que bajo ciertas configuraciones de dicha propuesta la protección frente a los efectos de las heladas es viable. Sin embargo, este modelo está basado en un número considerable de hipótesis, lo que hace necesario y recomendable la validación experimental de los resultados obtenidos.

La finalidad de la series de ensayos a realizar es la comprobación de la capacidad del modelo para describir adecuadamente la realidad. Para ello se construyó un montaje similar al planteado en la Figura 32 del apartado estudio teórico. Se adquirió un tubo de cobre al que se introdujo en su interior pequeños tubos de los materiales descritos en el mismo apartado. Estos montajes se sometieron a las condiciones de temperaturas tanto de producción de las heladas como a temperaturas altas que se pueden dar en el funcionamiento de los captadores solares.

En este proceso se monitorizaron tanto la temperatura como la presión en el interior del tubo de cobre. También se comprobó y tomó nota si se producía la rotura del tubo de cobre a causa de la sobrepresión que se alcanzó en su interior.

5.2 MATERIALES Y EQUIPAMIENTO

- Tubo de cobre

Estos tubos han sido obtenidos de sobrante de tubos utilizados en la canalización de agua. Ha sido necesario el uso de tubos de distinta geometría para los ensayos. Estas características se resumen en la Tabla 16.

Tubo nº	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)
1	20	22
2	16	18
3	23	25

Tabla 16: Geometría de los tubos de cobre utilizado en los ensayos.

- **Tubo flexible**

Se usaron dos tipos de tubos flexibles en estos experimentos uno hueco y otro macizo. Ambos son de silicona el tubo hueco se obtuvo prefabricado mientras que el segundo fue realizado manualmente mediante el curado de silicona acética de la marca comercial Fisher.

- La geometría de los mismos quedará definida en la Tabla 17.

Tipo de tubo	Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)
Hueco	7	9
Macizo	-	9

- **Tabla 17:** Características de los tubos de silicona utilizados en los ensayos.

- **Racores, válvulas y otros elementos de instalación hidráulica**

Aparte de los racores de varias formas: conexión en T, en L, roscados... fueron necesarios otros elementos usados normalmente para construir una instalación de fontanería. Estos son tales como conectores, cinta de neopreno para garantizar la estanqueidad de las uniones roscadas, válvula de esfera para controlar le entrada y salida de agua del montaje entre otros, aparte de estaño para soldar los elementos que sean necesarios.

- **Agua**

Esta se usó para rellenar el montaje una vez construido. No se utilizó ningún tipo de agua con algún tipo de tratamiento especial. Simplemente se trata de agua suministrada por la red de agua doméstica que será el agua a calentar en los colectores de ACS.

- **Sensor de presión.**

Este sensor se unió a la tubería de cuyo interior se quiere conocer la presión y se encargó de transformar la presión obtenida en señal eléctrica mediante un transductor que lleva incorporado como se observa en la Figura 65



Figura 65: Sensor de presión similar al usado.

- **Termopar.**

Como es ampliamente conocido, un termopar se trata de un transductor consistente en la unión de dos placas/hilos de dos metales distintos usados para medir temperatura. Esta unión de metales produce una diferencia de potencial eléctrico entre los dos tipos de metal debida al llamado efecto Seebeck. Esta diferencial de potencial es proporcional a la diferencia de temperatura entre unos de los extremos del termopar (punto caliente) y el opuesto (punto frío).

En nuestro caso los termopares usados están específicamente diseñados para medir la temperatura en líquidos. Por ello están envueltos en una carcasa metálica que protege a los hilos del mojado pero debido a su elevada conductividad térmica permite una adecuada medición de la temperatura.

- **Cinta aislante térmica.**

Las características del material en que está realizada y espesor de la misma hacen que dicha cinta presente una resistencia elevada a la transmisión de calor. Fue usada para que se produzca la transmisión de calor de la manera deseada en el montaje.

- **Equipo monitorización.**

Las señales eléctricas procedentes de los sensores llegan a este equipo. Allí fueron modificadas y convertidas en datos que pueden ser tratados por aplicaciones informáticas

- **Soplete de gas.**

A falta de un horno lo suficientemente grande para el montaje realizado, la simulación de las condiciones de temperaturas elevadas del colector solar durante el funcionamiento se

realizó con la ayuda de este instrumento. Más concretamente se usó un soplete accionado con una pequeña bombona de gas propano.

- **Frigorífico (congelador).**

En él se simularon las condiciones climáticas adversas que provocan la congelación del agua en el interior de los captadores solares. Es simplemente un frigorífico de carácter doméstico con congelador disponible en el laboratorio.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

5.3.1 Montaje experimental.

- **Descripción general**

Los experimentos realizados se dividen en dos bloques, en el primero se simularon condiciones de temperaturas cercanas a la heladas (condiciones de temperaturas frías) y otro en el que se simularon las condiciones de temperaturas más altas en el funcionamiento (condiciones altas temperaturas). Para cada uno de estos bloques el montaje fue algo diferente.

La idea básica del montaje es la misma en los dos bloques de ensayos: obtener una configuración en la que exista un tubo de cobre y en el interior dicho tubo otro tubo de material flexible similar al descrito en los apartados anteriores. El espacio entre el interior del tubo de cobre y el exterior del tubo flexible debe estar relleno de agua. Finalmente tanto la temperatura como la presión deben de ser registradas por sendos sensores cuyas señales son llevadas a un equipo de tratamiento de los datos.

Una vez construido el montaje se le sometió a la variación de las condiciones de temperatura. Los elementos causantes del cambio de temperaturas variaron dependiendo de si se tratan de condiciones frías o condiciones de temperaturas elevadas. En el primer caso esta modificación de las condiciones de temperatura se realizaron a través de un congelador de frigorífico doméstico y en el segundo caso con la ayuda del soplete de gas.

- **Construcción del montaje experimental**

Para la construcción del montaje que simuló a la solución propuesta en el apartado estudio teórico se llevaron a cabo los siguientes pasos.

En primer lugar, al tubo de cobre (totalmente liso) se le soldó mediante estaño unas uniones roscadas en ambos extremos para la fácil conexión con el resto de elementos del montaje. El tubo interior de material plástico (silicona) fue hueco para algunos ensayos y macizo para otros casos. Al tubo flexible hueco se le añadió unos cierres en ambos extremos para evitar la entrada de agua en el interior del mismo. Este primer paso se ilustra en la Figura 66.



Figura 66: Preparación tubos cobre y silicona para los distintos experimentos.

Teniendo ambos tubos preparados se procede a situar el tubo de silicona (macizo a hueco según el ensayo) en el interior del sistema de forma similar a lo planteado en la Figura 32 del estudio teórico.

Posteriormente se procedió a la construcción de los montajes completos que son distintos según si se someten a un aumento o disminución de la temperatura. Se muestran ambos tipos en la Figura 67 y la Figura 68. En ambas figuras se aprecia que en un extremo del tubo rígido de cobre se enroscó un racor de conexión en T que permite la unión del tubo de cobre con el sensor de presión y el sensor de temperatura. En el extremo opuesto del tubo rígido se conectó una válvula de esfera mediante el uso de las uniones roscadas previamente soldadas. La función de dicha válvula fue controlar el paso de agua al interior del montaje.

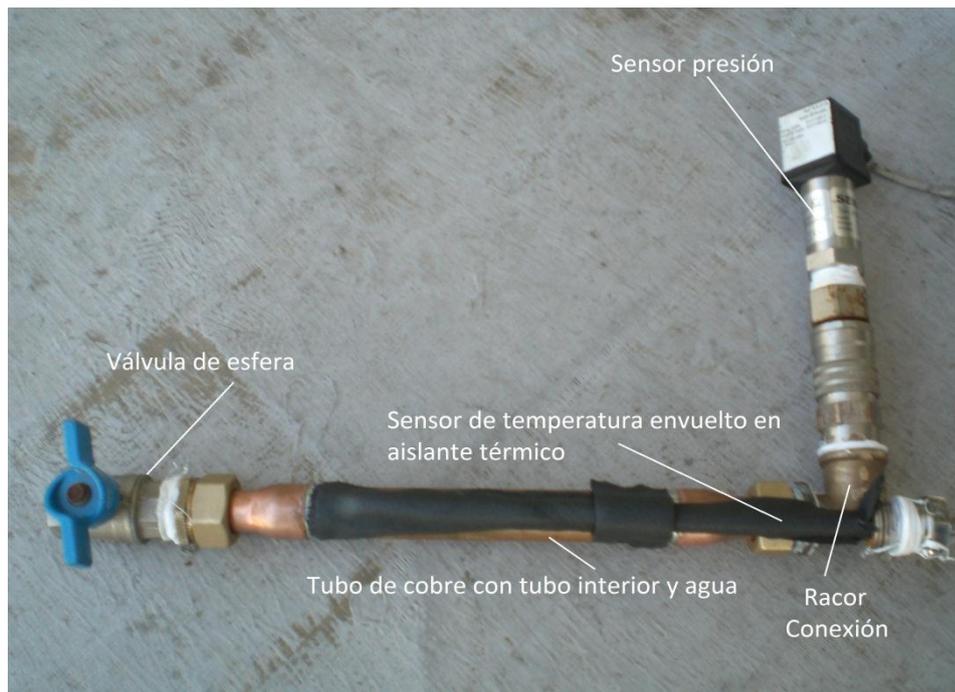


Figura 67: Montaje para los ensayos en condiciones frías.

