

## **4. ESTUDIO TEÓRICO**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En este apartado se realiza un estudio sobre todas las consideraciones previas necesarias para el desarrollo de la propuesta presentada. En primer lugar se procede a un estudio exhaustivo de los materiales y sustancias que intervienen en la configuración propuesta. Con estas características se desarrolla un modelo capaz de predecir las condiciones alcanzadas en el interior del tubo rígido metálico frente a heladas permitiendo la elección de materiales y geometrías adecuadas para la implementación de la solución descrita.

También será objeto de estudio la respuesta de la solución propuesta en condiciones de funcionamiento ordinario de los captadores solares planos. Algunos de los aspectos tenidos en cuenta son la presión alcanzada cuando se procede al calentamiento del fluido utilizado y la nueva pérdida de carga ocasionada por el paso del dicho fluido por las tuberías a las que se le ha introducido un tubo flexible en su interior.

### **4.2 MATERIALES A UTILIZAR**

#### **4.2.1 Características deseadas**

Es necesario conocer las condiciones a las que los distintos materiales que conforman la solución propuesta van estar expuestos para poder evaluar su comportamiento. Para ello el primer paso necesario consiste en definir claramente el problema que se presenta en las heladas.

Es sobradamente conocido que el problema relacionado con la aparición de heladas se trata de la rotura de la tubería que contiene el agua al producirse un aumento de volumen específico del agua cuando se pasa del estado sólido a estado líquido. Esta rotura está producida por el aumento de la presión en el interior de la tubería debido al aumento de volumen producido en el cambio de fase del agua. Este hecho hace que la tensión a la que se somete la pared de la tubería aumente bruscamente.

Las tuberías en los colectores solares están hechas de un material metálico con conductividad térmica adecuada que facilita la transferencia de calor al interior de la tubería dónde se encuentra el agua a calentar. Un material que se ajusta a esta descripción es el cobre, muy usado en este tipo de tuberías, que será el que se use para probar el buen funcionamiento del sistema de protección frente a las heladas propuesto.

Los metales se pueden tratar como materiales de comportamiento elástico lineales. La causa específica de la rotura de los mismos es debido a que la tensión a la que están sometidos sobrepasa la tensión de plastificación, a partir de la cual el material sufre deformaciones plásticas irreversibles. Este hecho provoca que la tubería no pueda cumplir su función adecuadamente. Si la tensión sigue incrementándose incluso puede superar la tensión de rotura, haciendo que el material se rompa.

Para la construcción del tubo interior es necesario usar un material con características diferentes al cobre para que no sufra los mismos problemas. Los materiales a utilizar deben de cumplir las siguientes propiedades:

- **Impermeabilidad:** los tubos de dicho material van a estar en un medio acuoso y la misma agua no debe de traspasarlos.

- **Inerte químicamente frente al agua y al aire** (en caso de que el tubo sea hueco). Hay que evitar a toda costa que una posible reacción del material del que esté hecho el tubo flexible pueda provocar daño en la solución propuesta. Esto se refiere tanto a reacciones rápidas y violentas que provocarían daños rápidamente como a reacciones lenta que puedan causar daños a largo como la aparición de corrosión ya que el montaje propuesto va a trabajar durante toda la vida útil del captador.

- **Económico:** Aunque en este estudio no se van tratar temas relacionados con la viabilidad económica, para una posible aplicación el coste del material no debe de ser excesivamente elevado.

- **Fácil de conseguir:** Esta propiedad está íntimamente relacionada con la viabilidad de la aplicación práctica de la solución.

- **Deformable:** El material a escoger debe de oponer poca resistencia al cambio de forma para que no se generen excesivas tensiones cuando dicho material tenga que disminuir su volumen para que se contrarreste el aumento de volumen del agua (sobre todo en el caso de que el tubo flexible sea macizo).

- **Elástico:** El material se deforma en el instante en que se produzca la congelación del agua en el interior del tubo. Una vez que deje de estar sometido a las condiciones que provocan la helada, el material debe de tender a volver a su estado inicial. De esta forma se garantiza que el conjunto ofrezca protección frente a la sobrepresión cuando se den esas circunstancias de nuevo.

- **Mantenimiento de sus propiedades para el rango de presión y temperaturas** en que el colector solar trabaja, tanto en condiciones de funcionamiento (temperaturas altas de orden de 370 K) como en las condiciones de temperaturas en la que existen riesgo de heladas.

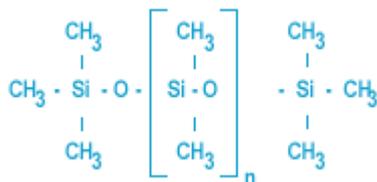
#### 4.2.2 Descripción de los posibles materiales a usar

##### - Materiales los tubos

Siguiendo las propiedades que han sido sugeridas en el apartado anterior, han sido escogidos dos posibles materiales para la realización del tubo interior de la solución. Estos materiales son los siguientes:

##### -Silicona:

Teniendo en cuenta lo expuesto en [29] y [9] se puede concluir que silicona es el nombre alternativo para los polisiloxanos (Figura 18), siendo éste más frecuentemente usado como es la base de la fabricación de productos comerciales. Este tipo de plástico es usado ampliamente en el mundo de la ingeniería, por lo que existe una gran facilidad para su obtención.



**Figura 18:** Polidimetilsilano, silicona básica y más común [26].

Ajustando la longitud de las cadenas de Si-O, la funcionalidad de los grupos unidos a la cadena principal y los entrecruzamientos en la cadena del polímero se pueden obtener una infinidad de variedad de materiales.

Toda esta variedad de materiales tienen en común ser un plástico semiorgánico con gran peso molecular que puede darse desde estado sólido hasta en flexibles plásticos. Presenta una excelente resistencia al calor (hasta 530 K), resistencia química (ver Tabla 5), buenas propiedades eléctricas como aislante y otras muchas cualidades, aunque su precio no es muy económico.

Un aspecto muy importante sobre este tipo de plástico es el mantenimiento tanto de su propiedades mecánicas como eléctricas en un amplio rango de temperaturas (hasta unos 590 K °C) [29] y durante periodos largos de tiempo. Esta característica en concreto hace que la silicona sea muy atractiva para el uso en este estudio.

Las propiedades de este tipo de silicona se exponen de forma más clara en las Tabla 4 y Tabla 5.

Nombre común	Designación según ASTM D 1418	Gravedad específica	Propiedades mecánicas					Temperatura de servicio (Uso continuo)	
			Dureza Shore	Resistencia la tracción, MPa	Elongación máxima, %	Resistencia aparición de grietas	Resistencia a la abrasión	min, K	max, K
Silicona	VMQ	1.1-1.6	20 <sup>a</sup> -90 <sup>a</sup>	10.3	100-800	Moderada	Pobre	156	533

**Tabla 4:** Propiedades de la silicona [2]

Nombre común	Designación según ASTM D 1418	Resistencia (a)								
		Ozono	Oxidación	Agua	Alcalinos	Hidrocarburos			Alcohol	Ácido
						Alifáticos	Aromáticos	Halogenados		
Silicona	VMQ	E	E	E	P-M	P-M	P-M	M	M	B-MB

(a) E:Excelente, MG-Muy bueno, B- Bueno, M-moderado, P-Pobre

**Tabla 5:** Resistencia química de la silicona [2].

Entre las propiedades mostradas en la Tabla 4 destaca la elongación máxima, esto quiere decir la enorme capacidad de deformación que tiene este tipo de material. También implica la poca resistencia que ofrece a la deformación. Como se ha descrito anteriormente ésta es una característica determinante para su elección para el estudio.

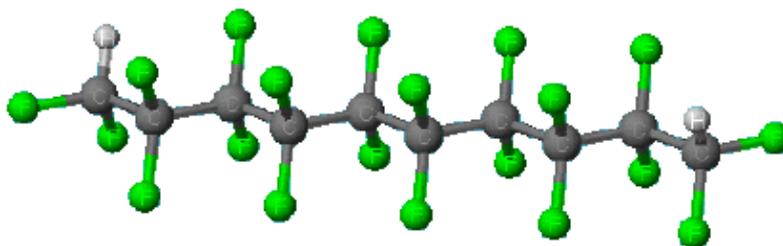
Además, destaca de lo obtenido en la Tabla 5 la buena resistencia tanto al agua como a la corrosión, unos de los peligros que pueden darse con más facilidad en el montaje propuesta. Esto garantiza que la solución propuesta con el tubo realizado de este material tiene garantizada una larga vida útil.

## -Teflón

El teflón es el nombre común dado para nombrar al politetrafluoroetileno. Como se describe en [29] este plástico pertenece a la familia de los fluoroplásticos o plásticos fluorocarbonados. Consisten en polímeros compuestos por monómeros de fluorina y carbono.

Las propiedades compartidas por toda esta familia de polímeros son: ser extremadamente inertes químicamente, bajo coeficiente de fricción, buenas propiedades eléctricas en cuanto al aislamiento, baja permeabilidad y gran resistencia a los daños provocados por la erosión y el ozono. Todas ellas muy adecuadas para la aplicación a este estudio. Sin embargo, no presentan muy buenas propiedades mecánicas.

En concreto el teflón, más conocido por PTFE o TFE (Figura 19), es un material único debido a sus excelentes propiedades, que destacan entre todos los miembros de la familia de los fluoroplásticos. Entre ellas resaltan su resistencia a los efectos del calor (hasta aproximadamente los 560K), inocuidad química, aislamiento eléctrico...



**Teflon,  $-(CF_2CF_2)-$**

**Figura 19:** Composición molecular del Politetrafluoroetileno.

En cuanto a su resistencia a agentes químicos, la única sustancia conocida que puede dañar a este polímero son metales alcalinos en estado líquido o disueltos en amonio [29]. Tales sustancias no se darán nunca en la aplicación a desarrollar. Para aplicaciones prácticas se considera que el plástico no se ve afectado con el contacto con el agua y su estabilidad frente a la temperatura es tal que ni sus propiedades ni eléctricas ni mecánicas cambian en intervalos largos de tiempo (meses) a temperaturas altas como los 250 °C.

Las propiedades de teflón se muestran con más detenimiento en las Tabla 6 y Tabla 7.

Propiedades	PTFE	Método de evaluación	Propiedades	PTFE	Método de evaluación
<b>General</b>			<b>Térmica</b>		
Gravedad específica	2.13-2.19	ASTM D 792	Deflexión térmica bajo carga		
Absorción de agua, %	Ninguna	ASTM D 570	A 455 kPa, °C	120	ASTM D 648
Inflamabilidad	V-0	UL 94	A 1.8 Mpa, °C	50	ASTM D 648
			Punto de fusión °C	325	

**Tabla 6:** Propiedades generales y térmicas del teflón [2].

Propiedades	PTFE	Método de evaluación	Propiedades	PTFE	Método de evaluación
<b>Mecánicas</b>			<b>Dureza</b>		
Resistencia a tracción (MPa)	28-45	ASTM D 638	Durómetro D	50 a 65	ASTM D 2240
Resistencia a la flexión (MPa)	NO hay rotura	ASTM D 790	Shore D	-	ASTM D 785
Módulo de flexión (GPa)	0.48-0.76	ASTM D 790	Rockwell R	45	ASTM D 785

**Tabla 7:** Propiedades mecánicas del teflón [2].

Se observa que las propiedades enumeradas en las tablas anteriores (Tabla 6 y Tabla 7) coinciden con la descripción dada del material. La más destacada de sus propiedades es el mantenimiento de sus excelentes propiedades de resistencia frente a agentes externos durante grandes periodos de tiempo.

#### - **Resto de sustancias del conjunto**

El resto de sustancias que intervienen en el conjunto son tan comunes que se considera que no es conveniente una descripción exhaustiva de las mismas en este estudio. Se tratan de las siguientes:

**-Agua:** El agua usada en la aplicación se trata del agua potable que es suministrada por la red de suministro de las mismas en las distintas localidades. Hay que tener en cuenta que la composición de la misma puede variar dependiendo de la localización de la misma.

Aunque este aspecto es determinante a la hora de aparición de depósitos calcinosos, el punto crítico de la solución propuesta es su funcionalidad frente a la aparición de heladas.

Dentro de las composiciones usuales que existen para el agua potable el proceso de congelación no varía notablemente. Por lo que para un primer estudio no se tendrá en cuenta.

La propiedad determinante del agua es el extraño comportamiento con respecto a la mayoría del resto de sustancias presentes en la naturaleza en el cambio de fase. En lugar de tener una mayor densidad en estado sólido que en el líquido se produce un aumento de volumen específico en este proceso. Este aumento es el causante de los problemas mecánicos en las tuberías asociados a las heladas.

**-Aire:** La sustancia gaseosa usada en la configuración de tubo hueco es el aire debido a tres razones básicas: su facilidad de obtención, no tener coste alguno y no ser nocivo en el caso de que llegue a disolverse en el agua destinada al consumo.

Como el resto de los gases posee una gran capacidad de reducción de volumen sin la necesidad de una aplicación de presión elevada o, al menos, mucho menor que el caso de los materiales sólidos. Esto hace a priori la solución de un tubo flexible relleno de aire muy adecuada para el estudio.

#### **4.2.3 Comportamiento de los materiales elegidos**

A la hora de plantear el problema de forma general, conviene conocer el comportamiento de las sustancias que participan en el problema en el rango de presiones y temperaturas en el que es posible que se den en el interior de la tubería del captador solar.

Para este caso de heladas, los rangos de presión y de temperatura en los que se va estudiar el comportamiento de las distintas sustancias sería:

$$\text{Presión } \epsilon(0.05 \text{ MPa}, 0.5 \text{ MPa}); \text{ Temperatura } \epsilon(263\text{K}, 293\text{K})$$

Estos valores han sido escogidos teniendo en cuenta que para una presión en torno a la atmosférica (del orden de  $10^5$  Pa) el cambio de fase líquida a sólida del agua se produce en una temperatura de en torno a 273.15 K (ver Figura 20 ). En los rangos escogidos de presión y temperatura escogidos existen combinaciones de valores de presiones y temperaturas que muy difícilmente se van a dar en la realidad. La razón de la elección de rangos tan amplios es una medida de seguridad y la aplicación del estudio de este proyecto para lugares con características climáticas distintas.

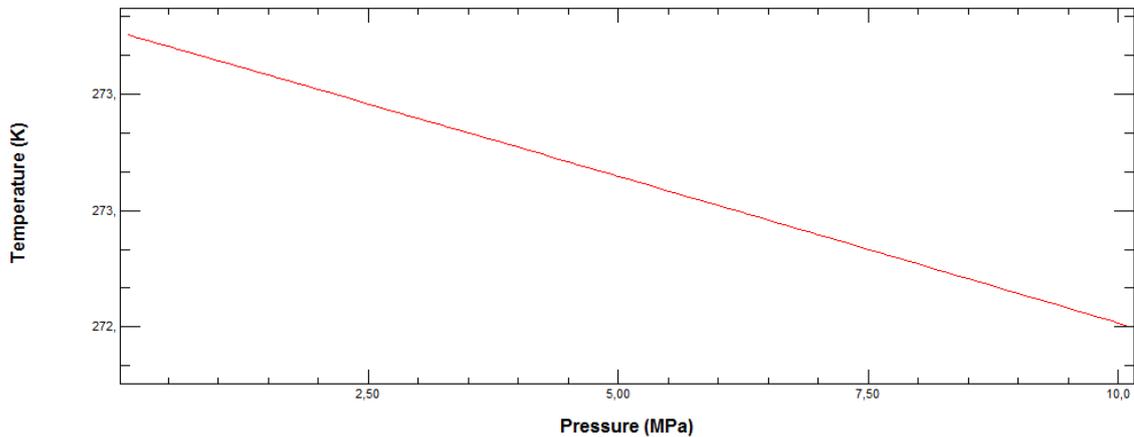
### - Comportamiento del agua

El agua es el componente esencial en el estudio de la viabilidad de la solución propuesta. En los rangos de presiones y temperaturas mencionados anteriormente es clave tener en cuenta la existencia del cambio de fase de líquido a sólido para para combinaciones de presión y temperatura ya que el comportamiento de la fase sólida y líquida del agua frente a diferentes condiciones de presión y temperatura es muy distinto.

Por lo tanto, el primer paso será el estudio de las combinaciones de presión y temperatura en el que se produce este cambio de comportamiento. Para ello se utilizará la aplicación informática Refprop [24].

El uso de esta aplicación se debe a que contiene tabuladas las ecuaciones de estado de varios fluidos. Estos valores se basan en valores experimentales por lo que el error que se puede cometer con respecto al comportamiento real de los fluidos es mínimo. Por lo tanto, se trata de una mejor opción que otras ecuaciones que aproximan el comportamiento del fluido.

Con los datos proporcionados en la aplicación, se puede obtener los valores de presión y temperatura dentro del rango dado anteriormente se produce. Los resultados se muestran en la Figura 20.



**Figura 20:** Rango de presión y temperatura en el que se produce el cambio de fase de líquido a sólido en el agua [24].

Como se observa en la Figura 20, para el rango de presiones escogido la variación de temperatura a la que produce el cambio de fase es del orden de centésimas de grados Kelvin.

Por lo tanto, es conveniente realizar la siguiente aproximación: se considera que la temperatura a la que se produce el cambio de fase para el rango de presiones escogido se considera constante e igual a 273.15K (0°C).

Una vez definida los valores de presión y temperatura en que se divide el comportamiento en fase líquida y sólida del agua, se pasará a definir el comportamiento del agua en el rango definido de presiones y temperaturas en ambos estados. En este caso se usan dos ecuaciones para modelar el comportamiento del agua, una para el estado líquido y otra para el sólido (hielo).

La evolución de la característica que más interesa conocer es la del volumen específico ya que el aumento de esta propiedad del agua es la causante de la sobrepresión que se produce en los tubos del captador solar en condiciones de helada.

Para describir el comportamiento del agua líquida en condiciones cercanas al cambio de fase se usará un modelo analítico específicamente desarrollado para esta situación. Este consiste en una ecuación de estado del agua líquida en un rango de presiones de 0.1 a 10 MPa cercano al punto de máxima densidad (mínimo volumen específico) construido por Thomsen y Hartka [23].

$$v_{ecw}(T, P) = v_{e0cw}(1 + \lambda(T - T_{0w} + ap)^2 - k_0p) \quad (3.1)$$

Siendo:

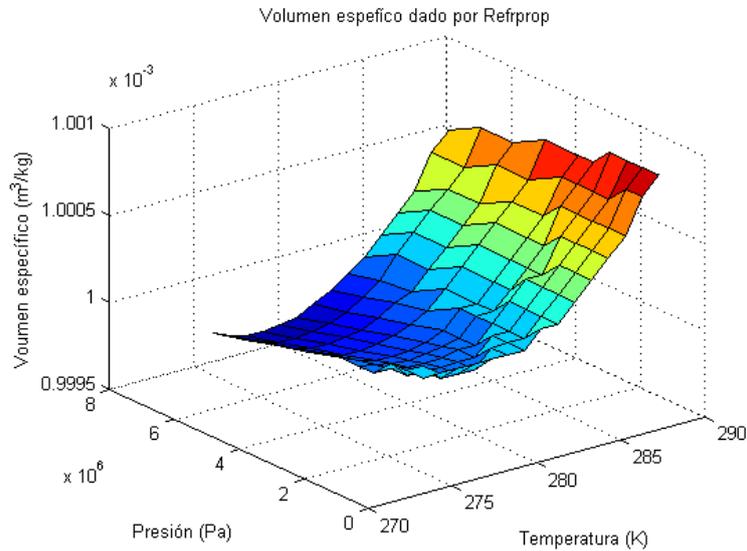
$v_{ecw} \left( \frac{m^3}{kg} \right) \rightarrow$  Volumen específico del agua líquida a una temperatura de T (K) y a una presión de p (Pa) dado por la correlación.

$$v_{e0cw} = 1,00008 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg} [6]; \quad \lambda = 8 * 10^{-6} K^{-2} [6]; \quad T_{0w} = 277 K [6]$$

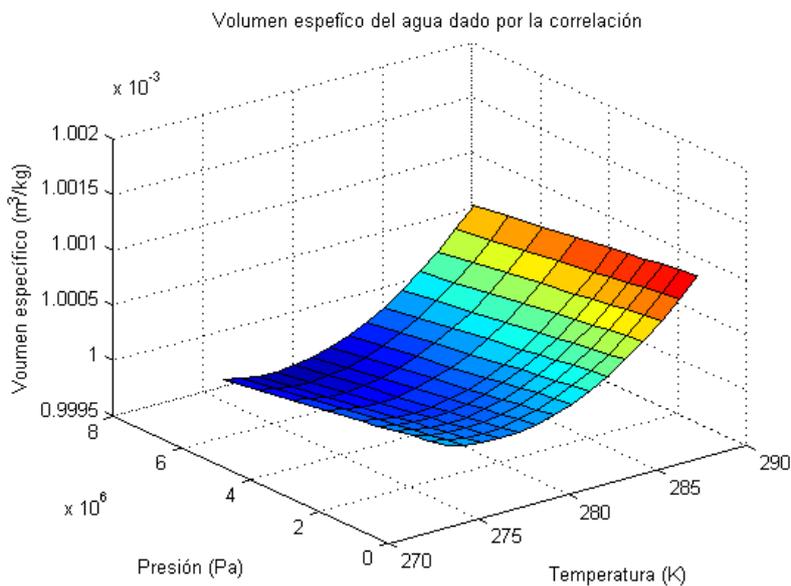
$$a = 2 * 10^{-7} \frac{m s^2 K}{kg} [6]; \quad k_0 = 5 * 10^{-10} \frac{m s^2}{kg} [6]$$

La principal razón por la que se ha usado esta aproximación en lugar de la aplicación informática Refprop [24] es el mejor manejo del tratamiento de la expresión (3.1) cuando se trata de la implementación del estudio realizado. Para asegurarse la idoneidad del uso de esta ecuación se comparan los valores del volumen específico del agua proporcionados tanto por el Refprop como por la correlación (3.1). Todo ello en el rango de presiones y temperatura en

la que se va a utilizar la aproximación (3.1). Los resultados se muestran en las siguientes figuras.



**Figura 21:** Volumen específico del agua proporcionado por Refprop [24].



**Figura 22:** Volumen específico del agua proporcionado por la correlación (3.1).

Se aprecia la similitud de los valores proporcionados en la Figura 23 y Figura 24. De hecho el **error relativo medio** que se produce al realizar la aproximación de los resultados proporcionados en Refprop con la correlación es de **únicamente del 0.0039%**.

En cuanto al comportamiento del hielo, al ser un material sólido (tiene variaciones de volumen menores con la presión y temperatura comparados con otros estados) se usa la ecuación térmica de estado de sistemas simples con coeficientes térmicos constantes [15].

$$v_{esol}(T, p) = v_{e0sol} \exp(\alpha_{vsol}(T - T_{0sol}) - k_{tsol}(p - P_{0sol})) \quad (3.2)$$

Siendo:

$v_{esol} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$  → Volumen específico del sólido a estudiar a una temperatura de T (K) y una presión de p (Pa).

$T_{0sol}(K)$  → Temperatura de referencia ecuación de estado coeficientes constantes,  
 $T_{0sol} = 273,3 K$ .

$P_{0sol}(Pa)$  → Presión de referencia ecuación de estado coeficientes constantes,  
 $P_{0sol} = 101325 Pa$ .

$v_{e0sol} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$  → Volumen específico del sólido de a temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

$\alpha_{vsol} (K^{-1})$  → Coeficiente de dilatación cúbica del sólido a estudiar.

$k_{tsol}(Pa^{-1})$  → Coeficiente de compresibilidad isoterma del sólido a estudiar.

Según el artículo publicado por Morgan J. J. en Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology [23]. Las propiedades descritas anteriormente para el hielo son las siguientes.

$$v_{e0h} = 916,8^{-1} \frac{kg}{m^3} = 1,091 * \frac{10^{-3}m^3}{kg}; \quad \alpha_h = 3 * 57.2 * 10^{-6} = 171.6 * 10^{-6} K^{-1};$$

$$k_{Th} = 0.12 * 10^{-9} Pa^{-1}$$

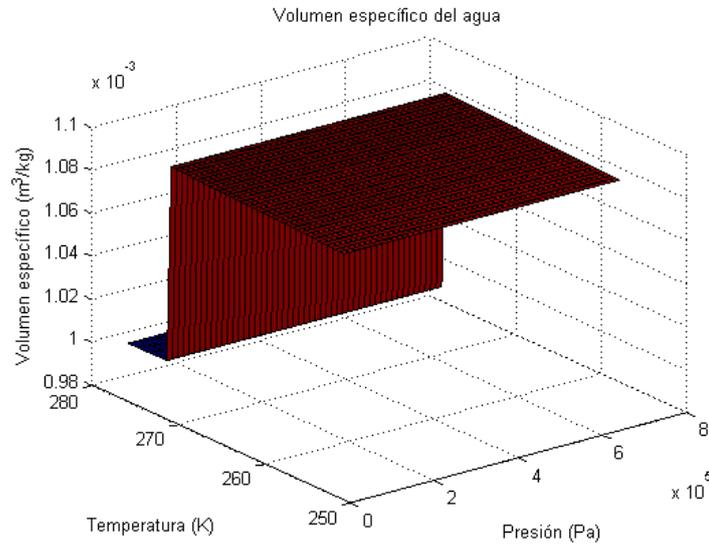
Siendo:

$v_{e0h} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$  → Volumen específico del sólido de a temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

$\alpha_{vh} (K^{-1})$  → Coeficiente de dilatación cúbica del hielo.

$k_{th}(Pa^{-1})$  → Coeficiente de compresibilidad isoterma del hielo.

Para el rango de presiones y temperaturas anteriormente definidas la evolución del volumen específico del agua incluyendo tanto la parte correspondiente al hielo como la correspondiente al agua líquida se muestra en la Figura 23.



**Figura 23:** Volumen específico del agua en el rango de presiones y temperaturas escogido.

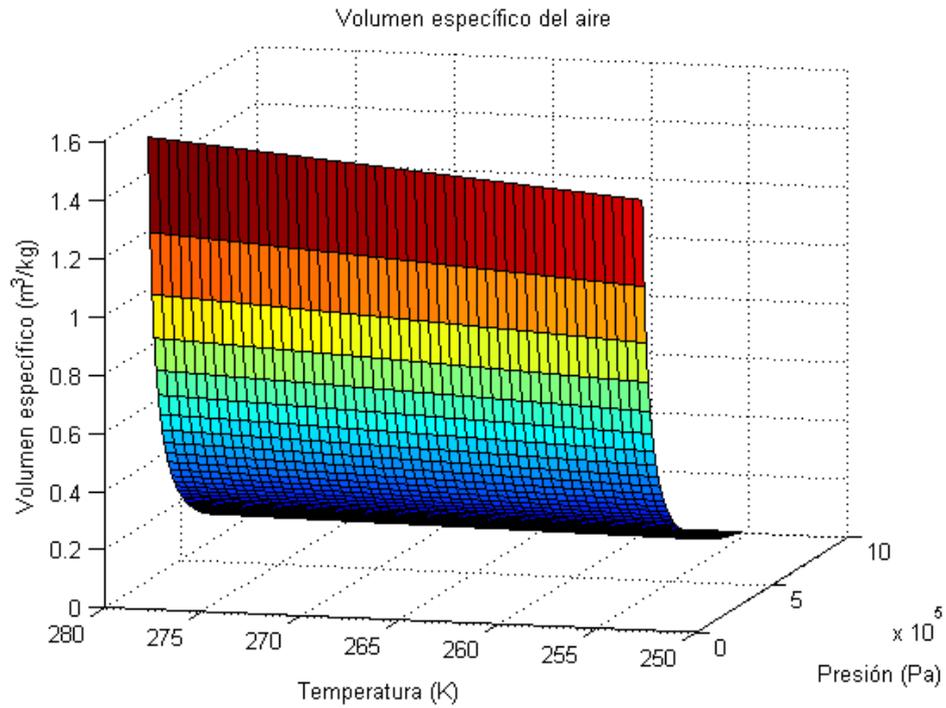
A la vista de los resultados expuestos en la Figura 23 la mayor variación de volumen específico se produce en el cambio de fase (que se ha considerado que se produce siempre a 273.15K). A pesar que la variación del volumen específico dentro de una misma fase es mucho menor que en la variación en el cambio de fase, ésta es algo más sensible al cambio de presión que de temperatura.

#### - **Comportamiento del aire**

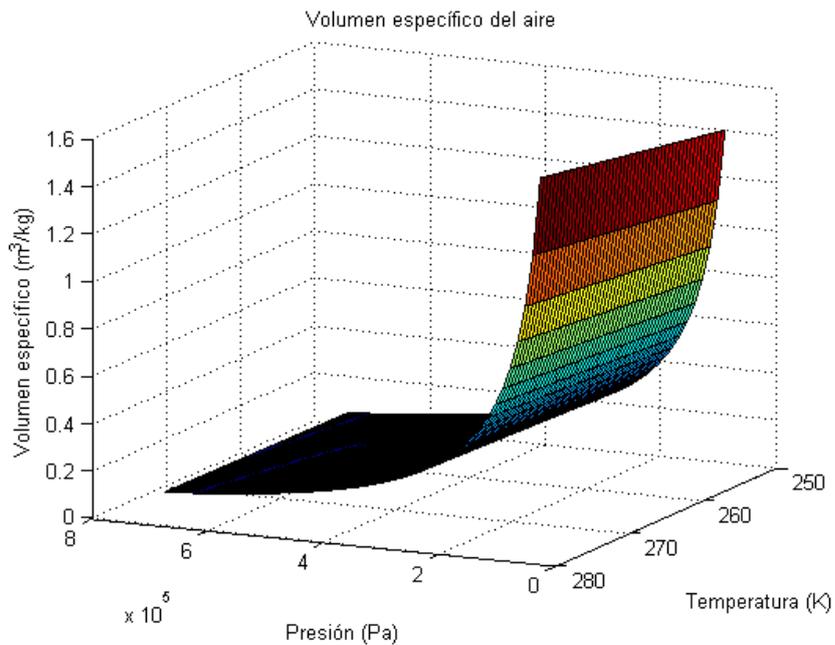
Antes de indicar los materiales que se podrían usar para la construcción del tubo flexible, ya sea macizo o hueco sería conveniente estudiar para el mismo intervalo de temperaturas y presiones anterior el comportamiento del aire. Éste aire sería el gas que estaría en el interior del tubo flexible hueco si se elige esta solución como la configuración adecuada.

En este caso para el estudio del comportamiento del aire las ecuaciones de estado a utilizar serán no serán algebraicas, sino las tabuladas en la aplicación informática Refprop [24] para los rangos de presión y temperaturas indicados.

La variación del volumen específico del aire en los intervalos de presión y temperatura definidos anteriormente se muestra en las siguientes gráficas.



**Figura 24:** Volumen específico del aire en el rango de presiones y temperaturas escogido.



**Figura 25:** Volumen específico del aire en el rango de presiones y temperaturas escogido.

Como se aprecia en la Figura 24, la variación del volumen específico es fuertemente dependiente de valor de la presión a la que se encuentre, siendo entre  $0.5 \cdot 10^5$  Pa y  $10^5$  Pa la franja dónde se produce mayor variación del volumen. De todas formas, la influencia de la temperatura también existe, como es visible en la Figura 25, sobre todo en caso de presiones bajas.

- **Comportamiento de los materiales elegido para el tubo flexible**

Entre los materiales que se van a usar para el tubo flexible (sea hueco a macizo) destacan el teflón y la silicona, cuyas propiedades se pueden resumir atendiendo a lo explicado en el apartados anteriores.

La principal ventaja del teflón para esta aplicación es el mantenimiento de sus propiedades durante un gran intervalo de temperaturas. Esta característica es ideal para el caso de los colectores solares ya que las temperaturas en el captador pueden ir desde temperaturas por debajo del punto de congelación del agua hasta por encima del punto de ebullición de la misma. Sin embargo, su principal inconveniente es su excesiva resistencia a ser deformado.

Por el contrario la silicona, a pesar de que sus propiedades no se mantiene en un rango de temperaturas tan amplio (aunque sí lo suficiente para la aplicación estudiada) es mucho más deformable, siendo esto de gran versatilidad ya que sería a priori utilizable tanto para tubo hueco como para el caso de macizo.

Para comprobar el comportamiento de la solución propuesta sería necesario realizar un estudio del comportamiento de estos materiales en el rango de presiones y temperaturas indicadas anteriormente. Para esto caso se van a utilizar para ambos sustancias sólidas la ecuación de estado usada anteriormente para el hielo, (ecuación 3.2).

$$v_{esol}(T, p) = v_{e0sol} \exp(\alpha_{vsol}(T - T_{0sol}) - k_{Tsol}(p - P_{0sol})) \quad (3.2)$$

Las propiedades proporcionadas para los materiales utilizados en [37] no son exactamente las indicadas en (3.2) sino que son valores de coeficiente de dilatación térmica lineal y módulo de Young que nos son los correspondientes coeficientes usados en la ecuación anterior: coeficiente de dilatación cúbica ( $\alpha_V$ ) y coeficiente de compresibilidad isotérmica ( $k_T$ ) por lo que habrá que hallar una relación entre ellos. Esta relación es mostrada en el **Anexo I** de este mismo documento.

- **Comportamiento de la silicona**

En el caso de la silicona se evalúa el comportamiento de la misma gracias a los datos proporcionados en [37] y siguiendo los pasos descritos en el **Anexo I**. Se obtiene como resultado las siguientes propiedades

$$\rho_{0sil} = 1.8 * 10^3 \frac{kg}{m^3} \rightarrow v_{e0sil} = \rho_{0sil}^{-1} = 5.555 * 10^{-4} \frac{m^3}{kg}$$

$$\alpha_{Lsil} = 57 * 10^{-6} K^{-1} \rightarrow \alpha_{Vsil} = 1.71 * 10^{-4} K^{-1}$$

$$E_{sil} = 5 * 10^6 Pa; \rightarrow k_{Tsil} = 2 * 10^{-7} Pa^{-1}$$

Con:

$\rho_{0sil} (\frac{kg}{m^3})$  → Densidad de la silicona temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

$v_{e0sil} (\frac{m^3}{kg})$  → Volumen específico de la silicona a temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

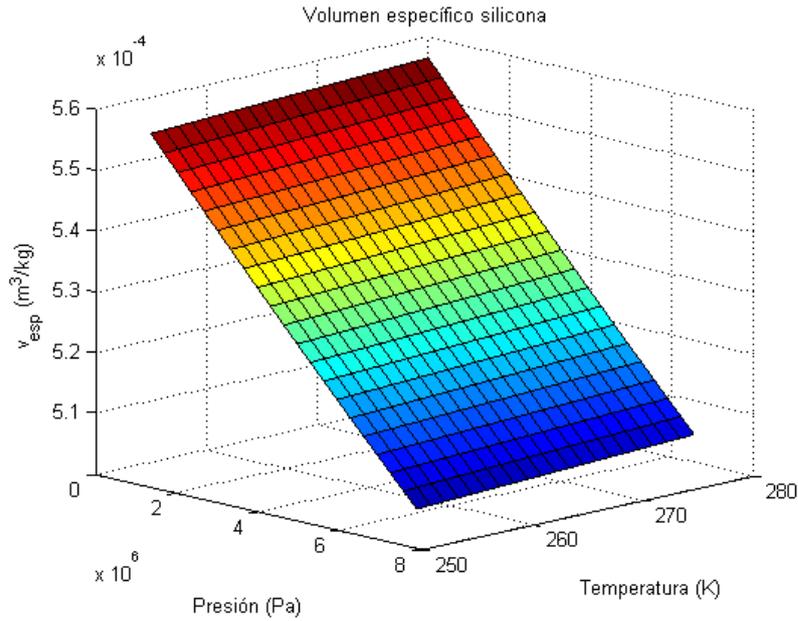
$\alpha_{Vsil} (K^{-1})$  → Coeficiente de dilatación cúbica de la silicona.

$\alpha_{Lsil} (K^{-1})$  → Coeficiente de dilatación lineal de la silicona.

$k_{tsil} (Pa^{-1})$  → Coeficiente de compresibilidad isoterma de la silicona.

$E_{sil} (Pa)$  → Módulo de Young de la silicona.

Con las anteriores características del material se puede realizar el estudio que anteriormente se planteó para el comportamiento del agua y del aire para estudiar la evolución del volumen específico en los intervalos de presión y temperatura definidos. El resultado se muestra en la siguiente la Figura 26.



**Figura 26:** Volumen específico de la silicona en el rango de presión y temperatura escogido.

Como se observa en la Figura 26 la influencia de la temperatura es mucho menor que la de la presión en la variación del volumen específico. Concretamente, destaca la fuerte variación del volumen específico que sufre la silicona con el incremento de la presión, consecuencia de la baja resistencia a la deformación de la silicona. Esta última característica es la más atractiva para el caso de la aplicación estudiada, sobre todo en el caso de que el tubo flexible a introducir en la tubería rígida del captador solar sea macizo y fabricado con este material.

#### - Comportamiento del teflón

Ahora se procederá a hacer lo mismo con el teflón, las características proporcionadas de nuevo en [37] junto a lo explicado en el **Anexo I** proporciona todo lo necesario para definir el comportamiento del material. Esto se puede resumir:

$$\rho_{0t} = 2.2 * 10^3 \frac{kg}{m^3} \rightarrow v_{e0t} = \rho_{0t}^{-1} = 4.54 * 10^{-4} \frac{m^3}{kg}$$

$$\alpha_{Lt} = 135 * 10^{-6} K^{-1} \rightarrow \alpha_{vt} = 4.05 * 10^{-4} K^{-1}$$

$$E_t = 5 * 10^8 Pa; \rightarrow k_{Tt} = 2 * 10^{-9} Pa^{-1}$$

Con:

$\rho_{0t} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \rightarrow$  Densidad del teflón temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

$v_{e0t} \left( \frac{m^3}{kg} \right) \rightarrow$  Volumen específico del teflón a temperatura  $T_{0sol}$  y presión  $P_{0sol}$ .