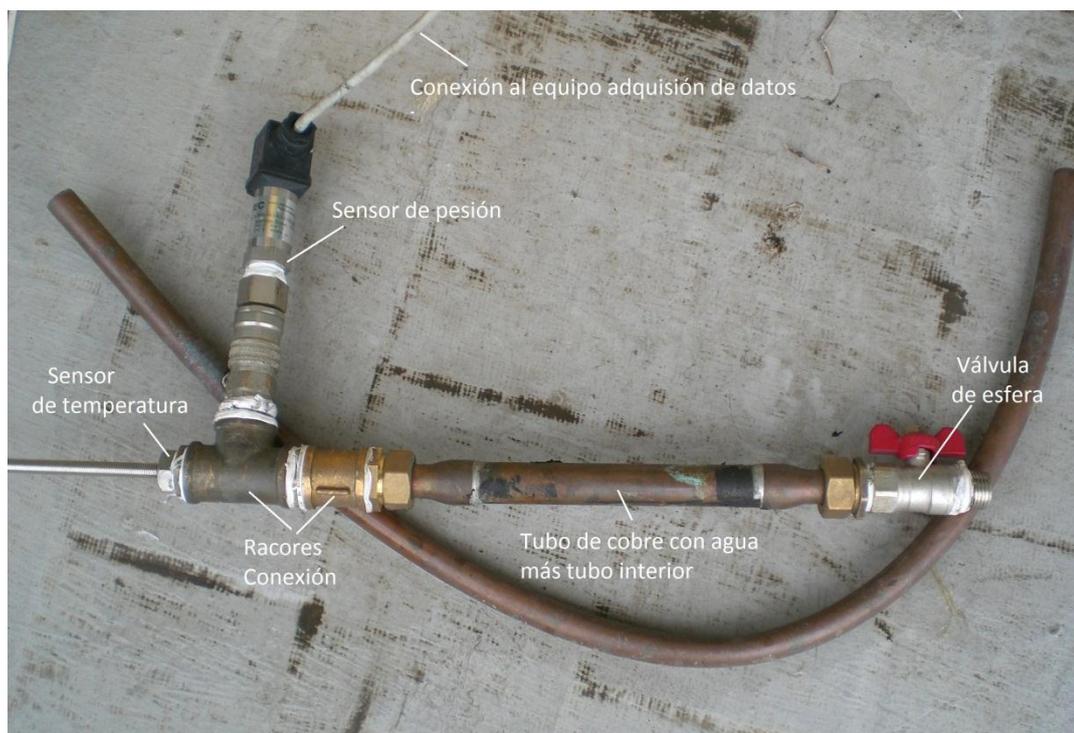


Figura 68: Montaje para los ensayos altas temperaturas.

El montaje mostrado en la Figura 67 se utilizó cuando se sometió la solución propuesta a temperaturas menores de las alcanzadas en el punto de congelación de agua. El expuesto en la Figura 68 se usó cuando se impuso al montaje a un aumento de la temperatura hasta

temperaturas que se alcanzan en el funcionamiento ordinario del captador solar. La principal diferencia entre ambos montajes radica en el sensor de temperatura.

En el caso del montaje usado para temperaturas bajas el sensor disponible era de demasiada longitud para poder introducir en el interior del tubo de cobre. La solución adoptada fue la siguiente: se adhirió el sensor de temperatura a la pared exterior del tubo de cobre rodeándolo de cinta aislante térmica tal y como queda patente en la Figura 67. En principio al ser el cobre, como todos los metales, un buen conductor del calor y estar asilado de las condiciones exteriores, la temperatura captada por el sensor deberá ser parecida a la alcanzada por el agua en el interior del tubo de cobre.

Por otro lado, para el caso de ensayos a condiciones de temperaturas elevadas no fue posible la configuración anterior debido al soplete empleado para aumento de la temperatura del montaje. Dicho soplete ha sido utilizado debido a que no se dispuso de un horno lo suficientemente grande para albergar el montaje descrito. Unos de los inconvenientes del uso de este dispositivo es la imposibilidad de contacto entre cualquier material inflamable con la llama producida por el mismo. Por lo tanto el uso de un sensor recubierto con material aislantes situado sobre la misma superficie donde aplicará el calor quedó descartado.

La solución al problema expuesto fue la elección de un sensor de temperaturas de menor tamaño. La longitud del nuevo sensor permitió introducirlo en el interior del tubo de cobre (ver detalle mostrado en la Figura 69). De esta forma la superficie del tubo de cobre quedó libre como se ilustra en la Figura 68.



Figura 69: Detalle sensor de temperatura usado en el bloque de ensayos altas temperaturas.

El agua usada en los ensayos se trató de agua recogida directamente de la red de agua potable doméstica.

El llenado del montaje con agua se realizó de la siguiente forma. En primera lugar se abrió la válvula esférica y se vertió el agua en el interior del tubo de cobre hasta que aparentemente quede lleno. Este proceso no garantiza un adecuado llenado del montaje con agua ya que debido a su forma en L y la existencia de lugares preferentes para la acumulación de aire en los distintos elementos del mismo (ver Figura 67 y la Figura 68) existió un gran riesgo de que se formen bolsas de aire en el interior del mismo.

La acumulación de aire en el interior del montaje falsearía de manera grave los resultados de los ensayos ya que el volumen de agua en el interior del montaje sería mucho menor que el aparente. Por lo tanto, el incremento del volumen total del agua durante el cambio de fase sería mucho menor que el esperado así como la presión alcanzada en el interior del tubo de cobre.

La existencia de depósitos de aire en el interior del montaje se evitó de la siguiente forma. Una vez llenado el tubo de cobre con agua hasta el máximo nivel posible, se cerró la válvula de esfera. Posteriormente, se agitó el montaje variando su posición varias veces para favorecer la circulación de las posibles bolsas de aire hacia la zona donde se encuentra la válvula. Finalizado este proceso se volvió a abrir la válvula de cierre. En el caso de que el nivel de agua fuera menor que el original significa que existían dichos depósitos de aire y se desplazaron hacia la zona donde se encuentra la válvula de cierre. En este caso se procedió de nuevo al llenado del tubo de cobre con agua. Este proceso se repitió varias veces hasta que el nivel anterior y posterior al agitado del montaje fue el mismo. Entonces la acumulación de aire fue eliminada por completo.

La ubicación de los montajes expuestos en las Figura 67 y Figura 68 con respecto al dispositivo encargado del cambio de temperatura varía según las temperaturas a la que se someten dichos montajes. En primer lugar para los ensayos en condiciones frías se introdujo el montaje relleno de agua en el la sección de congelación de un frigorífico doméstico disponible en los laboratorios. La conexión entre los sensores colocados en el interior del congelador y el equipo de tratamiento de datos se realizó a través de un cable. Estos cables se pasan a través del cierre de la puerta del congelador procurando que la apertura sea mínima para evitar la entrada de aire caliente del exterior y también que no se dañen los cables sometidos a compresión en dicho punto.

En segundo lugar el cambio de temperatura en condiciones de temperaturas elevadas se llevó a cabo bajo un soplete de gas. Para que la temperatura del montaje no llegue en ningún momento a llegar a ser tan altas como la temperatura de la llama del soplete se situó la llama del soplete a una distancia prudente del tubo de cobre. El acercamiento de la llama al montaje se realizó de forma el aumento de temperatura sea uniforme en todo el tubo de cobre. La aplicación del calor siempre se realizó prestando atención a la señal de presión y temperatura para que no sobrepasará valores excesivos.

Durante el uso del soplete se mantuvieron todas las medidas de seguridad pertinentes: comprobación del funcionamiento de la bombona de gas, y uso de guantes protectores preparados para este tipo de operaciones.

5.3.2 Ensayos realizados

Los ensayos se dividen en dos bloques. En un primer bloque, llamado Bloque I, se encuentran los que se realizaron para comprobar el comportamiento de la solución planteada bajo condiciones frías mientras que los que se realizaron para comprobar el funcionamiento de la misma bajo condiciones de temperaturas elevadas están recogidos en el Bloque II.

- Bloque I

En estos ensayos las condiciones de heladas fueron simuladas introduciendo el montaje en el congelador del frigorífico doméstico disponible en el laboratorio. En todo momento se partió de unas condiciones iniciales iguales a la del ambiente: presión atmosférica y temperatura en torno a los 298 K, estas condiciones se asemejan a las condiciones iniciales escogidas en el apartado estudio teórico. Las temperaturas alcanzadas se muestran en la Tabla 18.

Temperatura inicial	298 K
Temperatura final	250 K (aproximados)

Tabla 18: Parámetros comunes en los ensayos del Bloque I

Las condiciones de bajas temperaturas se prolongaron durante horas para comprobar el correcto funcionamiento de las distintas configuraciones por un tiempo prolongado. Durante todo el proceso la señal de temperatura y presión fueron monitorizadas.

Las configuraciones evaluadas consistieron en la combinación de los tubos de cobre de diferentes diámetros (Tabla 16) con tubos de silicona hueco o macizo según el ensayo deseado (Tabla 17). El propósito de todo ello fue comprobar dos principales aspectos deducidos del estudio teórico. El primero de los mismos es la viabilidad de la solución del tubo hueco de silicona cumpliéndose una serie de condiciones en cuanto a la geometría. El segundo sería la imposibilidad del uso en las configuraciones de tubo macizo, aunque sean de un material altamente deformable como la silicona. El tubo de teflón quedó descartado debido a los resultados previos totalmente desfavorables recogidos en el apartado estudio teórico.

A modo de resumen se incluye la Tabla 19 con la que se recogen los ensayos realizados en este bloque junto a los principales parámetros que describen cada una de las configuraciones usadas.