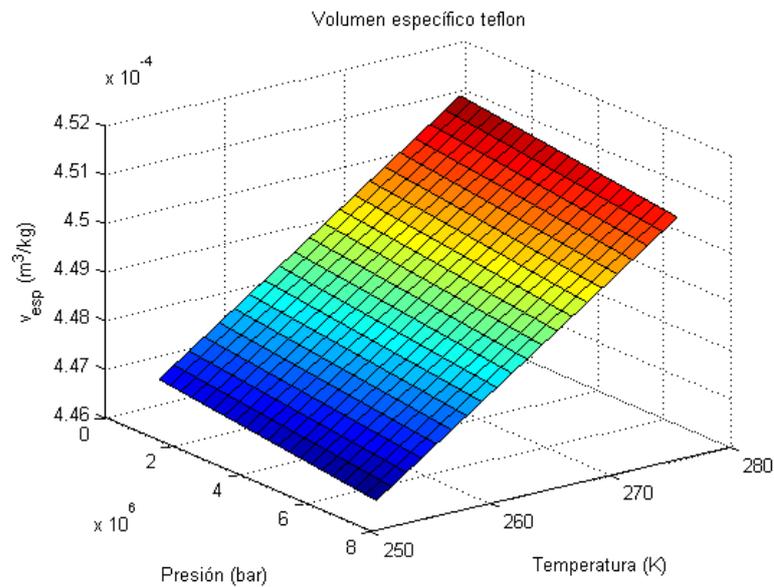
$\alpha_{vt} \text{ (K}^{-1}\text{)} \rightarrow$  Coeficiente de dilatación cúbica del teflón.

$\alpha_{Lt} \text{ (K}^{-1}\text{)} \rightarrow$  Coeficiente de dilatación lineal del teflón.

$k_{tt} \text{ (Pa}^{-1}\text{)} \rightarrow$  Coeficiente de compresibilidad isoterma del teflón.

$E_t \text{ (Pa)} \rightarrow$  Módulo de Young del teflón.

La evolución del volumen específico para este material se muestra en la Figura 27.



**Figura 27:** Volumen específico del teflón en el rango de presión y temperatura escogido.

Con lo apreciado en la Figura 27 se puede deducir que, a pesar de que la influencia de la presión es mayor que la de la temperatura en la variación del volumen específico, la variación del volumen específico al variar la temperatura es muy pequeña comparada con la de la silicona. Este comportamiento indica el principal inconveniente de este material, su excesiva rigidez.

### 4.3 ESTUDIO TEÓRICO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En este apartado se procede al planteamiento de un modelo que aproximará el comportamiento de la solución propuesta al ser sometido a diferentes condiciones de presión y temperatura. Dichas condiciones se pueden definir de manera que se modele el comportamiento del montaje propuesto al producirse las heladas junto a otros requisitos que puedan ser útiles para su caracterización.

En un primer paso se estudiará el problema desde un punto de vista exclusivamente geométrico, teniendo en cuenta únicamente los incrementos de volúmenes posibles producidos. Este primer paso proporcionará una geometría preliminar que podrá de ser usada como base cuando se planteen modelos más complejos que ajusten de mejor forma el resultado. Dicho modelo más complejo será el que aproxime el comportamiento de la solución propuesta bajo las condiciones requeridas.

#### 4.3.1 Estudio geométrico del problema

Se trata de un paso preliminar para la definición de unos valores base de la geometría del conjunto propuesto. Únicamente se tendrá en cuenta el incremento del volumen específico del agua que se puede dar en el cambio de fase de estado líquido al estado sólido para definir unos límites entre las relaciones de los diámetros de la tubería de cobre y del tubo flexible situado en su interior.

##### - Cálculo de incremento de volumen máximo del agua en el cambio de fase

El agua, a diferencia de la mayoría de las sustancias, aumenta su volumen específico al pasar de la forma líquida a la forma sólida (hielo). El volumen específico alcanza un mínimo relativo en torno a las 4°C para la presión de una atmósfera y a medida que disminuye la temperatura va aumentando hasta que alcanza un máximo justo tras el cambio de fase (a 0°C). Si sigue bajando la temperatura se producirá una disminución del mismo.

Para describir el comportamiento del agua líquida se usará un modelo analítico consistente en las 2 ecuaciones de estado del agua usada anteriormente. Una para el estado líquido en un rango de presiones de 1 a 100 atm cercano al punto de máxima densidad (mínimo volumen específico) construido por Thomsen y Hartka: [6] (ecuación 3.1)

$$v_{ecw}(T, P) = v_{e0cw}(1 + \lambda(T - T_{0w} + aP)^2 - k_0P)$$

La siguiente ecuación describe el comportamiento del hielo. Al ser un material sólido (tiene variaciones de volumen menores con la presión y temperatura comparados con otros estados) se usará la ecuación térmica de estado de sistemas simples con coeficientes térmicos constantes (ecuación 3.2)

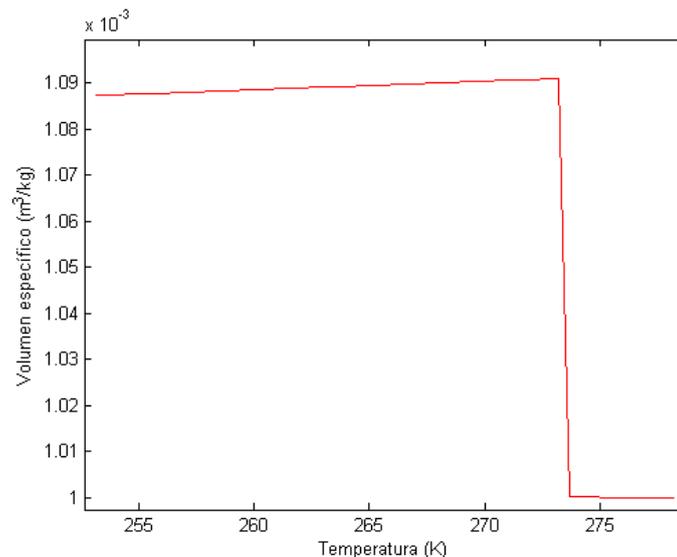
$$v_{esol}(T, p) = v_{e0sol} \exp(\alpha_{Vsol}(T - T_{0s}) - k_{Tsol}(p - P_{0s})) \quad (3.2)$$

Se recordará que según el artículo publicado [29] Las propiedades descritas anteriormente para el hielo son las siguientes:

$$v_{eoh} = \frac{916,8^{-1} m^3}{kg} = 1,091 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg}; \quad \alpha_{Vh} = 3 * \alpha_{Vh} = 3 * 57,2 * 10^{-6} = 171,6 * 10^{-6} K^{-1};$$

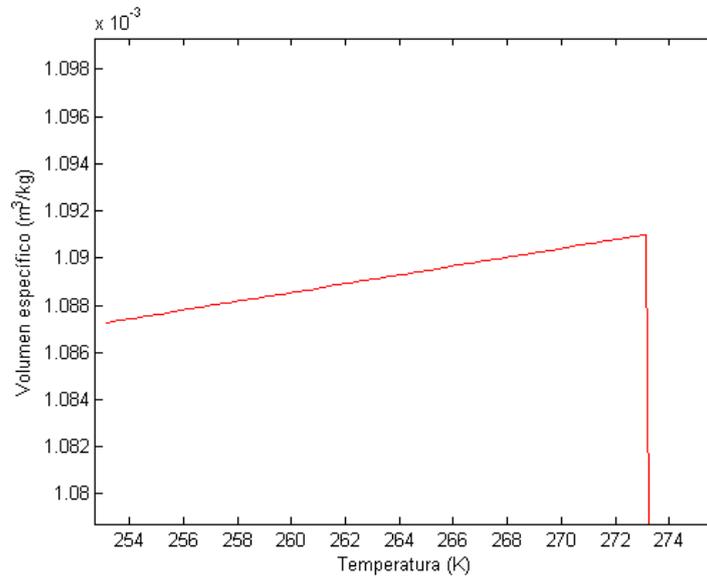
$$k_{Th} = 0,12 * 10^{-9} Pa^{-1}$$

Con estos datos es posible representar la evolución del volumen específico del hielo entre las condiciones de temperatura más extremas del rango de ellas que se dan en el proceso de congelación. La temperaturas escogidas éstas están comprendidas entre 278,3K (5°C) y 253,3K (-20°C). Como se observó en la Figura 23, la evolución del volumen específico se ve poco afectada por la variación de la presión. Por lo tanto, en primera aproximación se considerará el volumen específico independiente de la presión alcanzada. Por ejemplo, para  $10^5$  Pa de presión (aproximadamente una atmósfera) la variación del volumen específico dependiente de la temperatura se expone en la Figura 28.

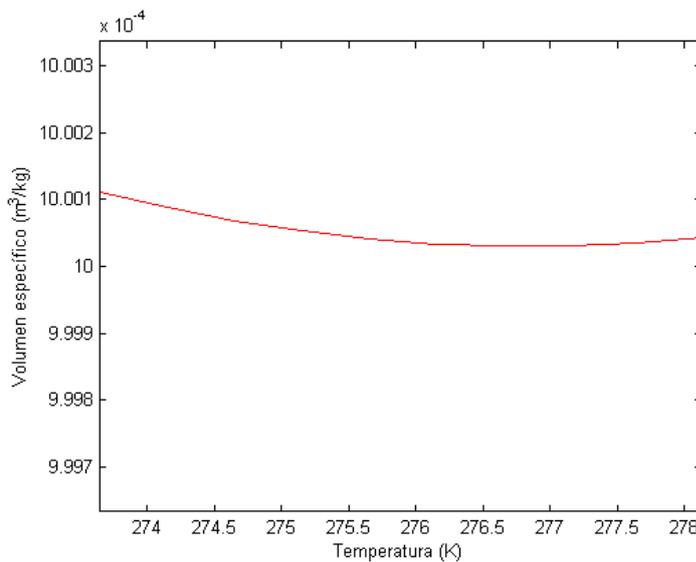


**Figura 28:** Evolución del volumen específico con la temperatura en el rango de temperaturas del proceso de congelación a  $10^5$  Pa.

Si se observa lo mostrado en la Figura 28 a primera vista parece que el agua cambia bruscamente de volumen específico al cambiar de fase (273.15 K) siendo el de mayor volumen específico el hielo (per debajo de los 273.15 K). Sin embargo, para comprobarlo se obtiene vistas más detalladas de la figura anterior mostrándose en la Figura 29 y la Figura 30:



**Figura 29:** Evolución del volumen específico con la temperatura en la que agua se encuentra en estado sólido a 10<sup>5</sup> Pa.



**Figura 30:** Evolución del volumen específico con la temperatura en la que el agua se encuentra en estado líquido a 10<sup>5</sup> Pa.

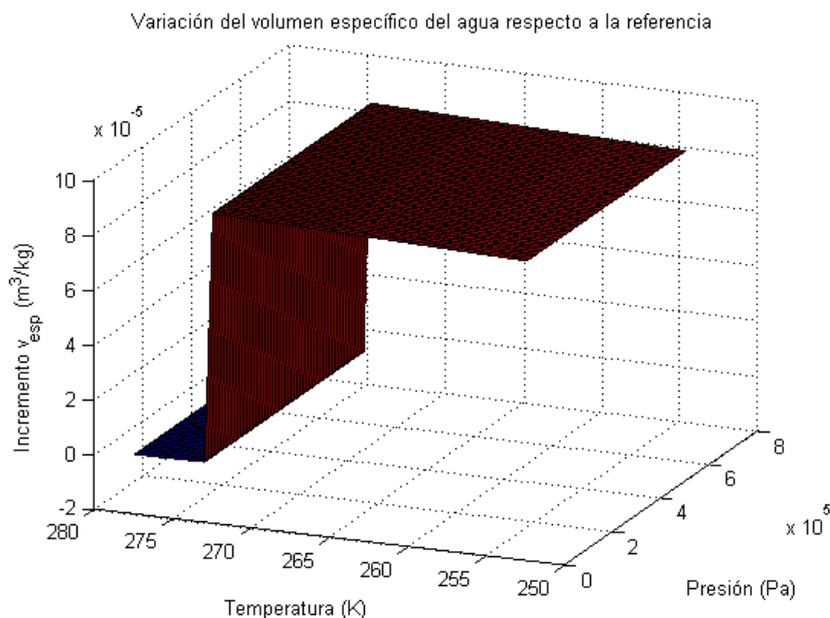
En las Figura 29 y Figura 30 se muestra el comportamiento del agua de manera más minuciosa. En el tramo de fase líquida el volumen específico del agua alcanza un mínimo relativo en torno a los 277 K (punto de máxima densidad) y va aumentando a medida que disminuye la temperatura. Aumenta bruscamente en el cambio de fase a 273.15 K y posteriormente disminuye levemente con la temperatura.

Teniendo en cuenta todo lo explicado anteriormente el mayor incremento de volumen específico se produciría entre la temperatura de 277K (aunque se puede aproximar a 278K sin apenas error como se ve en la Figura 30) y justo después de producirse la solidificación de manera completa (hielo a 273.15K).

Por tanto la variación de volumen específico causante de los problemas asociados a la congelación se tomará como el incremento de volumen específico entre dos casos extremos. Cuya localización se ha aproximado anteriormente. Como referencia se tomará el volumen específico del agua en estado líquido a  $10^5$  Pa.

$$v_{ew}(T = 278,15K, P = 10^5 Pa, \text{líquido}) = 1,00001 * 10^{-3} \frac{m^3}{kg}$$

Si se le resta este valor de referencia al volumen específico del agua en los rangos de presión y temperatura estudiados se halla el valor del incremento de variación de volumen específico que se halla desde el instante de referencia (Figura 31).



**Figura 31** Variación del volumen específico respecto a la referencia en los rangos de presión y temperatura estudiados.

Con los resultados expuestos en la Figura 31 es posible hallar el incremento de volumen específico del agua máximo que se puede dar en las condiciones de helada es:

$$\Delta v_{emax} = 9,09 * 10^{-5} m^3/kg$$

Que se producirá aproximadamente entre los dos estados límites anteriormente explicados.

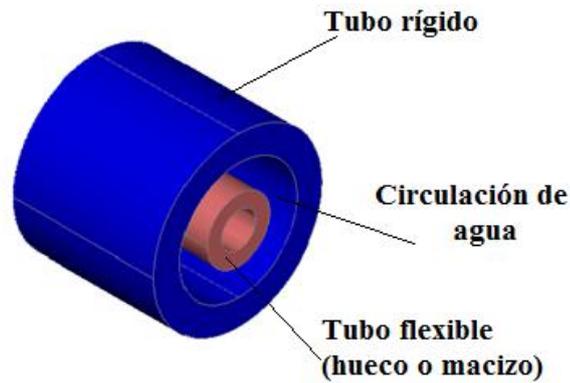
- **Determinación de una geometría preliminar en el montaje propuesto**

Para este paso únicamente se tendrá en cuenta el cambio de volumen que va a experimentar el material del tubo interior a lo largo del proceso de congelación del agua en el interior de la tubería metálica del captador.

A pesar de existir dos casos según el material flexible sea macizo o hueco, es decir, relleno de aire en su interior, no es necesario considerarlos ya que únicamente se va a tener en cuenta el cambio de volumen producido en el agua. En el primer caso, el incremento de volumen y aumento de la presión al dilatarse el agua líquida a pasar al hielo será contrarrestado únicamente por la contracción del material flexible. En el segundo caso, el aumento de volumen será compensado en parte por la contracción del aire al bajar su temperatura y por la propia compresibilidad del estado gaseoso.

La geometría elegida para el tubo flexible es la cilíndrica por diversas razones, la más importante consiste en que se trata de una geometría muy común usada para multitud de aplicaciones como en tubos, barras... Esto hace que la disponibilidad del posible material a elegir sea mucho mayor con esta forma que con cualquier otra geometría. Otra razón es la simplificación del problema para preseleccionar el material adecuado.

La disposición sería la que se muestra en el siguiente esquema (Figura 32) que aclara la explicación anterior.



**Figura 32:** Esquema disposición inicial de la solución propuesta.

Es necesario plantear una serie de hipótesis simplificadoras para determinar el rango adecuado de las dimensiones del tubo flexible interior. Posteriormente, una vez elegida la geometría y establecidos los materiales que sean adecuados (conociendo sus propiedades), se procederá a plantear el problema de una forma más rigurosa para comprobar el funcionamiento del sistema de protección propuesto.

Para este apartado se plantean las siguientes hipótesis:

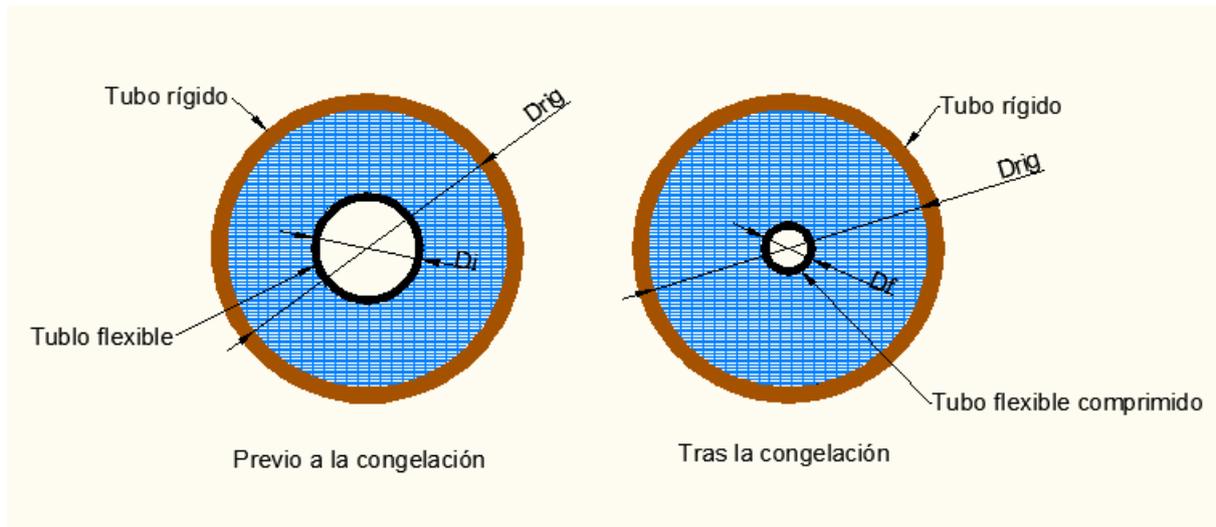
**Hipótesis 1:** La disposición del líquido en la tubería hace despreciable la expansión del mismo en dirección del eje de la tubería. Es decir, debido a la mayor longitud del montaje en la dirección del eje longitudinal respecto al resto, se considerará que la expansión del agua sólo se produce en un plano perpendicular al eje de la tubería.

**Hipótesis 2:** Como el material del que está hecho la tubería es mucho más rígido que el material flexible (sea el tubo macizo o hueco), se supone que la tubería es infinitamente rígida. También se considerará el hielo sólido rígido frente al material flexible.

**Hipótesis 3:** Al ser el conjunto de geometría cilíndrica se considera un problema con simetría radial.

El proceso crítico para este sistema se produce cuando el agua pasa de su densidad máxima (esto se produce como se ha comentado anteriormente entre los 277K y 278 para las presiones que normalmente soporta las tuberías de los captadores) hasta el volumen específico máximo del hielo (justo cuando se produce el cambio de fase en torno a los 273 K para las presiones que normalmente se encuentra el agua en las tuberías).

Este proceso de congelación se muestra en el siguiente esquema:



**Figura 33** : Evolución del dispositivo durante la congelación.

Como se observa en la Figura 33 en instantes previos a la congelación del agua el tubo flexible ocupa un determinado volumen inicial. Este tubo puede ser tanto macizo como hueco relleno de aire (cómo es el caso de la Figura 33). Una vez que se produce la conversión del agua en hielo el tubo flexible se encoge debido al aumento de volumen producido en el agua.

Bajo la hipótesis 2, se puede realizar un balance de volumen de agua entre estos dos instantes para una determinada longitud de tubería.

$$V_{afinal} = V_{aini} + \Delta V_a \quad (3.3)$$

Siendo

$V_{afinal} (m^3)$  → Volumen de agua una vez que ha pasado a fase sólida (273 K).

$V_{aini} (m^3)$  → Volumen de agua con densidad máxima (278 K).

$\Delta V_a (m^3)$  → Incremento de volumen que se produce entre estos dos instantes.

Teniendo en cuenta el esquema de la figura anterior la denominada Figura 33.

$$V_{afinal} = \frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_f^2); \quad (3.4) \quad V_{ini} = \frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_i^2); \quad (3.5)$$

Siendo

$D_{rig} (m)$  → Diámetro interior del tubo de cobre (se considerará constante al ser rígido durante todo el proceso)

$D_i$  (m) → Diámetro exterior del tubo flexible en el instante previo a congelación o inicial.

$D_f$  (m) → Diámetro exterior del tubo flexible en el instante final (tras el proceso de congelación).

$L_{tub}(m)$  → Longitud del montaje en m. En realidad puede ser cualquier valor, ya que por la hipótesis 1 no cambia de valor en todo el proceso y se eliminará de las ecuaciones en el siguiente paso.

El incremento del volumen se puede hallar en base al incremento del volumen específico máximo hallado en apartados anteriores. Para pasar de volumen específico a volumen sólo hay que multiplicar por la masa de agua existente (3.6).

$$\Delta V_a = m_{agua} * \Delta v_{emax} \quad (3.6)$$

$$m_{agua} = \rho_{ini} * V_{ini} = \rho_{ini} * \frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_i^2) \quad (3.7)$$

Con

$m_{agua}$  (kg) → Masa de agua localizada entre el tubo rígido y el flexible.

$\rho_{ini}$  ( $\frac{kg}{m^3}$ ) → Densidad del agua en el instante inicial, ( $1000 \frac{kg}{m^3}$ ).

$\Delta v_{emax}$  ( $\frac{m^3}{kg}$ ) → Incremento de volumen específico que se produce en el proceso de congelación. Se ha calculado anteriormente y su valor es de  $9,09 * 10^{-5} m^3/kg$ .

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación (3.3) se obtendría la siguiente expresión.

$$\frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_f^2) = \frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_i^2) + \rho_{ini} * \Delta v_{emax} * \frac{\pi}{4} * L_{tub} * (D_{rig}^2 - D_i^2) \quad (3.8)$$

Simplificando:

$$(D_{rig}^2 - D_f^2) = (D_{rig}^2 - D_i^2) + \rho_{ini} * \Delta v_{emax} (D_{rig}^2 - D_i^2) \quad (3.9)$$

De aquí se obtendría una expresión del diámetro final del material flexible tras el proceso de congelación.

$$D_f = \sqrt{D_i^2(1 + \Delta v_{max}\rho_{ini}) - \Delta v_{emax}\rho_{ini}D_{rig}^2} \quad (3.10)$$

Como se considera la existencia de simetría radial, se define la deformación del material cilíndrico como una relación entre el valor del diámetro exterior del tubo flexible en los instantes inicial ( $D_i$ ) y final del proceso de congelación ( $D_f$ ). Para cuantificar dicha deformación se usará el siguiente parámetro denominado **reducción de diámetro** ( $\varepsilon$ ).

$$\varepsilon = \frac{D_i - D_f}{D_i} = \frac{D_i - \sqrt{D_i^2(1 + \Delta v_{emax}\rho_{ini}) - \Delta v_{max}\rho_{ini}D_{rig}^2}}{D_i} \quad (3.11)$$

El valor máximo de este parámetro es 1. En este caso el tubo flexible se contrae de forma que prácticamente no llega a ocupar volumen. Es decir, su diámetro exterior ( $D_f$ ) se reduce a 0. El otro valor límite del parámetro sería  $\varepsilon = 0$ . Para este de  $\varepsilon$  el valor del tubo flexible no se contrae en el proceso y se mantiene el mismo diámetro exterior ( $D_i = D_f$ )

La geometría usada se define la relación denominada **relación entre diámetros** ( $r_D$ ). Ésta establece la relación de tamaño entre el diámetro exterior del tubo flexible y el diámetro interior de la tubería rígida en el instante inicial previo a la congelación.

$$r_D = \frac{D_{rig}}{D_i} \quad (3.12)$$

La expresión del parámetro  $\varepsilon$  quedaría:

$$\varepsilon = \frac{D_i - D_f}{D_i} = 1 - \sqrt{(1 + \Delta v_{emax}\rho_{ini}) - \Delta v_{max}\rho_{ini}r_D^2} \quad (3.13)$$

Como se ha sido mencionado, de la forma en que se ha definido este parámetro  $\varepsilon$ , su máximo valor teórico será 1. Es decir, el material flexible se ha contraído totalmente desapareciendo su volumen ( $D_f=0$ ). Esto es imposible que suceda en la realidad pero si puede ser usado para establecer una cota superior de  $r_D$ .

$$1 - \sqrt{(1 + \Delta v_{max} \rho_{ini}) - \Delta v_{emax} \rho_{ini} r_D^2} = \varepsilon = 0 \quad (3.14) \rightarrow r_D = 3,45 \quad (3.15)$$

Es decir, que el valor máximo de  $r_D = \frac{D_{rig}}{D_i}$  es 3,45. Por lo tanto el valor del radio del cilindro (ya sea macizo o tubo hueco) del material flexible debe cumplir las siguientes especificaciones.

$$\frac{D_{rig}}{D_i} < 3,45 \quad (3.16)$$

Quedando como primera acotación de la geometría del material elástico la ecuación 3.17 que define **el límite teórico de la relación de diámetros**.

$$D_i > 0,2898 D_{rig} \quad (3.17)$$

Este límite es un límite puramente geométrico en el que la única consideración tomada es la de que el incremento del volumen del agua no ocupe todo el espacio inicialmente ocupado por el tubo interior (sea hueco con gas en su interior o macizo). Sin embargo, en la práctica es imposible que el tubo sea de un material tan deformable que se pueda reducir su volumen hasta prácticamente sea nulo sin estar sometido a una alta presión, o en el caso de tubo hueco con gas conllevaría una compresión excesiva del mismo haciendo que se alcanzaran presiones muy altas.

A la vista del razonamiento anterior se considera conveniente elegir para el caso estudiado una relación entre  $D_{rig}/D_i$  menor que el límite estudiado anteriormente. Para seleccionar una relación, o al menos un rango pequeño de esta relación de manera adecuada se representará la deformación sufrida por el tubo flexible a lo largo del proceso en función de la geometría usada. Para ello se tendrá en cuenta ecuaciones anteriores como (3.13).

Con la misma finalidad se define un nuevo parámetro denominado **reducción de volumen** ( $r_v$ ) del tubo interior que define el cambio del volumen del tubo flexible (sea hueco o macizo) situado en el interior de la tubería rígida que se produciría desde la condiciones iniciales hasta la más desfavorable en el caso de helada. Todo ello expresado en tanto por uno.

$$r_V = \frac{V_{tubo\,ini} - V_{tubo\,final}}{V_{tubo\,ini}} \quad (3.18)$$

Con:

$V_{tubo\,ini} (m^3)$  → Volumen ocupado por el tubo flexible en el instante inicial (previo congelación).

$V_{tubo\,final} (m^3)$  → Volumen ocupado por el tubo flexible en el instante final (tras congelación).

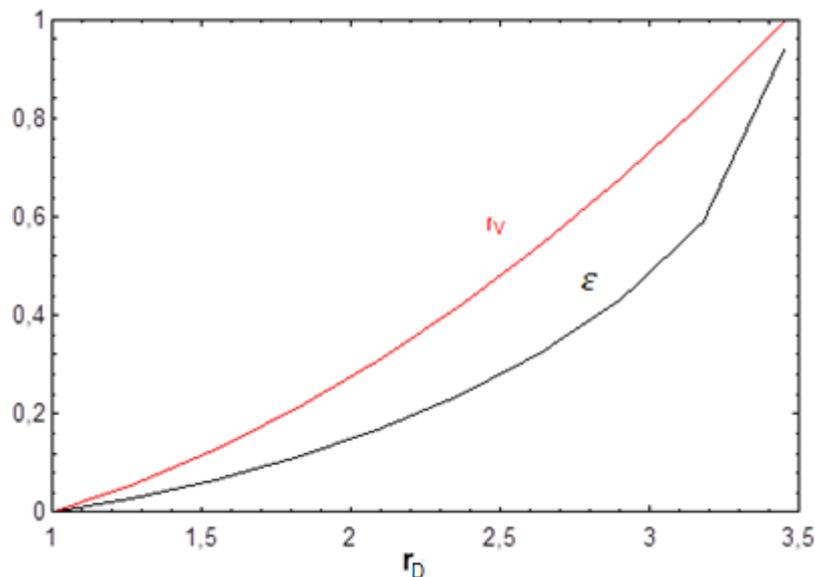
La longitud de los distintos tubos se mantiene constante durante todo el proceso. Por lo tanto, el parámetro anterior se puede describir de la siguiente forma.

$$r_V = \frac{A_{tubo\,ini} * L_{tub} - A_{tubo\,final} * L_{tub}}{A_{tubo\,ini} * L_{tub}} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 - \frac{\pi}{4} D_f^2}{\frac{\pi}{4} D^2} = 1 - \left(\frac{D_f}{D}\right)^2 = 1 - (1 - \varepsilon)^2 \quad (3.19)$$

Es decir

$$r_V = 2\varepsilon - \varepsilon^2 \quad (3.20)$$

Las expresiones (3.13) y (3.20) permiten representar la variación de los parámetros  $\varepsilon$  y  $r_V$  en función de la relación entre los diámetros iniciales del tubo y el interior de la tubería ( $r_D$ ) mostrada en la Figura 34 y extraer las conclusiones necesarias.



**Figura 34:** Variación de los parámetros  $r_V$  y  $\varepsilon$  en función de  $r_D$ .

Cómo se aprecia en la Figura 34 no sería conveniente elegir una  $r_D$  demasiado baja. En ese caso, el volumen disponible entre el diámetro interior de la tubería y el tubo (sea hueco o macizo) sería demasiado pequeño y el caudal de agua que recorrería este volumen se reduciría drásticamente si se mantiene la velocidad de paso. Por ello es una buena idea elegir la relación  $r_D$  lo mayor posible sin alcanzar valores de reducción del volumen ( $r_V$ ) ni reducción de diámetro del tubo ( $\varepsilon$ ) muy elevados.

Al observar la figura anterior se puede deducir que un valor de  $r_D$  en torno a 3 sería una solución de compromiso. Para este valor de  $r_D$

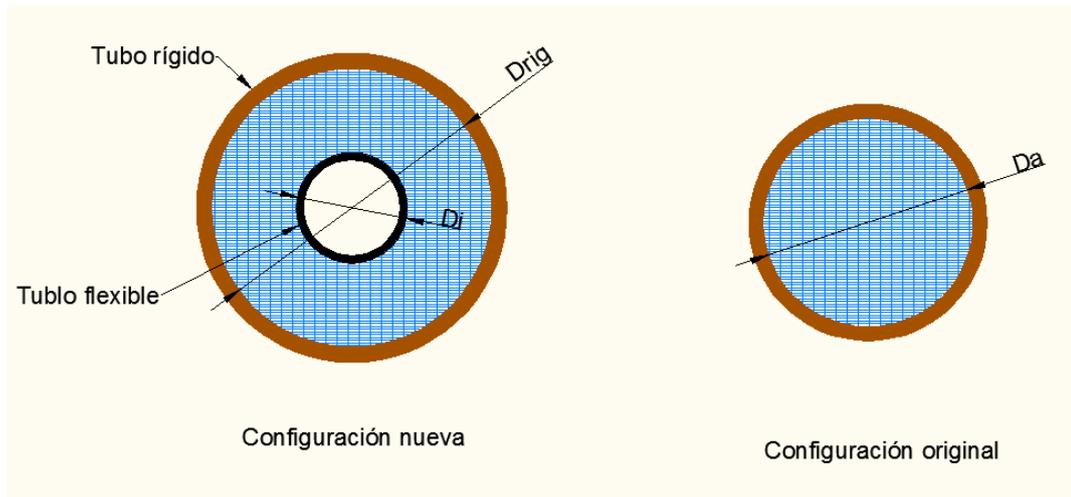
$$r_D = 3 \text{ (3.21)} \rightarrow \varepsilon = 0.48 \text{ (3.22)} ; r_V = 0.73 \text{ (3.23)}$$

A la hora de tomar este valor ha sido necesario evaluar tanto el volumen que el agua dejaría de ocupar en el tubo como la deformación a la que se vería sometido el tubo flexible interior.

Se obtiene una relación entre los diámetros interior del tubo rígido o tubería metálica y el exterior del tubo flexible en el instante inicial o de referencia. Esta relación proporciona un valor de inicio para el tamaño del tubo flexible con respecto al tubo rígido. En principio todo el desarrollo realizado se ha llevado de tal forma que resulta irrelevante el valor del tamaño del tubo rígido y, por tanto, el área de paso del agua asociada al caudal que circula por el dispositivo.

Para conocer una relación entre diámetros entre la disposición original únicamente compuesta por un tubo rígido y la nueva que contiene al tubo rígido de cobre más el tubo flexible, hay que tener en cuenta que la configuración original se usaría con sistemas indirectos y la nueva configuración sería posible su uso en sistemas directos.

Para cada uno de los sistemas el fluido usado no sería el mismo: en el sistema indirecto circularía una mezcla entre agua y anticongelante mientras que en el directo circularía agua procedente de la red de agua potable. Estas dos configuraciones se pueden apreciar en el siguiente esquema. (Figura 35).



**Figura 35:** Comparación de la configuración propuesta con la usada originalmente en captadores solares planos.

Los fluidos que circulan por las distintas configuraciones mostradas en la Figura 35 presentan unas densidades parecidas para una misma temperatura, aunque su capacidad calorífica es diferente. En el caso del agua el valor es de 4,18 kJ/(kgK) y el de la mezcla con anticongelante es de aproximadamente 3,5 kJ/(kgK).

Esto provoca que para el transporte de una misma cantidad de energía no sea necesario que el caudal sea el mismo en las dos situaciones.

$$\dot{m}_A c_{pA} = \dot{m}_M c_{pM} \rightarrow \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_M} = \frac{c_{pM}}{c_{pA}} \quad (3.24)$$

Con

$\dot{m}_A \left( \frac{kg}{s} \right)$  → Caudal másico de fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$\dot{m}_M \left( \frac{kg}{s} \right)$  → Caudal másico de fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$c_{pA} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$  → Capacidad calorífica del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$c_{pM} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$  → Capacidad calorífica del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

La expresión anterior se puede expresar de la siguiente forma

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_M} = \frac{\rho_A v_A A_A}{\rho_M v_M A_A} = \frac{c_{pM}}{c_{pA}} \quad (3.25)$$

Con

$\rho_A \left(\frac{kg}{m^3}\right)$  → Densidad del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$\rho_M \left(\frac{kg}{m^3}\right)$  → Densidad del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$v_A \left(\frac{m}{s}\right)$  → Velocidad del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$v_M \left(\frac{m}{s}\right)$  → Velocidad del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$A_A (m^2)$  → Área de paso del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$A_M (m^2)$  → Área de paso del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

Se define la igualdad entre áreas de las distintas configuraciones para evitar excesivas pérdidas de cargas en la configuración en la que existe un tubo flexible (como se verá posteriormente esta consideración hará que baje la velocidad de circulación del fluido).

$$A_A = A_M \quad (3.26)$$

Según el esquema mostrado en la Figura 35. La anterior expresión se podría expresar como:

$$\frac{\pi D_a^2}{4} = \frac{\pi(D_{rig}^2 - D_{ini}^2)}{4} \quad (3.27)$$

Con

$D_a (m)$  → Diámetro interior del tubo rígido asociado a la configuración original usada en sistemas indirectos (Figura 35).

Teniendo en cuenta la ecuación (3.12) que se define  $r_D$  se puede establecer una relación entre los diámetros del tubo rígido de ambas configuraciones.

$$\frac{D_{rig}}{D_a} = \sqrt{\frac{1}{1 - r_D^{-2}}} \quad (3.28)$$

Para el caso en que el parámetro  $r_D$  sea 3 la relación sería.

$$\frac{D_{rig}}{D_a} = 1.0606 \quad (3.29)$$

El resultado es que apenas cambia el tamaño de la nueva configuración con respecto a la anterior.

#### - **Conclusiones**

Todo el estudio desarrollado anteriormente proporciona los varios resultados aplicables para posteriores estudios. El principal es el hecho de que en la geometría a aplicar existe un límite inferior la relación del diámetro del tubo flexible con el diámetro interior del tubo rígido.

Si se parte de este límite inferior, a medida que el diámetro del tubo flexible del montaje es mayor, las condiciones de presiones alcanzadas al producirse el aumento del volumen son más suaves. Por otro lado, si el tubo interior aumenta demasiado el caudal de agua por la tubería se reducirá drásticamente debiéndose hallar una solución de compromiso para establecer una relación entre diámetros preliminar.

En cuanto al cambio de diámetro debido al uso de la configuración indirecta y directa de los captadores solares planos sólo se requiere un diámetro levemente mayor que en la disposición original.

#### 4.3.2 **Modelado**

##### - **Dificultades que plantea el estudio e hipótesis realizadas**

Ya ha sido estudiada la evolución en los rangos de temperatura y presión indicados de cada una de las posibles sustancias que pueden intervenir en la solución propuesta para combatir los efectos de las heladas y acumulación de depósitos de cal en las tuberías de los captadores solares planos para el calentamiento de agua caliente sanitaria. Sin embargo, el estudio del comportamiento de todos los componentes de la solución propuesta de manera conjunta presenta una serie de dificultades adicionales. La razón de estos obstáculos es el

hecho de que la solución está formada por distintos materiales, cada uno de ellos con un comportamiento propio que ha sido previamente expuesto.

En la situación de bajas temperaturas el mayor problema que se plantea en la existencia de un cambio de fase del agua. Esto provoca que las propiedades del agua en estos intervalos de presión y temperatura no sean constantes a lo largo de todo el volumen ocupado por la misma. Esto, unido al hecho de que no se trata de un material sólido para todos los rangos de temperatura y presión hace difícil un estudio del problema desde el punto de vista de la elasticidad y resistencia de materiales sólidos.

Otra posibilidad que se plantea a la hora de estudiar el comportamiento conjunto de los componentes del sistema propuesto es el uso de las ecuaciones de estado previamente descritas dentro del apartado Comportamiento de los materiales a usar.

Bajo una serie de hipótesis simplificadoras del problema, es posible aproximar la presión a la que llegaría la configuración planteada suponiendo que parte de un estado inicial de la configuración a una temperatura y presión de referencia.