Ensayo	Diámetro interior tubo de cobre (mm)	Tipo tubo silicona	Diámetro interior tubo silicona (mm)	Diámetro exterior tubo silicona (mm)	Relación entre diámetros a considerar
1*	23	Hueco	7	9	3.28
2	20	Hueco	7	9	2.85
3	20	Hueco	7	9	2.85
4	16	Macizo	-	9	1.77
5	16	Macizo	-	9	1.77

* Ensayo de prueba sin monitorización

Tabla 19: Parámetros geométricos de las configuraciones usadas Bloque I

La relación de diámetro a considerar se trata del parámetro elegido en el estudio teórico que se define como en la ecuación 3.12 del mismo como:

$$r_D = \frac{D_{rig}}{D_i}$$

D_{rig} → Diámetro interior del tubo de cobre rígido.

D_i → Diámetro interior del tubo hueco flexible de silicona o exterior del tubo flexible macizo según sea el caso en condiciones iniciales o de referencia.

Como se observa en la Tabla 19 esta relación de diámetros es menor en el caso del tubo macizo. Se eligen valores de este parámetros menores al escogido en el estudio teórico ($r_D=3$) para que la presión no sea tan alta la que predice dicho estudio.

- **Bloque II**

En este grupo de ensayos se procedió de una manera similar al bloque anterior. Partiendo de condiciones iniciales coincidentes con las ambientales (muy parecidas a las escogidas en el estudio teórico) se elevó las temperaturas del montaje con el uso del soplete. Se dejó de aplicar calor en cuando las condiciones de presión medidas se disparan. Todo ello se realizó para evitar problemas de seguridad al producirse la rotura del tubo de cobre en presencia de la llama producida por el mismo soplete de gas.

Al igual que en el bloque anterior, se exponen a modo de resumen las configuraciones usadas en cada uno de los ensayos del bloque en la Tabla 20.

Ensayo	Diámetro interior tubo de cobre (mm)	Tipo tubo silicona	Diámetro interior tubo silicona (mm)	Diámetro exterior tubo silicona (mm)	Relación entre diámetros a considerar
6	20	Hueco	7	9	2.85
7	20	Hueco	7	9	2.85

Tabla 20: Parámetros geométricos de las configuraciones usadas Bloque II

De lo expuesto en la Tabla 20 se deduce que la configuración con tubo flexible macizo ha sido descartada de los ensayos en estas condiciones, centrándose únicamente en la configuración del tubo hueco.

5.4 RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se describirá con detalle cada uno de las medidas registradas de temperatura y presión en el interior del montaje. Adicionalmente, se expone una descripción del estado del tubo de cobre anterior y posterior a los ensayos para evaluar si se produce daño alguno.

5.4.1 Resultados en el bloque I

- Ensayo 1

Este ensayo se llevó a cabo según los parámetros expuestos en la Tabla 18 y Tabla 19. Cabe destacar que fue un ensayo preliminar para la comprobación de la adecuada construcción del montaje realizado. Esta es la razón de que las señales de temperatura y presión no fueran monitorizadas.

Lo más interesante de este ensayo es el hecho de que la relación entre diámetros sea mayor que la recomendada en el estudio geométrico del problema realizado en el apartado estudio teórico. Este valor se ha fijó en torno a 3 debido a que un mayor valor de este produciría una contracción excesiva del tubo flexible. Como consecuencia, la presión que se alcanzaría en el ensayo deben tener un valor mayor que la que se puede deducir del modelo con $r_D=3$.

Esto justifica que el ensayo haya terminado con la **rotura del tubo de cobre** usado debido a las altas presiones alcanzadas en el interior del mismo. Este resultado confirma las conclusiones extraídas dentro del estudio geométrico realizado en el apartado estudio teórico.

- Ensayo 2

El ensayo fue realizado siguiendo según los parámetros expuestos en la Tabla 18 y Tabla 19. Destaca en la Tabla 19 la elección de una r_D de 2.8 un valor menor que el recomendado $r_D = 3$. Esta característica hace que a priori la presión alcanzada en el interior sea menor que la descrita por el modelo desarrollado en el estudio teórico.

Antes de mostrar los resultados es indispensable comentar el problema presentado en la medida de la presión en el interior del tubo de cobre durante el ensayo. El sensor usado está preparado para medir la presión de sustancias en el interior de la tubería en estado líquido. En el momento que empieza a producirse el cambio de fase a sólido del agua el hielo empieza a obturar zonas cercanas al sensor haciendo que este proporcione una medida errónea de la

presión. Por lo tanto, en los instantes del proceso del ensayo en el que se presuponen mayores cambios de presión no ha sido posible obtener una medida adecuada de la misma. Este problema ha ocurrido en **todos los ensayos realizados en el bloque I** de simulación de condiciones de frío en la producción de heladas.

Por tanto la única medida de la viabilidad de este dispositivo consistió en una inspección cualitativa del estado del tubo tras el ensayo. Esta constó de la comprobación en busca de rotura del tubo de cobre o de la aparición de deformaciones que puedan indicar que dicho tubo ha estado sometido a tensiones que han llevado al material a una deformación mayor que la de su límite elástico.

La señal detectada por el sensor de presión es representada junto a la temperatura a lo largo del ensayo pese a la medida errónea de la temperatura. Como se verá más adelante, esta señal será de utilidad para estimar en el instante que se produzca la rotura del tubo de cobre en el caso de que diera.

A continuación se mostrará la distribución de la temperatura y presión detectada a lo largo del ensayo número 2.

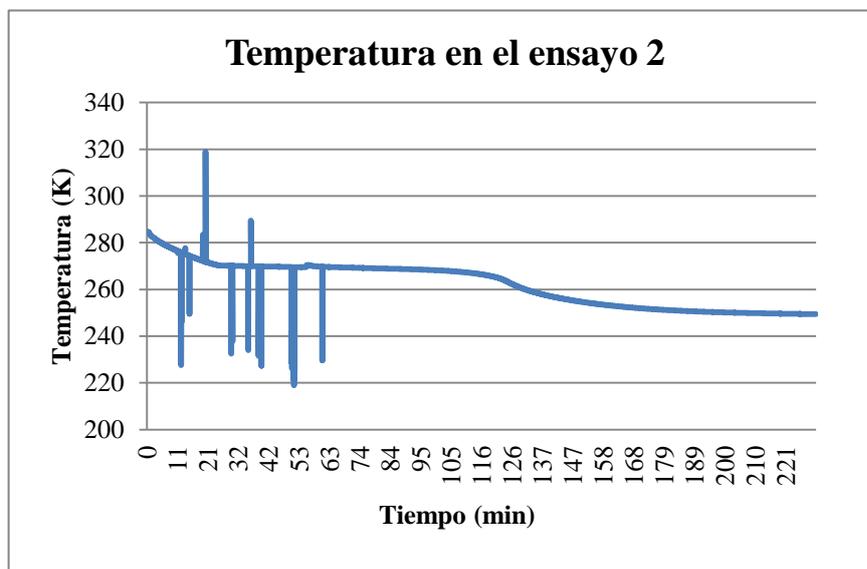


Figura 70: Temperatura registrada durante el ensayo 2.

En la Figura 70 se muestra un comportamiento atípico de la temperatura registrada: para ciertos instantes, cómo se observa en la misma figura, se obtuvieron medidas que suponen un cambio brusco de la temperatura de orden de 20 K en menos de un segundo. Sin embargo,

estos putos claramente erróneos son aislados y se pueden despreciar fácilmente para un estudio coherente de la temperatura del montaje como se muestra en la Figura 71.

La causa de esta “señal de ruido” en el registro de la temperatura es incierta. Cabe destacar que comenzó a darse este fenómeno al acercarse la temperatura del montaje a 273.15 K, justo a la temperatura de cambio de fase. Se podría pensar que la formación del hielo podría inducir este comportamiento en el sensor de temperatura. Sin embargo, como se describe en el apartado 3.1 Montaje experimental para este caso el sensor se encontró pegado sobre la superficie del tubo de cobre. Por lo tanto es difícil encontrar una relación entre la aparición de hielo y el extraño comportamiento registrado.