La aproximación se basaría en las **siguientes consideraciones**:

El material del que están realizadas las tuberías de los colectores para el calentamiento de agua caliente sanitaria (cobre) presenta un comportamiento más rígido durante el proceso que el resto de materiales por lo que el volumen contenido en el interior del tubo de cobre se considera constante. Además, el hecho de que el espesor de la tubería es pequeño comparado con el diámetro interior hace que la pequeña variación de dimensiones del tubo en el plano perpendicular al eje debido al cambio de temperatura se desprecie.

Esto provoca que el volumen ocupado por el agua y por el resto de dispositivo (tubo hueco o macizo del material correspondiente) se pueda considerar constante durante todo el proceso, independientemente de las condiciones de presión y temperatura. Si se conocen la distribución iniciales de los materiales en el interior de la tubería, el estado de los materiales depende de las condiciones de dos variables de estado adicionales a las que se encuentra en conjunto en cada momento.

El principal objetivo de este modelo es conocer la presión que se llegaría en el interior del interior del tubo rígido bajo condiciones de temperaturas variadas. Estas pueden ir desde frías que provocan la congelación del agua hasta las que se dan en las condiciones de funcionamiento del captador.

- **Planteamiento del modelo. Ecuación de comportamiento**

La ecuación que se plantea sería el mantenimiento del volumen en el interior de la tubería, o lo que es lo mismo, la nulidad del incremento del volumen en el interior de la tubería.

$$\Delta V_{rig} = 0 \quad (3.30)$$

Siendo

$V_{rig} (m^3)$  → Volumen el interior de la tubería rígida (ver Figura 32)

En principio se considera que el conjunto estará compuesto por dos materiales que serían tanto el agua como el material del que se encuentre hecho el tubo interior flexible (en el caso de tubo hueco se considerará el aire, como se especificará más adelante). La evolución del conjunto es similar a la considerada en el estudio geométrico (Figura 33). Es decir, se parte de un estado inicial o de referencia y posteriormente se produce una expansión del agua debido a su conversión en hielo.

El incremento de volumen total del interior de la tubería durante el proceso es el debido a ambas sustancias para cada condición de temperatura y presión.

$$\Delta V_{rig} = \Delta V_w(T, p, T_0, p_0) + \Delta V_s(T, p, T_0, p_0) \quad (3.31)$$

Con

$$\Delta V_w = V_w(T, p) - V_w(T_0, p_0) \quad (3.32)$$

$$\Delta V_s = V_s(T, p) - V_s(T_0, p_0) \quad (3.33)$$

$T$  (K) → Temperatura a la que se encuentra sometido el conjunto.

$p$  (Pa) → Presión a la que se encuentra sometido el conjunto.

$T_0$  (K) → Temperatura de referencia.

$p_0$  (Pa) → Presión de referencia.

$V_w(T, p)$  ( $m^3$ ) → Volumen ocupado por el agua a las condiciones de presión y temperatura dadas.

$V_w(T_0, p_0)$  ( $m^3$ ) → Volumen ocupado por el agua a las condiciones de presión y temperatura de referencia.

$V_s(T, p)(\text{m}^3) \rightarrow$  Volumen ocupado por el material del que está hecho el tubo flexible a las condiciones de presión y temperatura dadas.

$V_s(T_0, p_0)(\text{m}^3) \rightarrow$  Volumen ocupado por el material del que está hecho el tubo flexible a las condiciones de presión y temperatura de referencia.

Así el incremento de volumen del agua es contrarrestado  $\Delta V_w(T, p, T_0, p_0)$  por la disminución de volumen del tubo flexible  $\Delta V_s(T, p, T_0, p_0)$ .

Si se sigue desarrollando la ecuación anterior (3.31)

$$m_w \Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) + m_s \Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.34)$$

Siendo

$$\Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) = v_{ew}(T, p) - v_{ew}(T_0, p_0) \quad (3.35)$$

$$\Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = v_{es}(T, p) - v_{es}(T_0, p_0) \quad (3.36)$$

Con:

$m_w(\text{kg}) \rightarrow$  Masa de agua en el interior de la tubería en unas condiciones determinadas de T y p.

$m_s(\text{kg}) \rightarrow$  Masa del material del que está hecho el tubo flexible en el interior de la tubería rígida para unas condiciones determinadas de T y p.

$v_{ew}(T, p) (\text{m}^3/\text{kg}) \rightarrow$  Volumen específico del agua bajo unas condiciones de T y p.

$v_{es}(T, p) (\text{m}^3/\text{kg}) \rightarrow$  Volumen específico del material del que está hecho el tubo flexible bajo unas condiciones de T y p.

Si no existen fugas, la masa se mantiene constante, por lo tanto siempre es igual a la que se tenía en el instante inicial.

$$m_w = m_{w0} = v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * V_{w0} \quad (3.37)$$

$$m_s = m_{s0} = v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * V_{s0} \quad (3.38)$$

$m_{w0}(\text{kg}) \rightarrow$  Masa de agua en el interior de la tubería rígida en el instante inicial.

$m_{s0}(\text{kg}) \rightarrow$  Masa de la sustancia de la que está compuesto el tubo flexible en el instante inicial.

$V_{w0}(m^3) \rightarrow$  Volumen ocupado por el agua situada en el interior de la tubería rígida en el instante inicial.

$V_{s0}(m^3) \rightarrow$  Volumen ocupado por la sustancia en la que está hecho el tubo flexible en el instante inicial.

Sustituyendo todo en la ecuación anterior resultaría lo siguiente:

$$v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * V_{w0} * \Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * V_{s0} * \Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.39)$$

Dividiendo la expresión anterior por el volumen total del interior de la tubería quedaría que:

$$v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * r_{w0} * \Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * r_{s0} * \Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.40)$$

Siendo los nuevos parámetros:

$r_{w0} = \frac{V_{w0}}{V} \rightarrow$  Relación entre el volumen ocupado inicialmente por el agua y el volumen total interior de la tubería rígida.

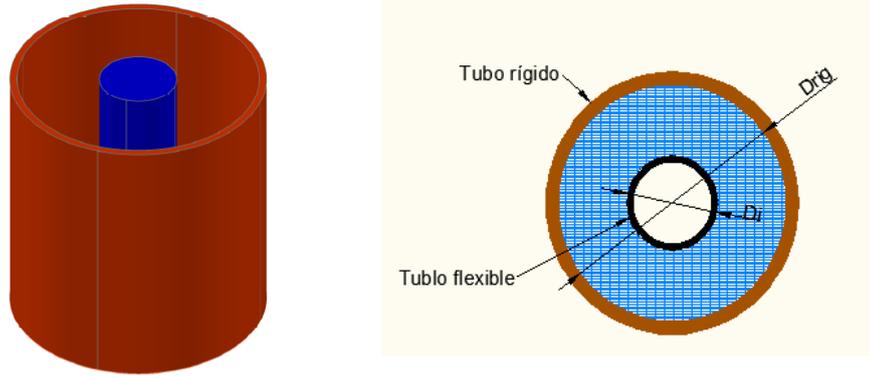
$r_{s0} = \frac{V_{s0}}{V} \rightarrow$  Relación entre el volumen ocupado inicialmente por el tubo flexible y el volumen total interior de la tubería rígida.

Estos parámetros recién definidos se pueden conocer simplemente con la relación entre diámetros interior de la tubería rígida y exterior del tubo flexible ( $r_D$ ). La utilidad de expresar estas relaciones en función del parámetro radica en que ya se ha realizado un estudio de la distribución geométrica de un tubo flexible en el interior de la tubería rígida en función de dicho parámetro y se han obtenido un rango de valores del mismo.

La relación inicial entre los distintos volúmenes tanto del agua como de la sustancia de la que está realizado el tubo flexible se puede conocer estableciendo algunas de las hipótesis que se habían planteado en el problema desde el punto de vista geométrico.

- Se considera la tubería como un cilindro y la disposición del conjunto de tubería más tubo simétrico respecto al eje central de la tubería como se muestra en la siguiente figura (Figura 36).

-



**Figura 36:** Disposición geométrica del conjunto en el estado inicial.

- Al ser un cilindro recto, la relación entre el volumen ocupado por el agua (espacio entre el diámetro interior de la tubería y el exterior del tubo) y el volumen total y la relación entre el volumen ocupado por el tubo y el volumen total es la misma que la relación de áreas en cualquier sección transversal del conjunto.

$$r_{w0} = \frac{V_{w0}}{V} = \frac{A_{w0}}{A} \quad (3.41); \quad r_{s0} = \frac{V_{s0}}{V} = \frac{A_{s0}}{A} \quad (3.42)$$

Con

$A (m^2) \rightarrow$  Área total en cualquier sección transversal al eje del cilindro interior a la tubería rígida en instante inicial (se considera que se mantiene constante durante todo el proceso al igual que el volumen).

$A_{w0}(m^2) \rightarrow$  Área total en cualquier sección transversal al eje del cilindro ocupada por el agua en el instante inicial.

$A_{s0}(m^2) \rightarrow$  Área total en cualquier sección transversal al eje del cilindro ocupada por tubo flexible en el instante inicial.

Si se reescriben los parámetros anteriores:

$$r_{s0} = \frac{\frac{\pi D_i^2}{4}}{\frac{\pi D_{rig}^2}{4}} = \left(\frac{D_i}{D_{rig}}\right)^2 \quad (3.43); \quad r_{w0} = 1 - r_{s0} = 1 - \left(\frac{D_i}{D_{rig}}\right)^2 \quad (3.44)$$

Se recordará que:

$D_{rig} (m)$  → Diámetro interior del tubo rígido (se considerará constante durante todo el proceso).

$D_i (m)$  → Diámetro exterior del tubo flexible en instante inicial.

Quedando la expresión anterior de la siguiente forma:

$$v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * 1 - \left(\frac{D_i}{D_{rig}}\right)^2 * \Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * \left(\frac{D_i}{D_{rig}}\right)^2 * \Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.45)$$

Uniéndolo con la teoría anteriormente desarrollada en la ecuación 3.12.

$$r_D = D_{rig}/D_i \quad (3.12)$$

$$v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * (1 - r_D^{-2}) * \Delta v_{ew}(T, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * r_D^{-2} * \Delta v_{es}(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.46)$$

La ecuación anterior se trata de una ecuación en función de 2 incógnitas:  $p$  y  $T$ . Es decir, conocida la distribución geométrica inicial para una temperatura  $T$  dada, todos los términos son conocidos a excepción de la presión. Por lo tanto, se ha encontrado una expresión que aproxima el valor de la presión que alcanza el conjunto en el interior de la tubería cuando se lleva a una temperatura determinada partiendo de un estado inicial conocido.

#### - **Problemas asociados a la resolución del modelo planteado**

A pesar de haber obtenido la relación deseada, se presenta un gran problema a la hora de la resolución de esta expresión para cada temperatura dentro del rango anteriormente definido:

- 1) Para gran parte del rango de la temperatura estudiada el problema la ecuaciones de estado usada para establecer el volumen específico de diferentes sustancias no se han expresado en forma algebraica sino que son datos tomados de tablas obtenidas experimentalmente y almacenadas en la aplicación informática Refprop [24] (véase las

usadas para el aire y el agua). A pesar de la ventaja de la exactitud de los mismos datos, existe la desventaja de la dificultad de la resolución en este caso.

2) Para ciertos intervalos de presión y temperatura existe expresión algebraica (no datos tabulados) de la ecuación de estado a de todas la sustancias que intervienen en el conjunto. Sin embargo, la expresión resultante es compleja y es necesario resolverla por métodos numéricos de resolución de ecuaciones.

Por estas razones no es posible la resolución de la ecuación de forma algebraica sino que se tendrá que realizar de forma numérica.

Únicamente se encuentran disponibles los datos tabulados en la aplicación informática de Refprop [24] para algunas sustancias utilizadas en el montaje. Para estos casos es difícil conseguir la aplicación de métodos convencionales para la resolución de ecuaciones cómo el método de Newton-Fourier ya que para la aplicación de estos métodos correctamente son necesarios que la aplicación de paso de tamaño del orden de  $10^{-3}$  siendo en la práctica imposible obtener de los datos tabulados con una diferencia de tal orden.

#### - **Resolución del modelo**

La solución propuesta para la resolución de este problema se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos.

En primer lugar se define la relación entre el diámetro interior de la tubería y el exterior del tubo. Esta relación es determinante a la hora analizar de evolución del conjunto al variar las condiciones de temperaturas. Esta relación será:

$$r_D = \frac{D_{rig}}{D_{ini}} = 3 \quad (3.47)$$

Que es el valor escogido en el previo estudio geométrico del problema.

Las condiciones de referencia o las que presenta el conjunto en el instante inicial serán:

$$T_0 = 298 \text{ K} \quad (3.48); \quad p_0 = 10^5 \text{ Pa} \quad (3.49)$$

- Se escogerá de entre el rango de temperaturas definidos para el estudio del comportamiento del conjunto una serie de valores concretos de la temperatura ( $T_i$ ) representativos de dicho intervalo.

Llamando función **df a la expresión que corresponde al primer miembro de la ecuación 3.46 particularizado para una determinada temperatura ( $T_i$ )**. Como se muestra en 3.46 este valor debe ser nulo en el equilibrio. Es decir, si el sistema se expone a una temperatura  $T_i$ , la presión del mismo será una  $p_i$  tal que haga  $df = 0$ .

$$df(p)_{T_i} = v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * (1 - r_D^{-2}) * \Delta v_w(T_i, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * (r_D)^{-2} * \Delta v_{es}(T_i, p, T_0, p_0) \quad (3.50)$$

Con:

$T_i(K) \rightarrow$  Valor de la temperatura concreta escogido del intervalo de temperaturas a estudiar.

Se sustituye en la expresión anterior el valor para la geometría escogida en el estudio geométrico del problema ( $r_D = 3$ ). Así queda la función  $df$  de la siguiente forma.

$$df(p)_{T_i} = v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * \left(1 - \frac{1}{9}\right) * \Delta v_{ew}(T_i, p, T_0, p_0) + v_{es}(T_0, p_0)^{-1} * \frac{1}{9} * \Delta v_{es}(T_i, p, T_0, p_0) \quad (3.51)$$

Teniendo en cuenta la relación (3.46), la resolución del modelo pasaría encontrar las condiciones de temperatura y presión que hacen que hacen  $df(p)_{T_i} = 0$ . Se procede de la siguiente forma para alcanzar este objetivo.

- Para cada temperatura escogida anteriormente ( $T_i$ ) se irá evaluando la función anterior para distintos valores de presión en el interior del rango de presiones estudiadas. Se elegirá cómo valor de la presión ( $p_i$ ) aquel valor que minimice el valor absoluto de  $df(p)_{T_i}$  con la condición de que el valor inmediatamente anterior o posterior de ( $p_{i+1}$  o  $p_{i-1}$ ) de signo contrario a  $p_i$ . De esta forma se asegura que para esta temperatura existe un valor de presión que hace que se anule la expresión  $df$ .

- Procediendo de esta manera se consigue un conjunto de parejas de valores de presión y temperatura ( $T_i, p_i$ ) que describe el comportamiento del conjunto estudiado si se lleva desde una temperatura inicial hasta distintas temperaturas dentro del rango indicado. Es decir, se aproxima la presión (factor clave en la rotura de la tubería de cobre) que alcanza en conjunto frente a la temperatura al que se somete al conjunto.

Unos de los problemas que implica la resolución de esta ecuación por el método anteriormente descrito es el manejo de una gran cantidad de información. Esto se produce debido a que es necesario evaluar el volumen específico de las distintas sustancias que forman el conjunto estudiado para numerosos valores de presión y temperatura dentro del rango estudiado.

El principal inconveniente de la necesidad de tal cantidad de información es el gran requerimiento de tiempo de computación para la resolución de la ecuación. Este coste se hace más evidente cuando hay que evaluar el conjunto para varias geometrías (distintas relaciones entre el diámetro interior de la tubería y el exterior del tubo interior) y varias sustancias que conforman el tubo flexible.

Todo el proceso descrito se ha llevado a cabo usando la aplicación matemática Matlab. Se ha estudiado el modelo para cada uno de los casos (correspondientes al uso de diferentes materiales para el tubo flexible) que se han considerado relevantes.

### **4.3.3 Resultados del modelo para situación de helada**

Los resultados del estudio para las distintas sustancias usadas teniendo en cuenta la ecuación planteada anteriormente (3.46) se exponen en este apartado.

Se aproximará la situación de equilibrio (o situación final) del conjunto cuando es sometido a una determinada temperatura. Estas temperaturas irán desde las condiciones iniciales de temperatura de referencia hasta temperaturas bajas en las que se produce la congelación del agua situada en el interior de la tubería.

El estudio de la condiciones finales o de equilibrio es el fin mismo del proyecto: comprobar la instalación del dispositivo ideado (tubo flexible ya sea hueco o macizo) supone una mejora en las condiciones de presión alcanzadas en el interior de la tubería rígida cuando se dan las condiciones de helada, y si el valor alcanzado de la misma es lo suficientemente bajo como para que el tubo de cobre pueda resistirla.

#### 4.3.4 Resultado del modelo para rango de temperatura bajas. Producción de la congelación del agua (heladas).

Las sustancias que conformarán el tubo macizo serán teflón y silicona mientras que el tubo hueco (con aire en su interior) se hará de silicona (aunque desde el punto de vista del modelo planteado daría igual el material con que estuviera hecho como se expondrá más adelante). Todas las propiedades de estas sustancias han sido descritas previamente.

##### - Tubo macizo de teflón

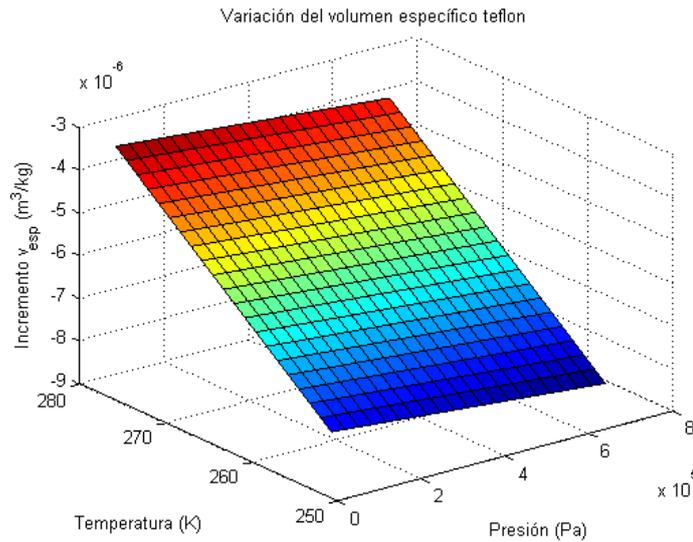
Se mostrará a continuación el resultado del estudio para este material. Las condiciones iniciales por las que tiene en cuenta el modelo planteado por la ecuación (3.46) se muestran en la Tabla 8.