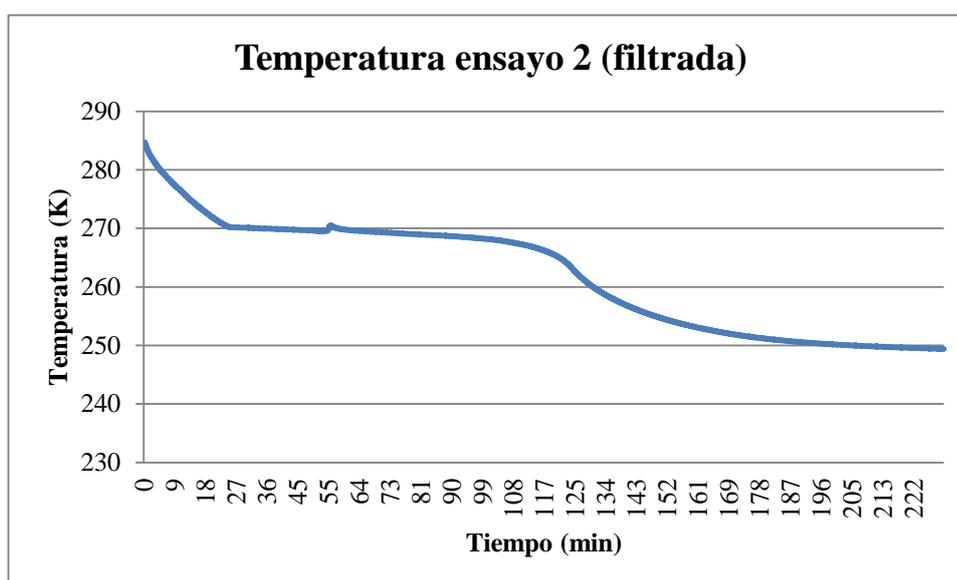
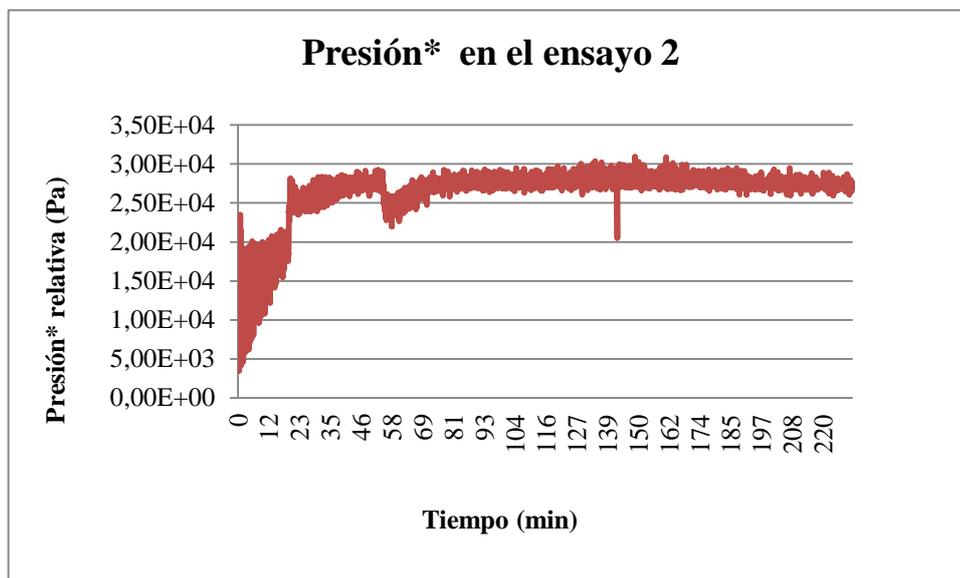


Figura 71: Temperatura registrada (filtrada) durante el ensayo 2.

Una vez descartado el comportamiento extraño eliminando los puntos discordantes como se ha realizado en la Figura 71 (este es el filtrado al que se refiere la figura). Se puede apreciar que la evolución de temperatura comenzó con un descenso rápido desde la temperatura inicial hasta el entorno de 273K. Una vez que llegó a 273K se mantuvo la temperatura constante durante un periodo continuado de tiempo. Este periodo corresponde al proceso de cambio de fase que se prolongó durante aproximadamente 70 minutos (4200 s). Una vez que todo el agua contenida en el interior del montaje pasó a estado sólido, se produjo de nuevo una bajada de temperatura hasta llegar aproximadamente a 253K (-20 °C) temperatura a la que el congelador está diseñado para mantener.

Del perfil de temperatura registrado se puede concluir varias ideas. Por un lado las temperaturas estudiadas en el apartado Estudio Teórico han sido satisfechas garantizado la simulación de condiciones climáticas frías en las que se producen heladas. Por otra parte, a parte del comportamiento discordante mostrado anteriormente, no se produce ninguna variación de temperatura brusca que indique que se haya producido rotura del tubo o comportamiento anómalo asociado a la deformación del tubo de cobre. Por último el largo periodo a 273K indica que se ha producido el cambio de fase en todo el volumen de agua.

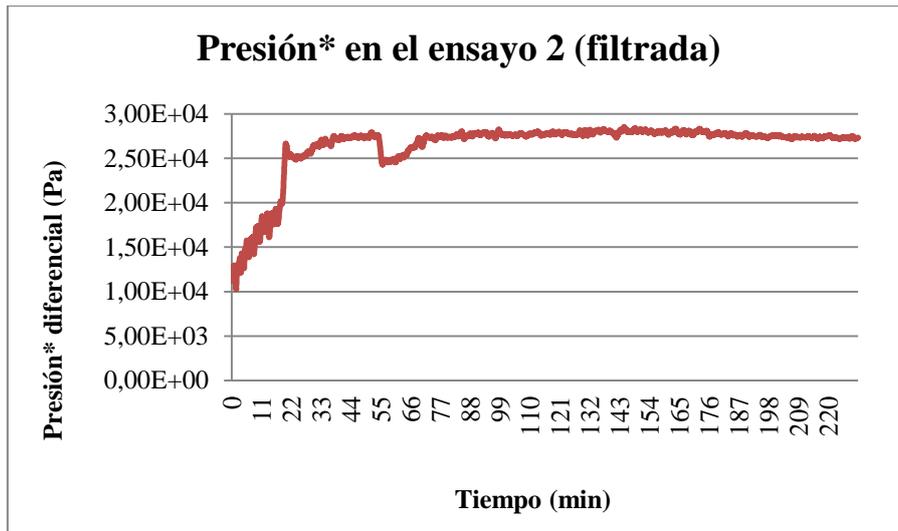
La señal captada por el sensor de presión se muestra en Figura 72 para ilustrar el comportamiento del problema asociado al dicho sensor.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 72: Presión registrada durante el ensayo 2.

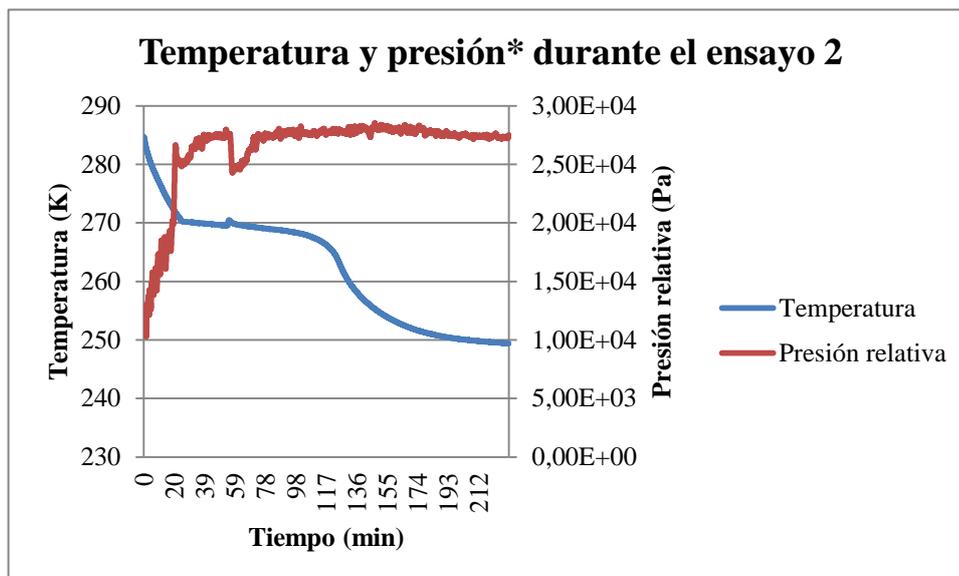
El primer problema que se presenta en la Figura 72 es la importante componente de ruido existente en la señal captada. Este ruido puede ser una señal del mal funcionamiento del sensor. Para eliminarlo se aplicó sobre la señal obtenida un filtrado usando un filtro de tipo Savitzky-Golay gracias a la aplicación Matlab para que se produzca una señal más suave. El resultado se muestra en la Figura 73.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 73: Filtrado de la presión registrada durante el ensayo 2.

Como se observa en la Figura 73 se produjo un leve aumento de la presión en el inicio del ensayo como era esperado por el modelo planteado (Figura 50) pero una vez que comenzó el proceso de congelación la presión no cambia a apenas en todo el resto del ensayo (se aprecia claramente en la Figura 74). Este comportamiento no se corresponde con la realidad debido a que durante este proceso existió un aumento brusco de volumen de agua que debería haber producido un aumento de la presión en el interior del tubo de cobre.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 74: Señal de temperatura y presión filtrada durante el ensayo 2.

Debido al pequeño valor alcanzado por la presión junto al extraño comportamiento presentado al alcanzarse la temperatura de cambio de fase se le atribuye el fallo del sensor a la aparición del hielo. La aparición del mismo debe producir atoramiento en la zona donde se mide la presión inhabilitando el sensor para la medida.

No obstante, queda por exponer el resultado más importante que se saca de este ensayo. Tras una observación minuciosa del montaje tras el ensayo se concluyen **no se han producido ni rotura ni deformación plástica del tubo**. Tampoco ha existido ningún daño en el tubo de silicona usado ni se ha producido la entrada de agua en el interior del tubo. El estado del montaje tras el ensayo se aprecia en las Figura 75.



Figura 75: Imagen del montaje tras el ensayo 2.

Por todo lo anterior en este ensayo el montaje planteado se muestra funcional para la protección frente a heladas. Esta conclusión confirma la idoneidad del modelo planteado en el apartado teórico el cual ha predice el comportamiento presentado en este ensayo.

- **Ensayo 3**

La realización del ensayo 3 fue conforme a los ensayos parámetros mostrados en la Tabla 19 y Tabla 19. Se trata de una repetición del ensayo anterior. La razón de ello fue comprobar si de nuevo el montaje elegido muestra su fiabilidad.

De nuevo se mostrarán la evolución de la evolución tanto de la temperatura como de la presión a lo largo del ensayo. A diferencia del ensayo anterior, estos datos se mostrarán directamente tratados para una correcta interpretación los mismos.