Propiedad inicial	Valor
Temperatura inicial	298 K
Presión inicial	$10^5$ Pa
Relación de diámetros iniciales ( $r_D$ )	3
Material del tubo interior	Teflón
Volumen específico teflón	$4.537 \cdot 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /kg
Volumen específico agua	$1.0021 \cdot 10^{-3}$ m <sup>3</sup> /kg

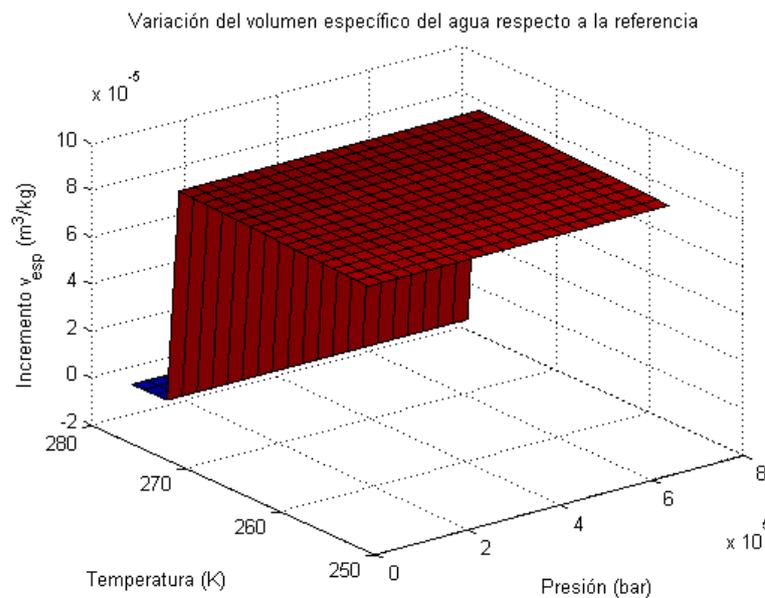
**Tabla 8:** Condiciones iniciales para el caso del tubo hueco de teflón.

El teflón se ha incluido en este estudio por su buen comportamiento frente a variaciones de temperaturas y su facilidad para ser encontrado. Sin embargo, tiene el principal inconveniente de excesiva oposición a ser deformado, por lo que es muy difícil que se cumpla las condiciones de presión en el interior del conjunto. El resultado de la resolución se mostrará en las siguientes figuras.

En primer lugar se mostrarán las variaciones del volumen específico de las sustancias que componen el conjunto en la condiciones de presión y temperatura escogidas respecto a las condiciones iniciales de referencia (mostradas en la Tabla 8) Por un lado, se considerará el teflón que conforma el tubo flexible (Figura 37) y el resto del agua en el interior de la tubería (Figura 38).



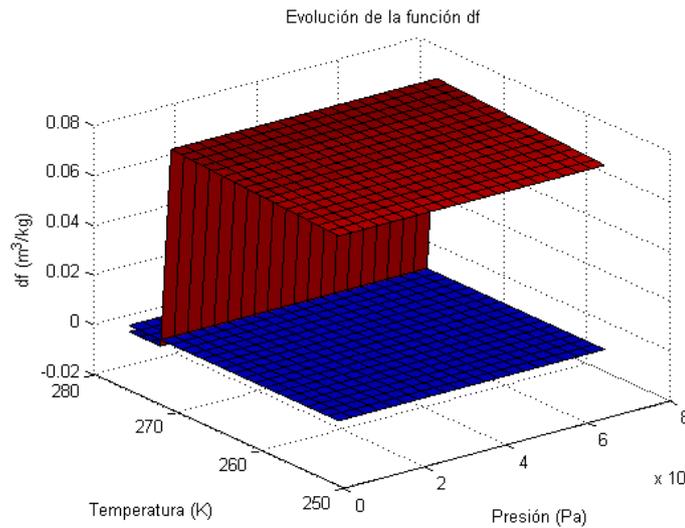
**Figura 37:** Incremento del volumen específico del teflón para el rango de temperaturas y presiones estudiado con respecto a la situación de referencia.



**Figura 38:** Incremento del volumen específico del agua con respecto al de referencia para el rango de temperatura y presión estudiado.

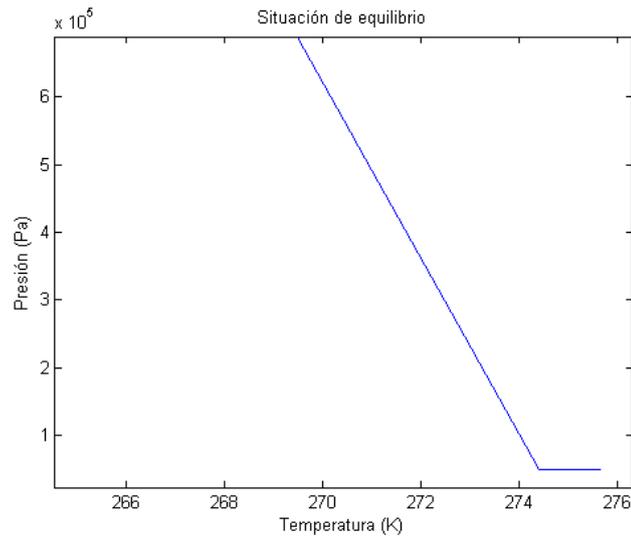
La disminución de volumen específico del teflón (Figura 37) debería contrarrestar el aumento de volumen específico del agua (Figura 38).

Posteriormente, con el fin de interpretar sin dejarse llevar por el error los resultados de la ecuación la resolución de la ecuación, se mostrará la superficie  $df(p)_{T_i}$  para los rangos de presión y temperatura descritos anteriormente junto a la superficie  $df=0$  (Figura 39). La solución de la ecuación (3.46) que describe la evolución del conjunto sería la intersección entre ambas superficies (Figura 40).



**Figura 39:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado.

La razón de mostrar en la Figura 39 la superficie  $df=0$  consiste en poder ver a simple vista para qué valores de presiones y temperaturas se alcanza el equilibrio ( $df=0$ ). En la siguiente figura (Figura 40) se muestra los valores de presión y temperatura en el que  $df=0$  de manera directa (corte de la superficie  $df(p)_{T_i}$  con  $df=0$ ).



**Figura 40:** Valores de presión y temperatura en los que se alcanzan el equilibrio en el conjunto para caso de tubo de teflón.

A la vista de lo mostrado en la Figura 40 esta disposición no sería funcional. Como se observa la máxima presión obtenida es imposible de evaluar. A partir de los 273 K, cuando se produce el cambio de fase se produce un aumento de presión de manera muy rápida. Esta presión fuera de los límites estudiados, sería una presión mucho mayor pudiéndose dar el caso de que no se pueda dar en la realidad. De cualquier forma, la presión que se alcanza superaría a la que podría soportar la tubería de cobre. Por lo tanto, se produciría la rotura de la misma antes de alcanzarse presiones tan altas como las sugeridas a raíz de estudio realizado.

Si se examina la Figura 40 se puede extraer que partiendo desde 5°C el agua permanecería en estado líquido no habiendo un aumento considerable de la presión. El problema se produciría en el cambio de fase, en este proceso como se ha estudiado anteriormente se produce un cambio brusco del volumen específico del agua. Este aumento brusco del volumen específico del agua produce también una subida de presión brusca debido a la rigidez del teflón, es decir, para que el teflón disminuya su volumen y contrarreste el aumento de volumen del agua es necesario que la presión aplicada sobre el mismo sea muy alta.

A la vista de los resultados anteriores es posible descartar el tubo macizo de teflón como adecuado para el uso en la solución aplicada.

- **Tubo macizo de silicona**

En esta disposición será estudiado el comportamiento del conjunto propuesto siendo el tubo interior un tubo macizo de silicona. Como en el caso de tubo macizo de teflón conviene mostrar las condiciones iniciales de las que parte el estudio que se muestran en la Tabla 9.

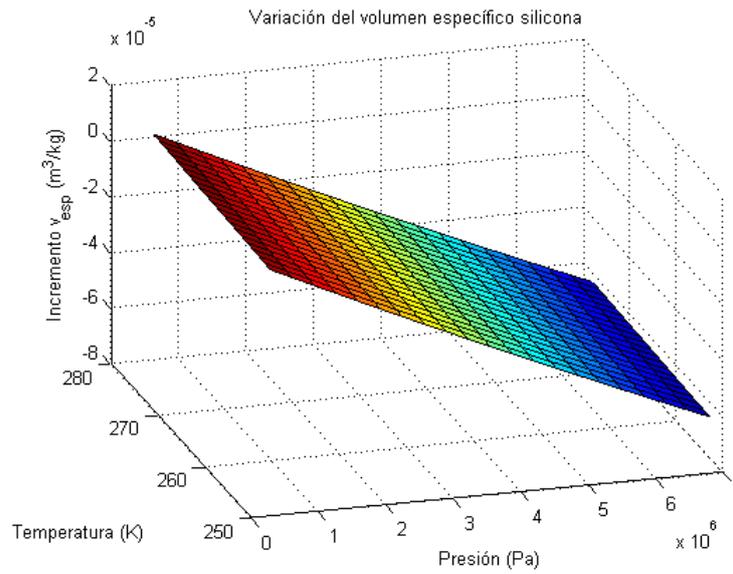
Propiedad inicial	Valor
Temperatura inicial	20 °C
Presión inicial	1 bar
Relación de diámetros iniciales ( $r_D$ )	3
Material del tubo interior	Silicona
Volumen específico silicona	$5.551 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$
Volumen específico agua	$1.0021 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

**Tabla 9:** Condiciones iniciales para el caso del tubo macizo de silicona.

La goma de silicona o simplemente silicona se trata de un elastómero que no pierde sus propiedades para un rango elevado de temperaturas. La diferencia con respecto al teflón a la hora del comportamiento en la solución consiste en su facilidad de deformación que a priori hace que la presión alcanzada en el conjunto sea potencialmente menor que en el caso anterior.

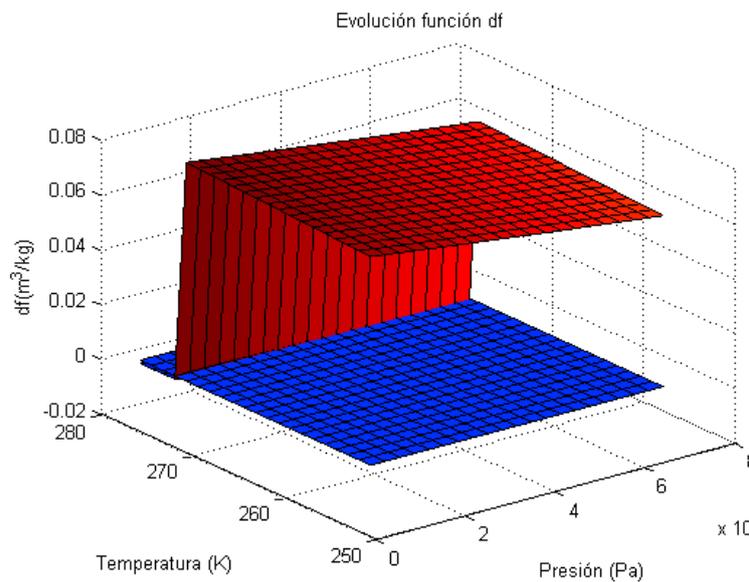
Para entender el comportamiento del conjunto conviene observar la evolución del volumen específico de cada una de las sustancias por separado. La primera sustancia se trata del agua cuyo comportamiento se mostró en la Figura 38.

La evolución de la variación del volumen específico de la silicona respecto a las condiciones de referencia se muestra en la Figura 41.



**Figura 41:** Incremento del volumen específico de la silicona respecto al de referencia para el rango de temperatura y presión estudiado.

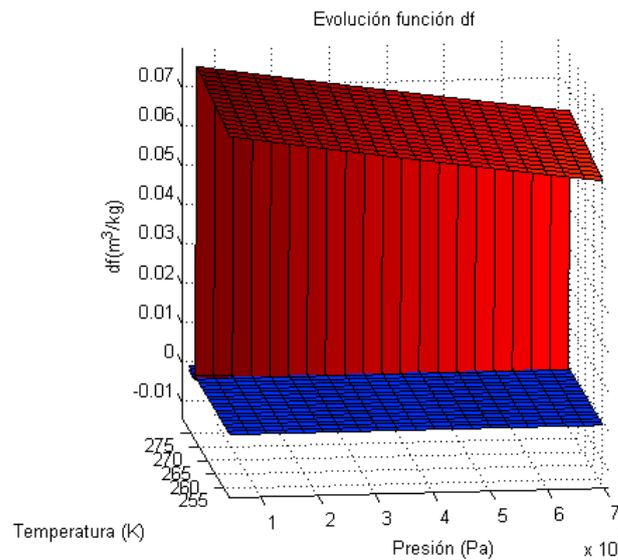
A continuación, para analizar sin perder el sentido físico del problema de la resolución de la ecuación (3.46) se mostrará la superficie  $df(p)_{T_i}$  para los rangos de presión y temperatura descritos anteriormente y la superficie  $df=0$  (Figura 42).



**Figura 42:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado para el tubo macizo de silicona.

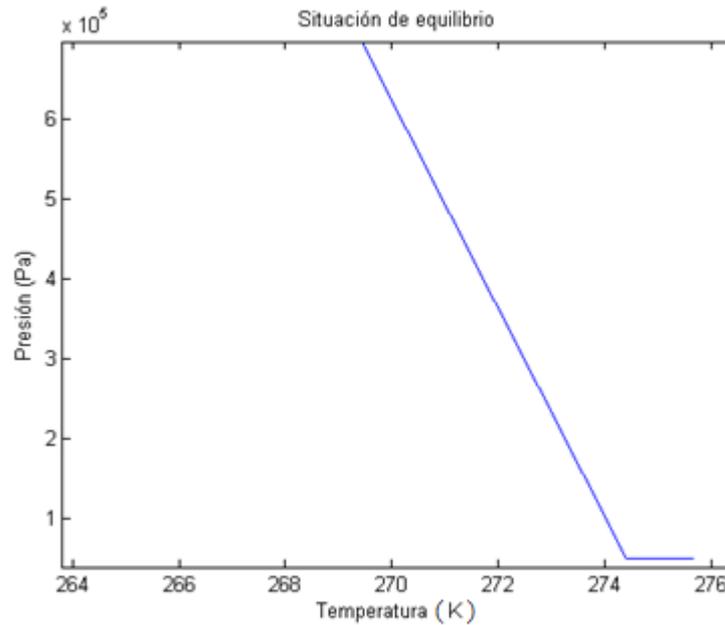
Como se puede deducir de la gráfica anterior para temperaturas menores de 273 K la ecuación (3.46) no tiene solución en el rango de presiones estudiados al igual que en el caso anterior referente al tubo macizo de teflón.

Puede parecer que la sustitución del teflón por la silicona no ha tenido ningún efecto sobre el comportamiento del conjunto al disminuir la temperatura. Sin embargo, es conveniente detenerse a examinar la representación de la figura anterior (Figura 42) con más detalle, para ello se ha representado la Figura 43.



**Figura 43:** Detalle de la evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado para el tubo macizo de silicona.

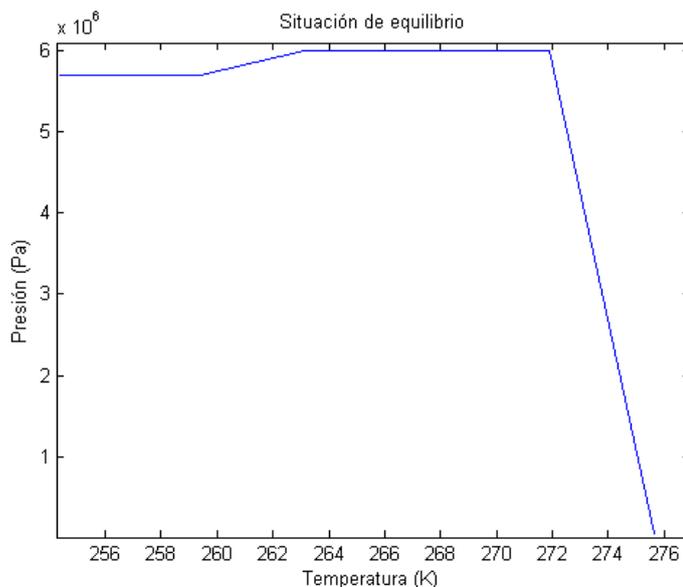
A la vista de la figura anterior se puede obtener la siguiente conclusión: a pesar de que la función  $df(p)_{T_i}$  no llega a ser cero en el rango de presiones estudiados, a medida que la presión va aumentando el valor de la misma va disminuyendo debido a la deformabilidad de la silicona usada, si se estudiara para un mayor rango de presiones, se llegaría una presión en la que se alcanzaría el equilibrio. En el caso anterior de teflón, a pesar que este comportamiento se daba, era casi inapreciable debido a la excesiva rigidez del teflón.



**Figura 44:** Valores de presión y temperatura en los que se alcanzan el equilibrio en el conjunto para el tubo de silicona macizo.

La Figura 44 muestra un comportamiento similar al caso del teflón. El aumento brusco de presión se produciría al producirse el cambio de fase en torno a 273 K. A pesar de la menor resistencia a la deformación de la silicona, el aumento de volumen específico producido en el paso de agua líquida a hielo no puede ser compensado por una disminución del volumen de la silicona sin producirse un aumento excesivo de la presión. A pesar de no haber sido cuantificado este aumento de presión se conoce que está muy por encima de los 0.7MPa. Esto produciría la rotura del tubo de cobre.

De hecho en este caso es posible anular  $df$  si se lleva la presión a límites insospechados. Esta evolución se muestra en la Figura 45.



**Figura 45:** Valores de presión y temperatura en los que se alcanzan el equilibrio en el conjunto para el tubo de silicona macizo fuera del rango de presiones estudiadas.

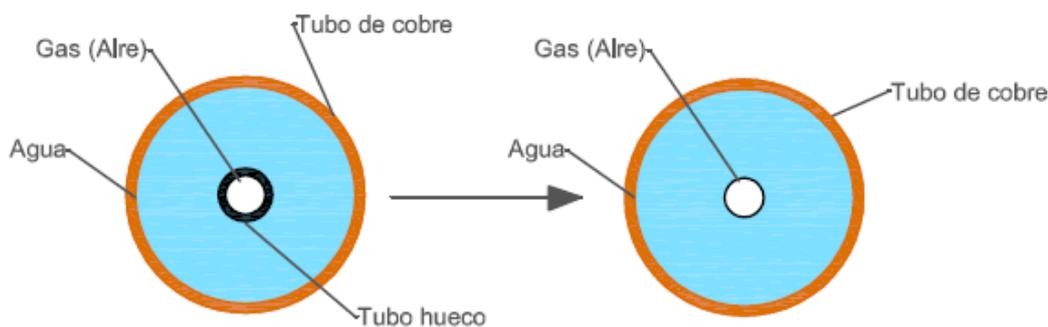
Los valores a que se llega en la Figura 45 de entorno a los 6MPa es un valor tremendamente elevado para que sea soportado por alguna instalación de ACS.

Por todo ello sería posible descartar el tubo macizo de silicona como adecuado para el uso en la solución aplicada. Sin embargo, el comportamiento descrito a raíz de lo mostrado en la Figura 44 invita a no descartarlo totalmente para otras aplicaciones.

#### - **Tubo hueco relleno de aire**

En este caso es necesaria la realización del estudio de una forma diferente al llevado a cabo anteriormente. En el montaje de la solución propuesta existirían tres materiales en lugar de los dos que se tiene en cuenta en el planteamiento de la ecuación (3.46). Por lo tanto, se debe de realiza alguna hipótesis simplificadora si se quiere estudiar de la misma forma que el caso anterior.

La hipótesis simplificadora es la siguiente: se desprecia la presencia del tubo hueco en cuyo interior contiene el aire. Es decir, se procederá al estudio cómo si únicamente existiera el agua rodeando a un cilindro interior compuesto de aire el cual no se mezcla con el agua. Esto se muestra más claramente con el esquema en la Figura 46.



**Figura 46:** Hipótesis simplificadora para el estudio de la solución propuesta con un tubo hueco.

Como se observa en la Figura 46 simplemente se sustituye el volumen ocupado por el tubo por el tubo que contiene el aire en su interior por un volumen virtual de agua.

Esta hipótesis está por el lado de la seguridad porque considera la existencia de una masa mayor de agua que el que realmente existe (se considera que el volumen que ocupa realmente el tubo flexible está formado por agua). Esto provoca que la variación de volumen que se produce del agua sea mayor que la que da en la realidad. Dicha consideración hace que el aumento de presión al que le debe someter al aire para que se contraiga y compense la dilatación del agua sea mayor.

También es indispensable señalar que para que la hipótesis pueda ser considerada una buena aproximación del comportamiento de la realidad se tiene que cumplir las siguientes condiciones:

- 1) El espesor del tubo original hueco debe de ser mucho menor que el diámetro interior de la tubería, cuando más pequeño sea respecto a ese diámetro más cercano será el comportamiento a la realidad.

- 2) El material debe de ser lo suficientemente flexible como para que no oponga una gran resistencia al cambio de forma que se producirá cuando el volumen de agua aumente y del aire se contraiga (sufriendo una compresión). En el caso en el que sea excesivamente rígido se debería de tener en cuenta la resistencia a ser comprimido pudiéndose a llegar a estados con presión mayores que los que se describirán en el modelo anterior. Un buen material que se adapta a lo descrito anteriormente sería la

silicona cuyas características encajan en la descripción. Aunque según las hipótesis consideradas cualquier material que cumpliera las especificaciones podría ser utilizado sin afectar a los resultados del modelo.

Para este estudio la relación entre diámetros considerara será la misma que en la de los tubos macizos. Únicamente se tiene en cuenta que el diámetro interior será el diámetro interior del tubo flexible hueco en este caso. Si se observa en la distribución virtual usada como hipótesis simplificadora (Figura 46) sería el diámetro exterior del “cilindro interior” del tubo formado por el aire.

Las condiciones iniciales que se consideran para la resolución de la ecuación (3.46) que nos dará una aproximación de las presiones alcanzadas en el interior de la solución mostrada son las mostradas en la Tabla 10.

Propiedad inicial	Valor
Temperatura inicial	20 °C
Presión inicial	1 bar
Relación de diámetros iniciales ( $r_D$ )	3
Material del tubo interior	Aire
Volumen específico aire	0.84139 m <sup>3</sup> /kg
Volumen específico agua	1.0021*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg

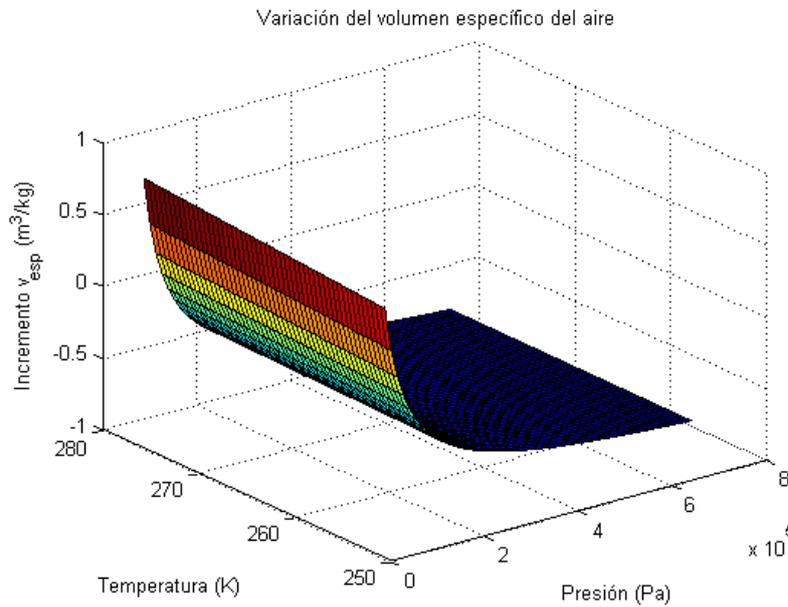
**Tabla 10:** Condiciones iniciales para el caso del tubo hueco de silicona.

Hubiera sido posible el uso de cualquier sustancia que se mantuviera en estado gaseoso durante los rangos de presiones y temperaturas a los que pueden ser sometidos los captadores solares planos. Sería muy importante que dicha sustancia no sea reactiva ni con el agua ni con el material del que está hecho el tubo hueco.

Otra característica esencial en esta solución sería la inocuidad del gas a usar. Al tener en cuenta el posible riesgo de fuga por problemas de estanqueidad en el tubo hueco se convierte

en un factor clave. No es concebible correr ningún riesgo con la posible disolución de un gas nocivo para la salud en el agua. Sobre todo cuando la solución propuesta es potencialmente una opción para evitar las heladas en sistemas directos de calentamiento de agua caliente sanitaria.

Se expondrá a continuación la evolución de la variación del volumen específico del aire respecto a la referencia para poder entender el comportamiento del conjunto propuesto bajo las hipótesis suplicatorias planteadas. Esta evolución se muestra en la Figura 47.

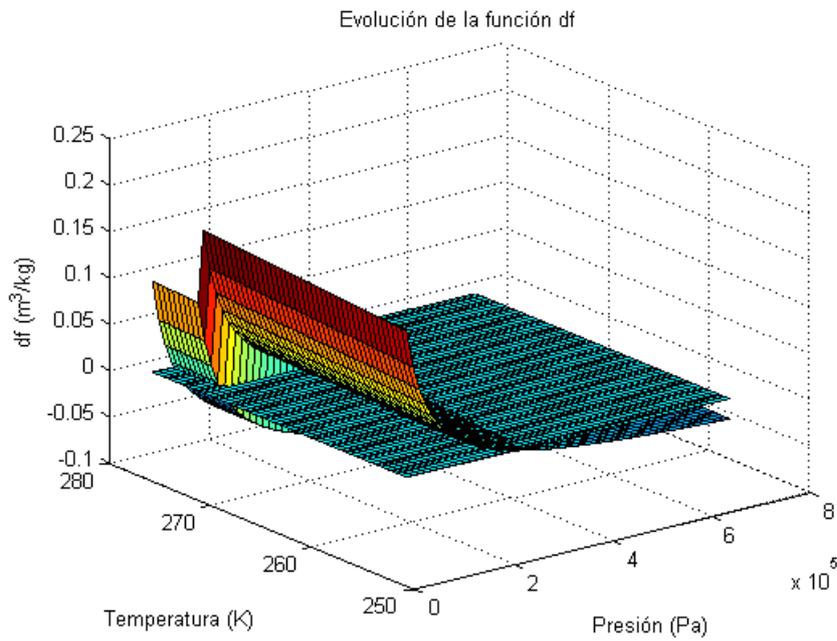


**Figura 47:** Incremento del volumen específico del aire respecto al de referencia para el rango de temperatura y presión estudiado.

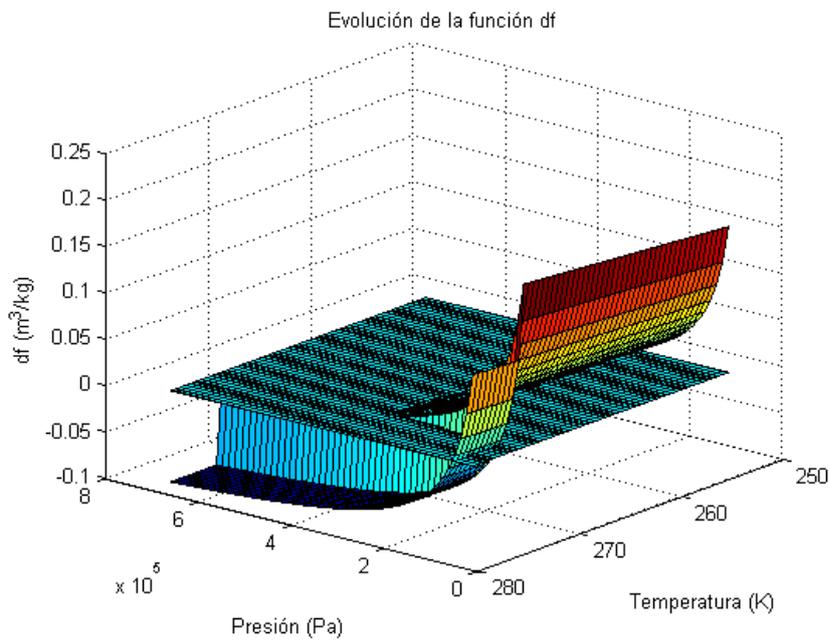
Se observa en la Figura 47 que es la variación es tremendamente dependiente de la presión. Se obtiene una gran disminución del volumen específico con respecto al de referencia al aumentar la presión de manera moderada.

Como en propuestas anteriores conviene mostrar la superficie  $df(p)_{T_i}$  para los rangos de presión y temperatura descritos anteriormente y la superficie  $df=0$  (Figura 48) para apreciar de manera geométrica la solución  $df=0$ . De esta forma se evitan posibles errores en la interpretación de los resultados numéricos.

Esta abstracción matemática se mostrará desde varias perspectivas (Figura 48 y Figura 49) para que pueda ser observada sin cometer errores.

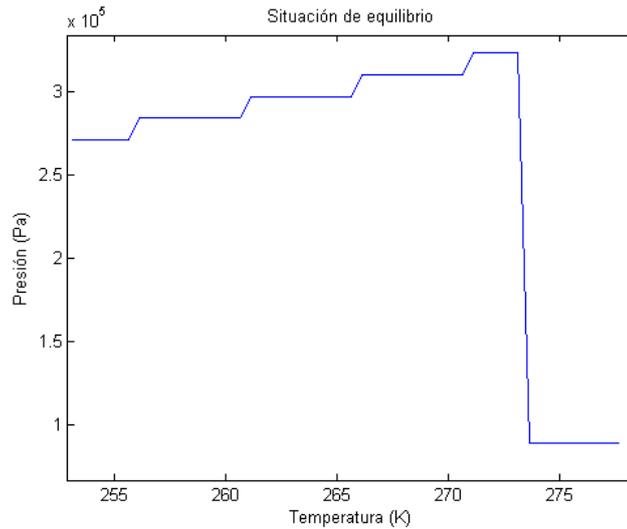


**Figura 48:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado para el caso del tubo hueco.



**Figura 49:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado para el del tubo hueco.

Como se puede deducir al observar las Figura 48 y Figura 49 a diferencia de los estudios anteriores con tubo macizo, para este caso sí existe una solución de la ecuación (3.46) para el rango de presiones estudiado. Pudiéndose hallar la presión que se alcanzaría en el conjunto estudiado si la temperatura se lleva a temperaturas inferiores desde la temperatura inicial. Este resultado se muestra en la Figura 50.



**Figura 50:** Valores de presión y temperatura en los que se alcanzan el equilibrio en el conjunto para el tubo hueco.

En la Figura 50 se muestra claramente el comportamiento que tendría el conjunto estudiado teniendo en cuenta todas las hipótesis realizadas. Como en casos anteriores, al llegar al entorno de 273K y producirse el cambio de fase se producirá un incremento brusco de la presión debido al mayor volumen específico del agua en estado sólido que en estado líquido. Esto quiere decir que el incremento de volumen ocupado por el agua es contrarrestado por la contracción del aire situado en el interior del tubo. Esta es la causa de que este aumento no llegue a presiones tan altas como en los casos estudiados de tubo macizos, sino que se alcanzaría un valor en torno a los  $3 \cdot 10^5$  Pa.

Si la temperatura sigue bajando, la presión irá descendiendo paulatinamente debido a la contracción tanto del aire como del hielo (aunque esta contracción se produce en menor medida como se observa si se comparan las Figura 38 y Figura 47 correspondientes a la evolución del volumen específico del aire y del agua respectivamente).

Al ser la presión máxima alcanzada por el modelo de un valor de  $3 \cdot 10^5 \text{Pa}$  en el rango de temperatura estudiado se puede concluir que el uso de esta configuración de tubo hueco flexible para un rango de temperaturas consideradas como frías es apropiado. Como conclusión de este estudio se extrae que el tubo de cobre del que está hecho el captador soportaría la presión en su interior y no se produciría del mismo a pesar de producirse el cambio de fase de estado líquido a sólido del agua.

#### - **Conclusiones**

Las conclusiones principales del estudio del modelo para el rango de temperaturas considerado como frío se pueden resumir:

- 1) En la configuración de la solución para tubo flexible macizo si se lleva el conjunto a condiciones en que se podrían producir heladas se produciría la rotura de la tubería de cobre del captador. Esto es así tanto para materiales rígidos (teflón) como para materiales más flexibles (silicona) debido al gran incremento de volumen específico que se produce en el agua de su paso de estado líquido a sólido.
- 2) Por otro lado la configuración del tubo hueco sí es viable para su uso para la protección frente a heladas. A pesar de que se produce el mismo aumento de volumen específico del agua en el cambio de fase, es compensado por la contracción del aire en el interior del tubo hueco.

#### **4.4 RESULTADOS DEL MODELO PARA TEMPERATURAS ALTAS**

En este segundo caso es conveniente comprobar que la instalación del dispositivo ideado no añade ningún inconveniente en el funcionamiento del colector solar en cualquier otra circunstancia. Aunque existen otros aspectos que a priori podrán ser una desventaja en el desarrollo normal del funcionamiento del colector en este apartado se estudiará el régimen de presiones que se alcanza en condiciones de temperaturas elevadas. Y su comparación con las que se alcanzarían en condiciones normales (tubo rígido enteramente lleno de agua).

#### **4.4.1 Razones para este estudio**

El comportamiento clave del conjunto para su función principal (protección de los efectos de las heladas sobre los colectores solares planos) tiene lugar para el rango de temperaturas estudiado en el anterior apartado. A pesar de ello, es conveniente estudiar el comportamiento de los conjuntos estudiados para el caso opuesto, cuando se dan las temperaturas más elevadas en el captador.

El captador está sometido a temperaturas que se consideraran altas cuando se encuentra operativo calentando el agua que circula por el interior de los tubos de cobre gracias al efecto de la radiación solar. Sería una forma de evaluar, por tanto, la alteración que produce la introducción de la solución propuesta respecto a condiciones de funcionamiento normales.

A pesar de que en funcionamiento normales existen sobrepresiones, estas son solventadas por soluciones preestablecidas. Estas soluciones se tratan del uso de vasos de expansión en la instalación hidráulica asociada al captador y en algunos casos específicos del uso de válvulas de sobrepresión.

Por lo tanto, si se producen sobrepresiones en la instalación debido a la instalación del conjunto propuesto serían contrarrestados por los métodos anteriores.

Así pues el objeto de este estudio será evaluar la presión alcanzada en el interior del tubo de cobre a temperaturas elevadas que puedan ser alcanzadas durante el funcionamiento normal del captador. Este debe ser evaluado cualitativamente para comprobar que los elementos existentes en una instalación convencional puedan ser usados sin inconveniente alguno.

#### **4.4.2 Tubo macizo**

La presión de equilibrio del conjunto según corresponda se hallará de la misma forma expuesta en la resolución del modelo para condiciones de temperaturas que pueden producir heladas.

El rango de temperatura a evaluar se encuentra entre los 313 K (unos 40°C de manera aproximada) y los 413 K (unos 140°C aproximadamente). La presión se ha estudiado en un rango más amplio que en casos anteriores desde 0.05MPa (0.5 bar) hasta 8MPa (80 bar). La razón de este rango tan amplio de presión se justifica con los resultados que se obtendrán posteriormente.

Pese a que en el estudio anterior se descartó el tubo macizo para la protección frente a heladas, se realizará el estudio para el tubo macizo de silicona. La razón por la cual se lleva a cabo es que este estudio sea un primer paso para la instalación del conjunto propuesto con un tubo macizo con la única función de método de protección frente a los depósitos calcinosos que se producen en las tuberías.

El material usado en el estudio del tubo macizo se trata de la silicona ya que en estudios anteriores ha demostrado ofrece un mejor comportamiento. Este comportamiento se trata del alcance de una presión menor en el conjunto debido su mayor deformabilidad.

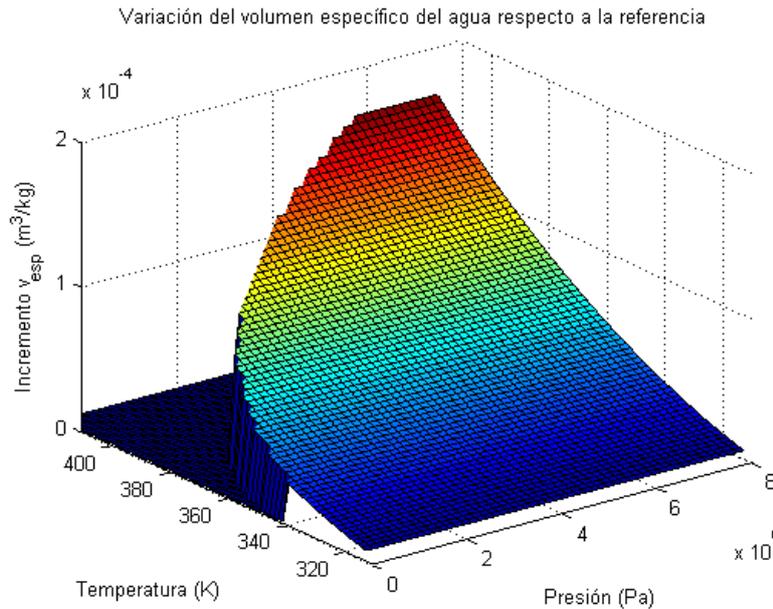
Las condiciones iniciales consideradas en este estudio son las mostradas en la Tabla 11

Propiedad inicial	Valor
Temperatura inicial	20 °C
Presión inicial	1 bar
Relación de diámetros iniciales ( $r_D$ )	3
Material del tubo interior	Silicona
Volumen específico silicona	$5.551 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$
Volumen específico agua	$1.0021 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

**Tabla 11:** Condiciones iniciales para el caso del tubo macizo de silicona

En primer lugar se visualiza el comportamiento de los volúmenes específicos del agua y de la silicona. Estas representaciones facilitan la comprensión del resultado de la resolución de la ecuación (3.46) anteriormente mencionada.

Para el caso del agua el incremento volumen específico respecto al de referencia dentro de los rangos de presión y temperatura es el representado en la Figura 51 cuyos valores se han obtenido de la aplicación informática Refprop [24].