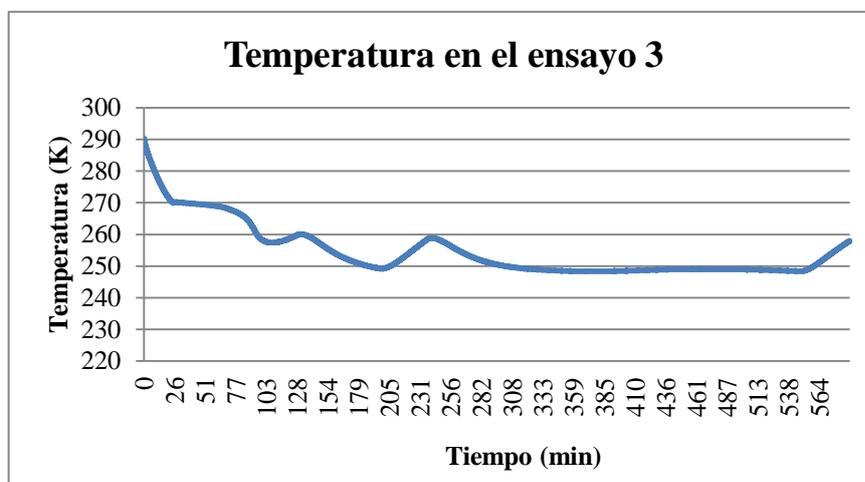
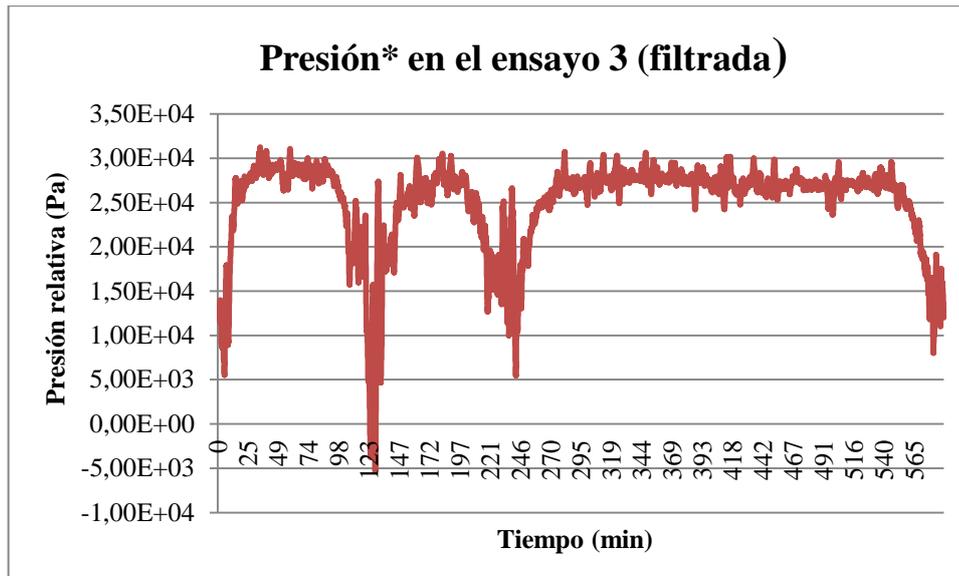


Figura 76: Temperatura registrada durante el ensayo 3.

Como se aprecia en la Figura 76 se produjo una evolución similar al caso anterior, existió una rápida bajada de la temperatura en el inicio del ensayo hasta llegar a la temperatura de 273K (0°C). Se mantuvo durante todo el periodo de cambio de fase a esta temperatura. Terminada la transformación a hielo la temperatura volvió a bajar de nuevo a la temperatura definida en el congelador.

La principal diferencia con el ensayo anterior es el tiempo de duración que como observa en la Figura 76 es del orden de tres veces mayor que el anterior. La principal razón de esto fue comprobar que la funcionalidad del montaje se mantiene a lo largo de un tiempo prolongado. Este prologado tiempo es la causa de la variación de entrono a 5K alrededor de 253 K consecuencia del control incorporado al congelador.

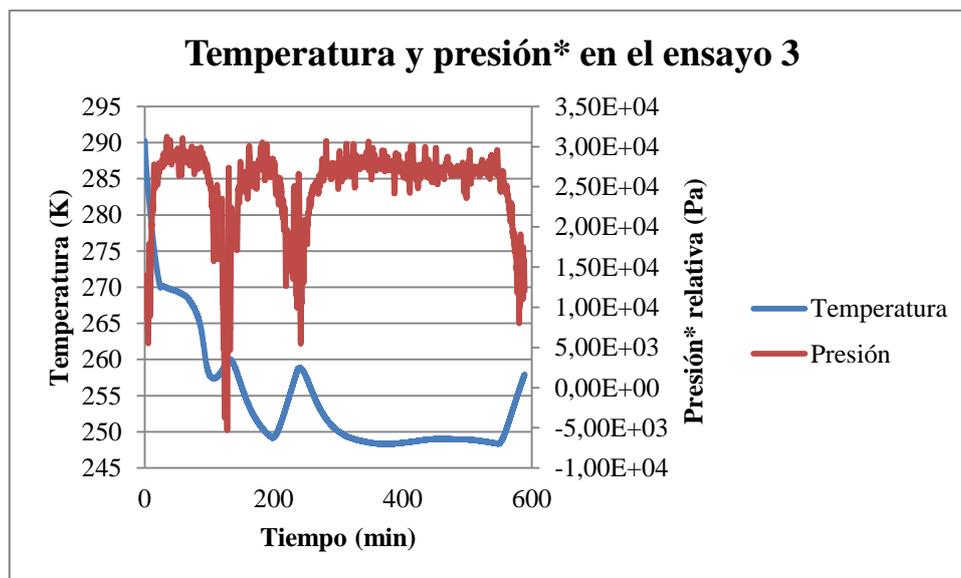
No se observa en la Figura 76 ninguna variación brusca que pueda indicar ningún problema en el funcionamiento. Sin embargo, para comprobarlo correctamente hay que examinar la presión obtenida.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 77: Presión registrada durante el ensayo 3.

A la vista de lo mostrado en la Figura 77 se concluye que de nuevo el sensor de temperatura presenta un comportamiento erróneo debido al valor excesivamente pequeño de la presión alcanzada. Sin embargo, es curioso observar la variación de la señal obtenida de la presión con la temperatura, expuesta en la Figura 78.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 78: Presión y temperaturas registradas durante el ensayo 3.

Como se aprecia en la Figura 78 aunque la medida dada es totalmente errónea debido a la presencia del hielo el sensor parece ser sensible levemente a los cambios de temperatura. Esto puede ser útil en otros casos para detectar posible incidencias en los ensayos.

Finalmente que por indicar que tras la realización del ensayo la observación detallada y cuidadosa realizada del montaje arroja el hecho de que **no se ha producido ni rotura ni deformación plástica del tubo de cobre**. Por lo tanto queda registrada la fiabilidad del sistema para estas condiciones tal y como el modelo teórico planteado establecía.

- **Ensayo 4**

Según lo mostrado en la Tabla 18 y Tabla 19 en este ensayo el tubo interior el tubo en el interior del tubo de cobre es macizo. Se mostrarán como en los otros ensayos la evolución de la temperatura y la presión durante el mismo.

Para entender todas las señales obtenidas es conveniente comentar que tras el término del ensayo la observación del montaje ha arrojado la **existencia de la rotura** del mismo. Primero se mostrará la evolución de la temperatura a lo largo del ensayo (Figura 79).

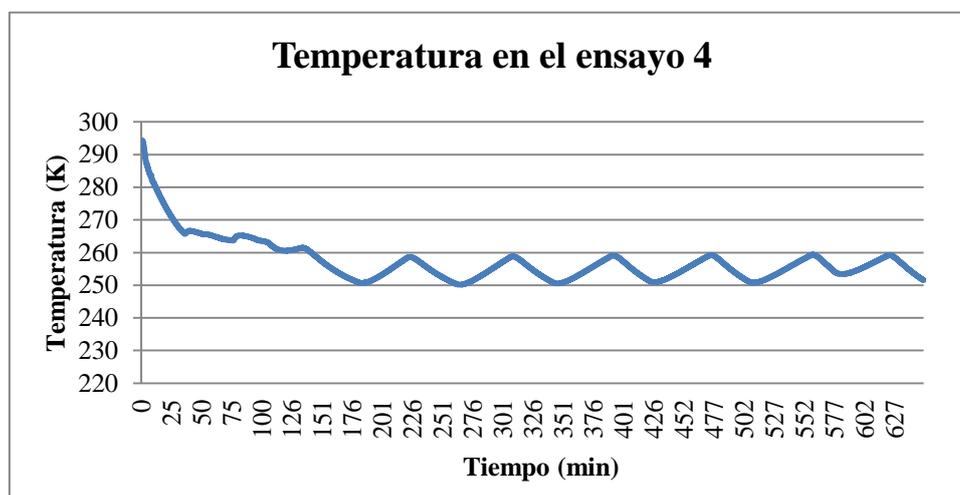
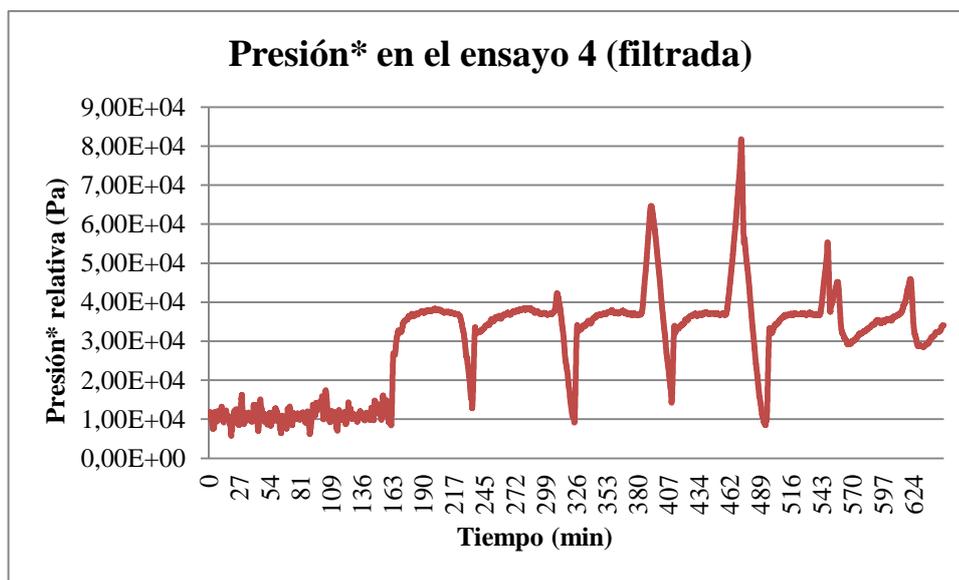


Figura 79: Temperatura registrada durante el ensayo 4.

El desarrollo de la señal de temperatura durante el ensayo mostrada Figura 79 presenta una gran diferencia con el de ensayos anteriores. Se puede resumir en una bajada rápida de temperaturas hasta llegar a un valor cercano a 273K aunque más bajo, cambio de fase y nueva bajada hasta llegar a la temperatura de congelación del frigorífico usado. Existió un

comportamiento algo diferente a la hora de cambio de fase debido a se produjo a una temperatura más baja que 273K y la temperatura no se mantuvo constante. Este comportamiento puede indicar el alcance de grandes presiones en el interior del tubo.

Lo captado por el sensor de presión puede ser de gran ayuda para comprender lo sucedido. Como se muestra en la Figura 80 a pesar de que al principio la señal de presión apenas varió como en casos anteriores por la presencia de hielo a partir del minuto 150 del ensayo se produjo una subida brusca de la misma. Este hecho será tomado como el punto de rotura del montaje.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 80: Temperatura registrada durante el ensayo 4.

Mostrando la combinación de la señal de temperatura y presión (Figura 81) se expone lo sucedido en el ensayo. Hasta que se produjo la rotura los datos obtenidos eran similares a los anteriores ensayos produciéndose el cambio de fase a una temperatura aproximadamente constante pero en torno al minuto 150 (700 s) del ensayo. Poco después se produjo la rotura del tubo bajando bruscamente la temperatura ya que el agua que todavía no se había convertido en hielo saldría por la obertura formada. El sensor de presión detectó un cambio de presión pero por la presencia del hielo el valor de la misma fue totalmente incoherente, al producirse la rotura la presión en el interior del tubo debió de bajar bruscamente y situarse en un valor en torno a la atmosférica (0 Pa de presión relativa) en lugar de aumentar.

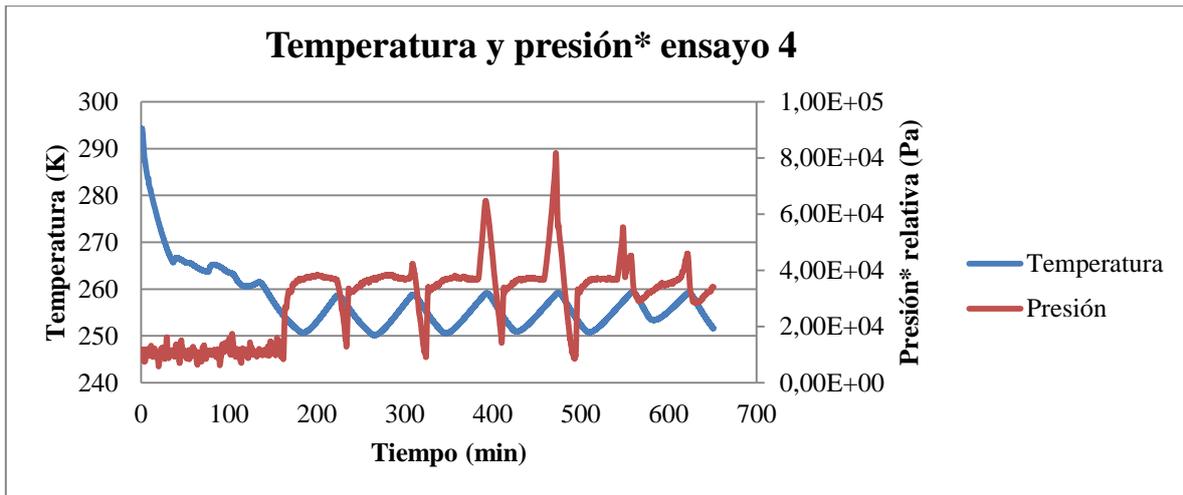


Figura 81: Presión y temperaturas registradas durante el ensayo 4.

Por ultimo quedaría mostrar el estado del dispositivo una vez terminado el ensayo. Este se puede observar en la Figura 82.



Figura 82: Estado del montaje tras el ensayo 4.

En la Figura 82 se aprecia claramente la **rotura del dispositivo** debido a la presión excesiva alcanzada en el interior del tubo de cobre. La magnitud de la misma presión fue tal que parte del tubo de silicona macizo situado en el interior del tubo de cobre fue expulsado del interior en el momento de la rotura junto a parte del agua no solidificada. Cabe destacar que la rotura se ha producido por los conectores de cobre soldador cuyo espesor es menor al

tubo de cobre. Esto hace que sea la parte menos resistente del montaje como la rotura producida demuestra.

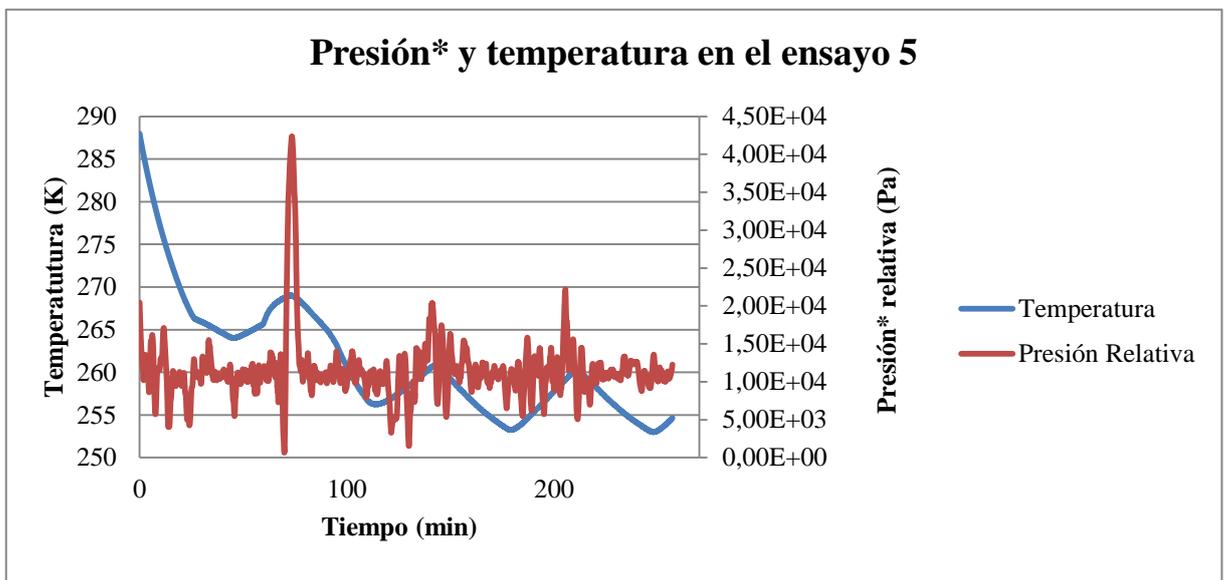
Con todo ello en este ensayo se concluye que para las condiciones de ensayo el sistema no es funcional ni fiable. Este hecho sucede a pesar que la relación entre diámetro $r_D = 1.77$ es menor que el elegido 3.

Todo esto no hace más que validar el modelo teórico desarrollado para aproximar la presión al variar la temperatura. En dicho modelo para el caso de tubo macizo las presiones alcanzadas eran extremadamente altas.

- **Ensayo 5**

Los parámetros del ensayo se encuentran expuestos en las Tabla 18 y Tabla 19 . Se trata de una repetición de ensayo anterior. Se expondrán a continuación la evolución de la temperatura y presión registradas en durante los mismos. Esta evolución será mostrada en la Figura 83.

Antes de representar ninguno de estos parámetros conviene hacer notar en que este ensayo también ha acabado con **la rotura del montaje**.



*Señal de presión no correspondiente con la realidad

Figura 83: Presión y temperatura registradas durante el ensayo 5.

En cuanto a la temperatura se puede distinguir perfectamente en la Figura 83 como tras producirse un descenso rápido de la misma a temperaturas en torno a 273K, ésta no se mantuvo a una temperatura constante en torno a ese valor por un periodo elevado de tiempo. Apenas existió el periodo de temperatura constante como por ejemplo sí sucedía con el ensayo 2 (para ello no hay más que comparar la Figura 83 con la Figura 71). Esto puede indicar que la rotura se produjo poco después del comienzo de cambio de fase contrastando con el ensayo anterior. Si se examina la Figura 79 se comprueba que el tiempo en el que la temperatura se mantuvo constante en este es menor en el ensayo 5 que en el 6. Posteriormente continuó el comportamiento anteriormente registrado, es decir, se mantuvo la oscilación de la temperatura en torno a los 253K.

Es posible deducir el momento de la rotura gracias a la señal dada por el sensor de presión. El pico de presión que se produjo junto al cambio de temperatura relativamente brusco en torno al minuto 70 (4200 s) se tomará como el instante de rotura. No se debe olvidar que la presencia del hielo hizo que la señal sea errónea. Dicho comportamiento se confirma con la muestra de lo caótico de la presión mostrada en la Figura 83 a pesar de haber sido filtrada como las anteriores.

Tras el ensayo una simple observación del montaje descubre **la existencia de rotura en el tubo de cobre**. Por lo tanto, bajo las condiciones de este ensayo la funcionalidad del montaje es nula. Es decir, de nuevo se confirman los resultados hallados con el planteamiento del modelo el estudio teórico.

5.4.2 Resultados de los ensayos del bloque II

En este bloque de ensayos se sometieron al montaje descrito a condiciones extremas de temperatura que se pueden dar en el funcionamiento de un captador solar aplicando calor con un soplete de gas.

A diferencia del bloque de ensayos anterior ya no existe la formación del hielo en el interior del montaje. Por lo tanto, el sensor de presión desempeñó su función con total normalidad pudiéndose obtener la monitorización de la presión durante todo el ensayo.

- **Ensayo 6**

Los parámetros de dicho ensayo se exponen en la Tabla 20. Se mostrarán al igual que los ensayos anteriores la representación de la temperatura y presión en el interior de los montajes durante el tiempo de realización del ensayo. Estos están registrados en la Figura 84.

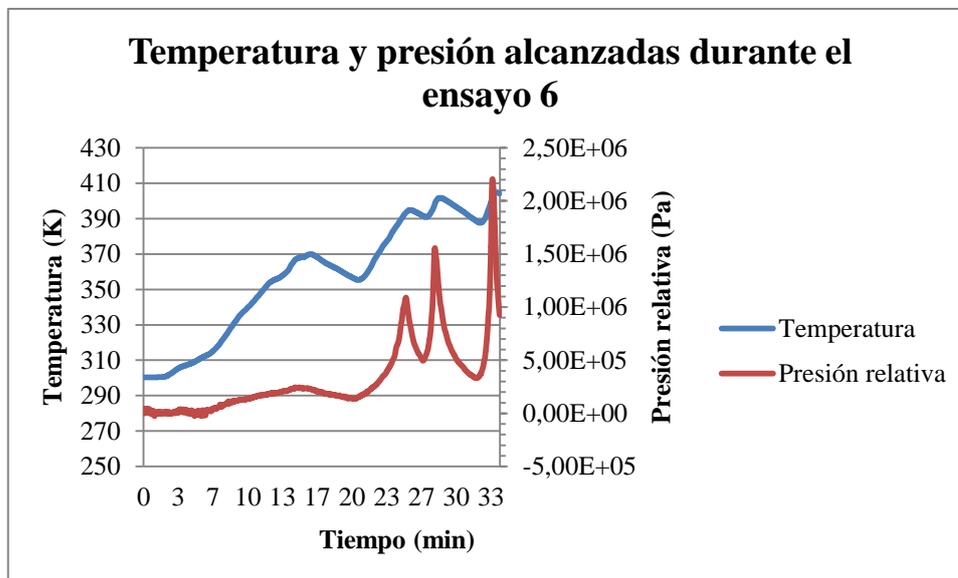


Figura 84: Presión y temperatura registradas durante el ensayo 6.

Según lo expuesto en la Figura 84, al aplicar la acción de la llama sobre el montaje la temperatura aumentó su valor hasta llegar aproximadamente a 370K donde se produjo una parada en la subida debido a problemas relacionados con el soplete que fueron rápidamente solucionados para poder continuar el ensayo. Cuando la temperatura alcanzó unos 390K se produjo un incremento rápido de la presión y por ello se apartó la llama. A partir de aquí se produjo el mismo proceso hasta alcanzar una presión lo suficientemente elevada como para dejar de aplicar calor.

La presión fue aumentando de manera suave hasta llegar al entorno de los 390K donde se produjeron picos de presión al aplicar calor sobre las mismas. Se atribuyen estos picos de presión a dos factores principales.

- 1) Cercanía de la llama al sensor. El sensor usado no está diseñado para soportar la presencia de ninguna llama en su cercanía pudiendo introducir error en el mismo.
- 2) Producción de vapor en el interior del tubo que altere la medida del sensor. Cabe destacar la existencia de ninguna protección contra las sobrepresiones como vaso de

expansión no hará ni válvula de seguridad la acumulación de vapor aumenta de manera brusca la presión.

Sin embargo, las presiones alcanzadas no son tan elevadas como las planteadas en el modelo teórico usado. Como se ve en la representación de la temperatura alcanzada frente a la presión en el ensayo mostrada en la Figura 85.

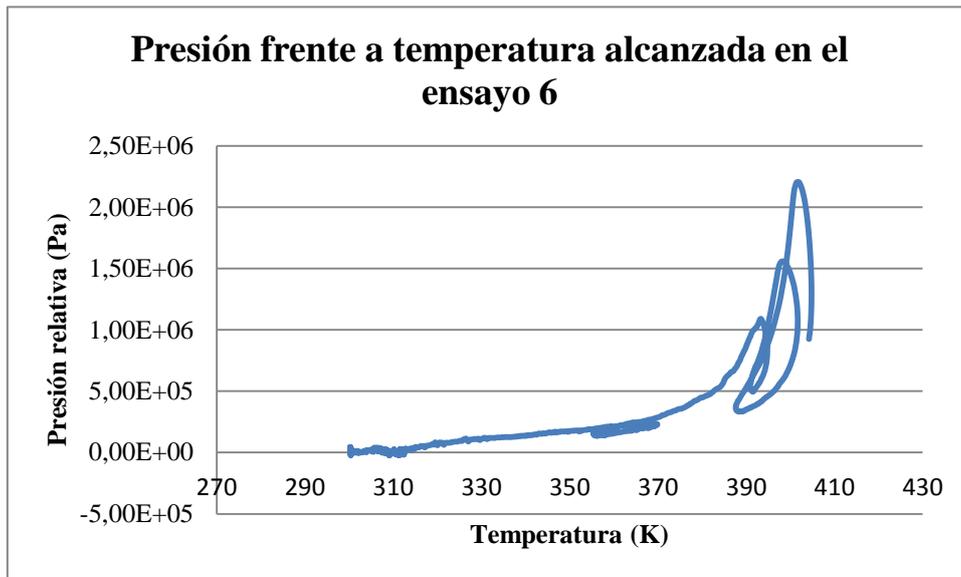


Figura 85: Presión frente temperatura registradas durante el ensayo 6.

Como se aprecia la presión son del entorno de 2.5 MPa, una presión excesiva. Sobre todo si se compara con la Figura 58 enmarcada en el estudio teórico. Para una mejor interpretación de las conclusiones se volverá a representar de nuevo esta figura con la etiqueta de Figura 86.

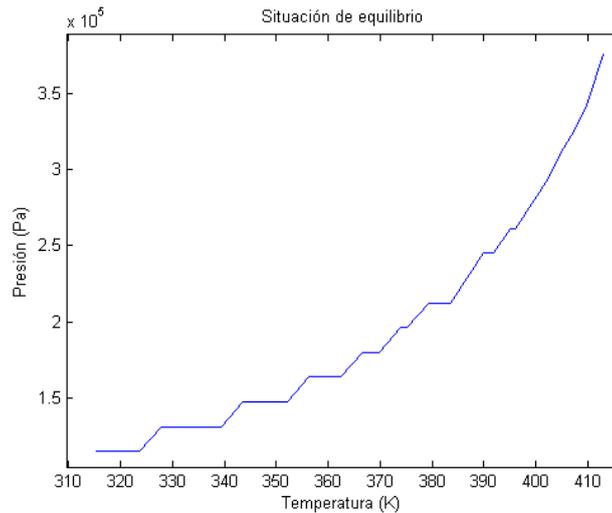


Figura 86: Valores de presión y temperatura que se alcanzan en el equilibrio en el conjunto para el tubo hueco de silicona.

La tendencia presenta en ambas figuras es la misma. Sin embargo los valores de presión alcanzadas por la señal registrada son mayores. Esto se debe principalmente por la aparición del vapor que no se tuvo en cuenta en el modelo debido a la existencia en los captadores de elementos como válvula de seguridad y vasos de expansión que evitarían el problema.

Sin embargo, esto no basta para explicar los valores alcanzados. De hecho son tan elevados que deberían haber producido alguna marca en el montaje tras la realización de los ensayos. Esto no es cierto según lo mostrado en la Figura 87. Esto hace pensar que el sensor de presión no está preparado para captar la presión cuando se produce la ebullición del líquido, dando una señal errónea cuando aparece el mismo.

Además la aparición de vapor se producirá antes de los predicho en el modelo ya que la relación de diámetros en este ensayos es de 2.88 (Tabla 20) por debajo del valor usado en el ensayo. Esto significa que el volumen ocupado por el agua es menor que el considerado por el modelo produciéndose el cambio de fase a una temperatura algo menor debido a la menor presión existente para esa temperatura.

Se comprobó tras el ensayo realizado que **no existió ninguna deformación ni rotura del dispositivo** a pesar de la alta presión alcanzada. El estado del montaje tal el ensayo se puede comprobar en la Figura 87.



Figura 87: Montaje tras el ensayo 6.

- **Ensayo 7**

El ensayo número 7 se trata de una repetición de los ensayos anterior según lo descrito en la Tabla 20. Se realizó poco después del ensayo anterior una vez que la temperatura volvió a condiciones cercanas al ambiente. Este hecho será determinante en los resultados obtenidos.

Repitiendo el procedimiento de los ensayos anteriores se representará la evolución de la presión y temperatura durante el ensayo (Figura 88).

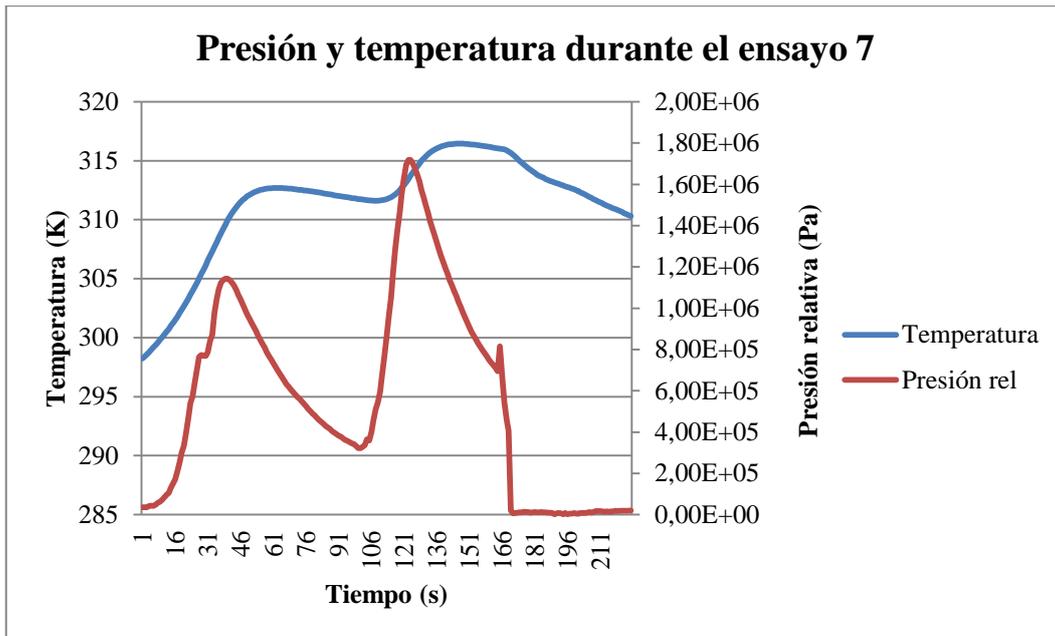


Figura 88: Presión y temperatura registradas durante el ensayo 7.

A la vista de los resultados de la Figura 88 se produjo apenas un incremento de temperatura cuando la señal de la presión se dispara de repente. Se piensa que este hecho es debido a la aparición de vapor en el caso anterior y la falta de tiempo en que se ha dejado enfriar. Es posible que el acercamiento de la llama también afectara al mismo sensor. Esta es la causa de que la representación de la presión frente a la temperatura no puede ser objeto de un estudio con conclusiones coherentes.

No hay nada más que tener en cuenta los resultados expuestos en Figura 89 para corroborar lo anteriormente expuesto. Como se muestra en dicha figura la no existe una tendencia marcada como en el ensayo anterior (Figura 85)

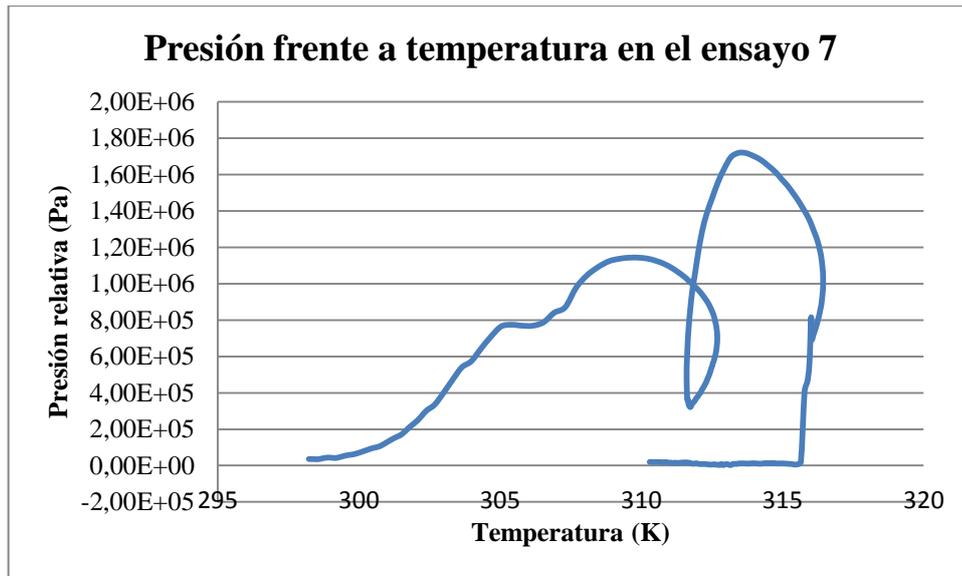


Figura 89: Presión frente a temperatura registradas durante el ensayo 7.

Debido a la alta señal de presión alcanzada tras el ensayo, se observó y comprobó el montaje tras llevarse a cabo el ensayo. Incluso se procedió al desarme del mismo. (Figura 90 (a)). Como se aprecian en las fotografías tomadas del dispositivo usado para la experimentación tras en ensayo (Figura 90 (a) y (b), Figura 91) no existen daños ni en el tubo de cobre, ni el tubo interior de silicona ni en ningún otro componente.

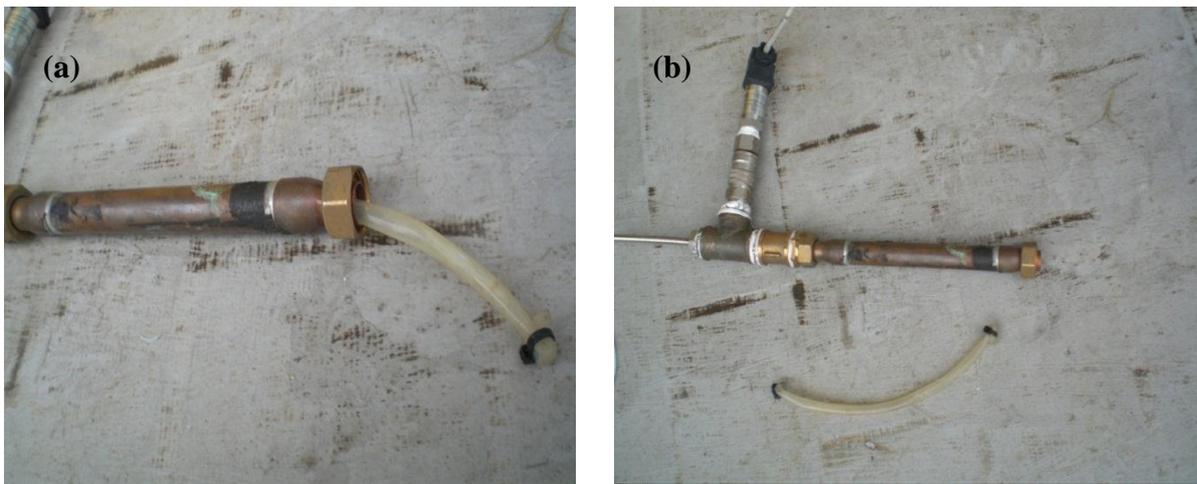


Figura 90: (a) Desarme del montaje tras el ensayo 7. (b) Estado del tubo interior de silicona y exterior de cobre tras el ensayo 7.



Figura 91: Estado del tubo interior de silicona y exterior de cobre tras el ensayo 7.

Por lo tanto se concluye de este ensayo el mantenimiento de la funcionalidad del montaje tras ser sometido a condiciones de temperaturas elevadas que se pueden dar en el comportamiento al no presentar daño en ninguno de los componentes usados.

5.5 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS

El desarrollo de estos ensayos ha sido de gran utilidad para demostrar experimentalmente los resultados hallados en el apartado 2 estudio teórico.

En cuanto a las condiciones en las que la solución propuesta tiene que mostrar su funcionalidad (condiciones de temperaturas frías) los resultados del bloque I indican la imposibilidad de construir el dispositivo propuesto con un tubo macizo aunque sea de silicona (material altamente deformable) como se recogía en el modelo. Aunque para el caso del tubo hueco de silicona el adecuado funcionamiento del dicho dispositivo sólo se da bajo unos ciertos valores de la relación entre el diámetro interior del tubo de cobre y diámetro exterior del tubo flexible ($r_D < 3$) tal y como se recomendaba en el estudio geométrico del problema enmarcado dentro del apartado 2.

El mayor inconveniente para este bloque de ensayos ha sido la imposibilidad de captar un adecuado valor de la presión alcanzada en el interior del montaje a causa de la aparición del hielo. Sin embargo, la señal dada por el sensor de presión ha sido de utilidad para establecer el momento de la rotura del tubo de cobre para los casos en que este fenómeno se ha dado.

En el caso de ser sometido el montaje a condiciones elevadas de temperatura también se comprueba la idoneidad del modelo, al menos cualitativamente. En el ensayo 6 se muestra una evolución de la presión frente a la temperatura similar a la predicha por el modelo planteado aunque no cuantitativamente válida debido a la aparición de vapor. En estos ensayos se comprueba también una mejora del funcionamiento respecto a la presión frente al caso de tubo de cobre relleno de agua completamente.

Por último, es importante destacar que de esta serie de pruebas se extrae una importante conclusión. La selección de los materiales usados en la solución propuesta se hizo con el requerimiento del mantenimiento de las propiedades de los mismos bajo condiciones de temperaturas cambiantes. El hecho de que no se haya producido desperfecto alguno en ningún de los elementos del montaje tras someterlo a condiciones variable de presión y temperatura confirma la capacidad de estos materiales para ser usados en captadores solares planos para el calentamiento de agua caliente sanitaria.