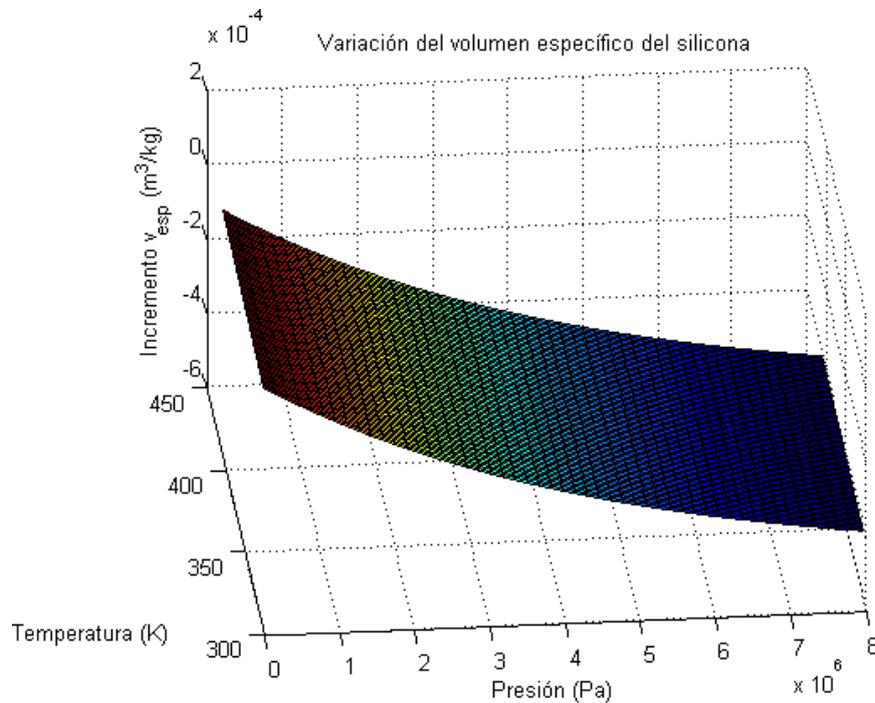
**Figura 51:** Incremento de volumen específico del agua en estado líquido respecto al de referencia en las condiciones establecidas.

Es esencial tener en cuenta en la figura anterior que sólo se ha representado el incremento de volumen específico para las condiciones en las que el agua se mantiene en estado líquido dentro de las condiciones de presión y temperatura estudiadas. En la Figura 51 las condiciones de presión y temperatura en las que el agua se convierte en estado gaseoso se excluyen representando por el mismo valor de volumen específico (representación de una superficie plana y horizontal).

La razón por la que no se incluye el comportamiento del agua en estado gaseoso es el siguiente. Durante el proceso de funcionamiento de un captador solar plano para el aprovechamiento de energía térmica a baja temperatura no conviene que se produzca vapor de agua en el interior de los tubos.

Por lo tanto, en ningún caso se producirá el paso de la totalidad del agua contenida en los tubos de captador a estado gaseoso y además en el caso de que se produzca será el de una fracción mínima del agua contenida en el tubo. Es decir, considerar el comportamiento del agua del interior del tubo de captador como vapor de agua no sería representativo del comportamiento del mismo, siendo más cercano al comportamiento real el modelo si sólo se considera el agua como líquida.

Para el caso de la silicona bajo las condiciones de presión y temperatura anteriormente expuestas se comportará según lo descrito (ecuación 3.2) en la Figura 52.

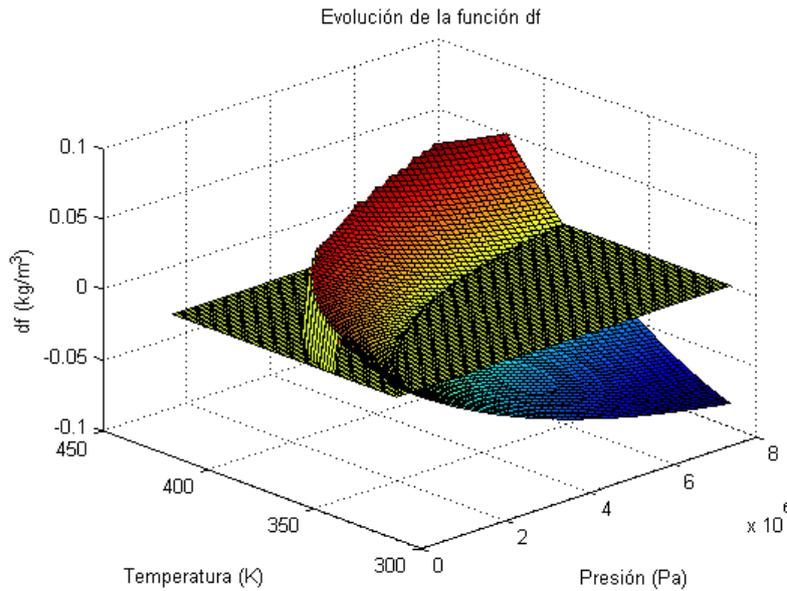


**Figura 52:** Incremento de volumen específico de la silicona respecto al de referencia en las condiciones establecidas.

La evolución del valor del incremento de volumen específico es similar al dado en el caso del presentado para el estudio del comportamiento del conjunto en las condiciones de helada.

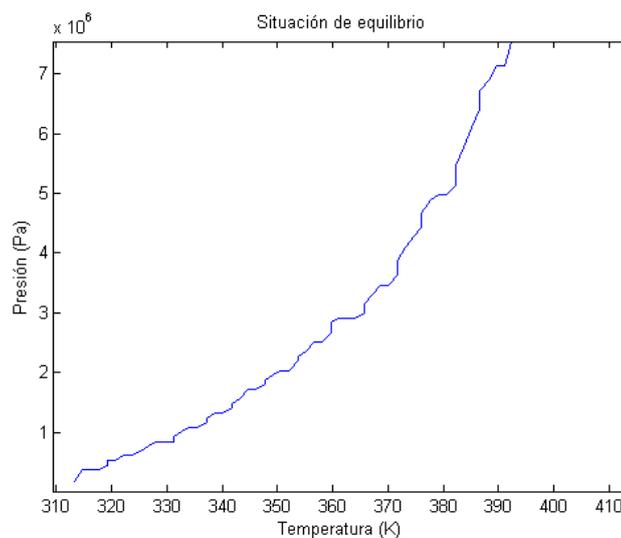
Una vez que se tienen presente el comportamiento tanto del agua como de la silicona en el rango de temperaturas y presión dado, es posible pasar a la resolución de la ecuación (3.46) de la misma forma que para en casos anteriores.

En primer lugar se representará los valores que alcanza la función  $df$  para este conjunto para evitar posibles malinterpretaciones del resultado numérico de la ecuación (3.46). Esta representación se encuentra en la figura junto el plano  $df=0$  para poder ver en para que condiciones de presión y temperatura se cumple la ecuación (3.46) (intersección de ambas superficies).



**Figura 53:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperatura y presión estudiado para el del tubo macizo de silicona.

Como se puede observar en la Figura 53 ocurre lo contrario que pasaba para el caso de condiciones de presión y temperatura que simulabas la heladas (Figura 42). En este caso las condiciones de presión para que  $df=0$  se encuentran dentro del rango estudiado. Aunque como se ha especificado anteriormente el rango de presión se ha aumentado excepcionalmente para ofrecer la evolución del conjunto de manera completa. La resolución numérica a la ecuación (3.46) se expone en la Figura 54.



**Figura 54:** Valores de presión y temperatura en los que se alcanzan el equilibrio en el conjunto para el tubo flexible macizo de silicona.

Se observa en la Figura 54 que si se va aumentando la temperatura del conjunto desde las condiciones iniciales definidas, se produce un aumento de la presión de forma exponencial. Llegando se a superar los 8MPa (80 bar de presión) antes de llegar a la temperatura extrema impuesta (410 K).

A pesar de que a primera vista los resultados puedan hacer pensar en la inviabilidad de la aplicación del conjunto, es conveniente compararlos con el resultado que se obtendría en condiciones normales. Estas condiciones normales de comportamiento del conjunto se obtendrían de aplicar la ecuación (3.31)

$$\Delta V_{rig} = \Delta V_w(T, p, T_0, p_0) + \Delta V_s(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.31)$$

Como al no existir en el interior tubo de ningún tipo:

$$\Delta V_s(T, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.52)$$

Siguiendo el desarrollo descrito anteriormente se llegaría a una nueva ecuación que no serviría para modelar el comportamiento del tubo:

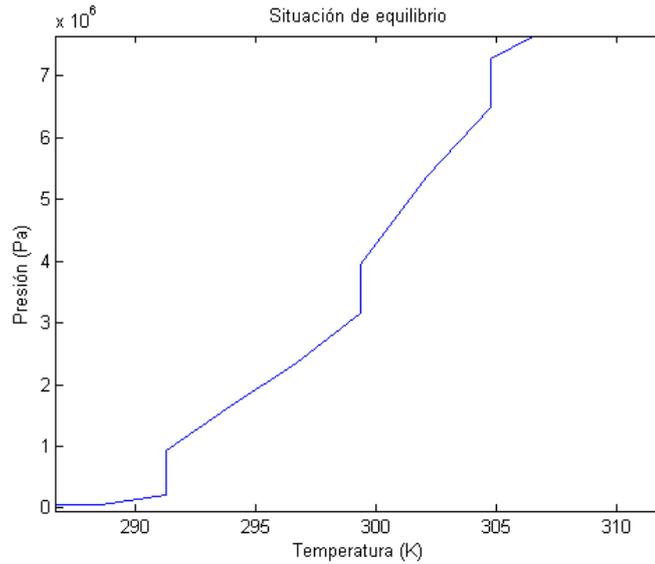
$$df'(p)_{T_i} = v_{ew}(T_0, p_0)^{-1} * (1) * \Delta v_{ew}(T_i, p, T_0, p_0) = 0 \quad (3.53)$$

Sin embargo, para el caso planteado al no existir en el interior ningún material cuya rigidez sea mucho menor que la del cobre y pudiendo se considerar el líquido en las condiciones de trabajo cómo incompresible. Una de las hipótesis realizadas para el conjunto no se puede considerar como cierta.

En concreto esta hipótesis se trata de la consideración del volumen interior de la tubería de cobre cómo constante. Para este caso el cobre no se puede considerar un material infinitamente rígido en comparación con los demás elementos, siendo el volumen en su interior no constante y produciendo deformaciones en el mismo que provocan tensiones adicionales no tenidas en cuenta por el modelo anterior.

Por otro lado, la realización del estudio del comportamiento del tubo rígido relleno únicamente de agua manteniendo las hipótesis del modelo inicial aunque no sean adecuadas tiene una manifiesta utilidad: la comparación cualitativa del comportamiento del conjunto con el tubo flexible en su interior con respecto al comportamiento del conjunto sin tubo flexible en su interior.

A continuación se mostrará la representación de la solución de la ecuación 3.52 que proporcionará una de la presión alcanzada en el interior del tubo de cobre rígido relleno enteramente de agua.



**Figura 55:** Valores de presión y temperatura que se alcanzan en el conjunto para el tubo rígido relleno completamente de agua.

De lo expuesto en la Figura 55 se deduce que se produce un rápido aumento de la presión nada más empezar a desplazar la temperatura de la temperatura de referencia. La evolución es mucho más brusca y rápida que en el caso anterior (Figura 54).

La interpretación clara de este estudio es la clara mejora del comportamiento del uso del tubo de silicona macizo frente al del uso del tubo de cobre sin ningún elemento interior. Si se comparan los resultados expuestos en la Figura 54 con los de la Figura 55 se concluye que las presiones que se alcanzarían bajo las hipótesis que conducen al modelo de la ecuación (3.46) son excesivamente altas en ambos casos. Sin embargo, el aumento brusco de presión se alcanza para temperaturas más altas cuando existe el tubo flexible de silicona.

#### **4.4.3 Tubo hueco de silicona**

El objetivo del estudio de este caso es similar al del caso anterior: comparar el comportamiento del conjunto en cuanto la presión alcanzada en condiciones de funcionamiento normal del captador.

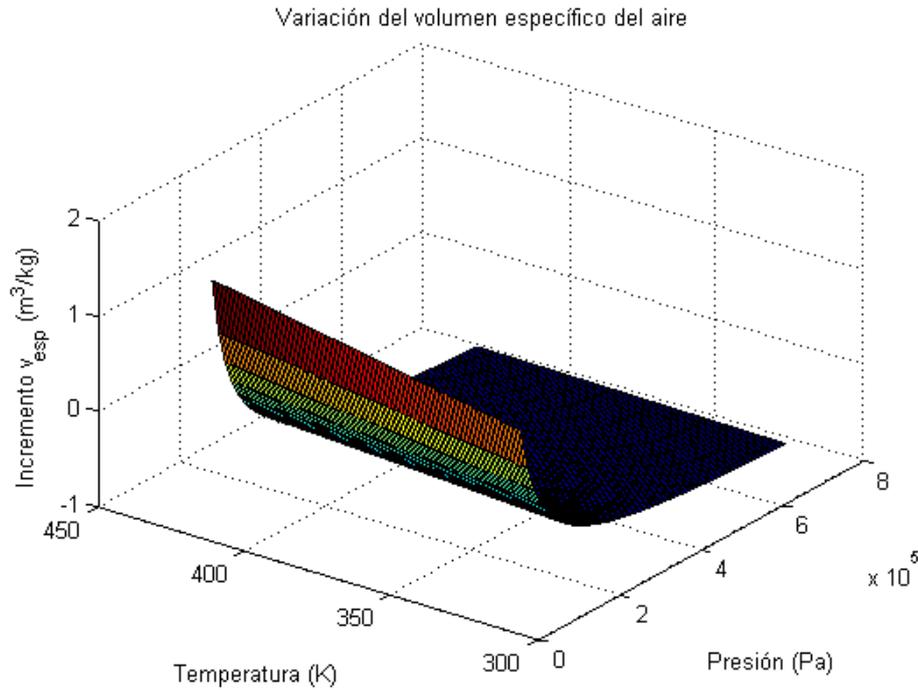
Para este estudio las condiciones iniciales consideradas son las mostradas en la Tabla 12

Propiedad inicial	Valor
Temperatura inicial	20 °C
Presión inicial	1 bar
Relación de diámetros iniciales ( $r_D$ )	3
Material del tubo interior	Aire
Volumen específico aire	0.84139 m <sup>3</sup> /kg
Volumen específico agua	1.0021*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg

**Tabla 12:** Condiciones iniciales para el caso del tubo hueco de silicona.

Para el estudio de este caso de tubo hueco se van a considerar las mismas hipótesis que se hizo para el caso del estudio bajo condiciones en las que se producirían heladas. Estas hipótesis se encuentran expuestas en el apartado caso tubo hueco relleno de aire en la resolución del modelo para condiciones de heladas y se ilustran en la Figura 46.

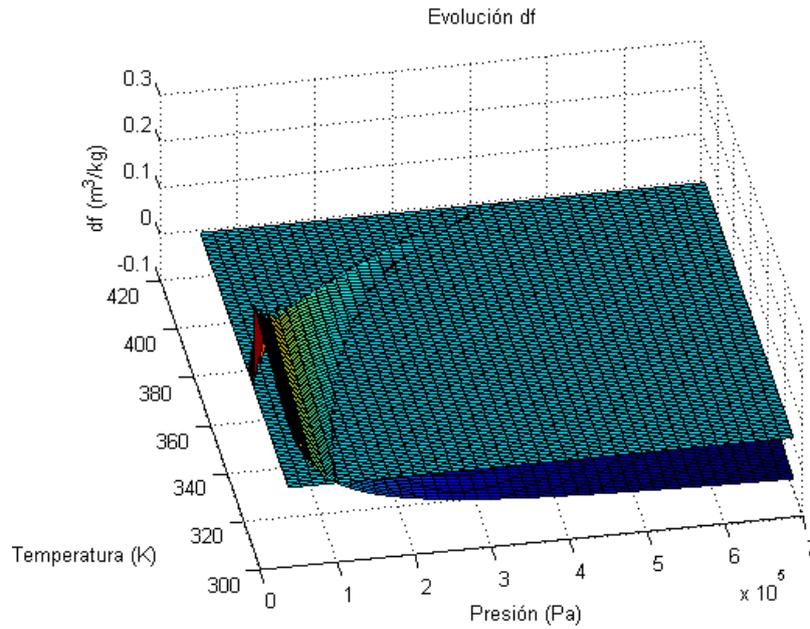
La evolución del valor de la variación del volumen específico del agua líquida respecto al de referencia ya se ha expuesto en la Figura 51. En cuanto a la variación del volumen específico del aire respecto al de referencia se muestra en la siguiente figura denominada Figura 56.



**Figura 56:** Incremento del volumen específico del aire respecto al de referencia para el rango de temperaturas y presiones estudiado.

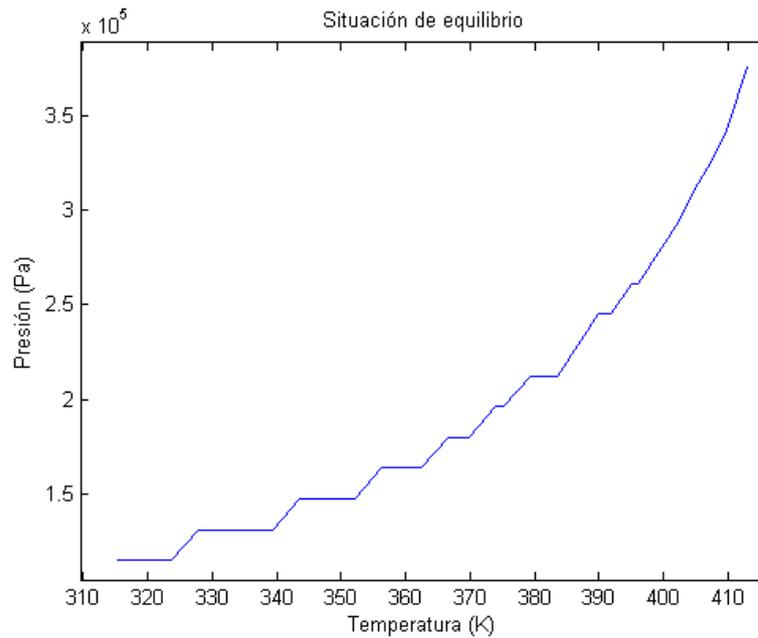
Como se observa en la Figura 56, a pesar el aumento de la temperatura con respecto al rango estudiado para las condiciones de heladas (Figura 47) muestra una evolución parecida a lo mostrado en el caso de condiciones de helada. Esta se resume en que el volumen específico es mucho más sensible a los cambios de presión que de temperatura.

Para interpretar el resultado de la resolución numérica de la ecuación (3.46) se va a representar, como en casos anteriores, la evolución del valor de la función  $df$  para los rangos de presión y temperatura indicados. Junto a esto se va a visionar la superficie  $df=0$  para observar para que valores se interceptan las dos superficies y se cumple la ecuación (3.46). Esto está expuesto en la Figura 57.



**Figura 57:** Evolución de la función  $df$  en el rango de temperaturas y presiones estudiado para el tubo hueco de silicona.

A primera vista es evidente que la solución de la ecuación  $df$  para el rango de temperaturas escogido se encuentra dentro del rango de presiones definido como se observa en la Figura 58.



**Figura 58:** Valores de presión y temperatura alcanzados en el conjunto para el tubo hueco de silicona.

La Figura 58 muestra un comportamiento muy interesante del conjunto. Al aumentar la temperatura del conjunto se producirá un aumento de presión suave pero al alcanzar los aproximadamente los 380 K este se convierte en un brusco aumento. Pudiéndose decir que sufre una evolución casi exponencial.

A pesar de este comportamiento de subida brusca de la presión, las presiones alcanzadas según el modelo son muchos menores que las que se deduce de la interpretación de la Figura 55. Por lo que esta configuración mejora de manera notable el comportamiento en cuanto las presiones alcanzadas en el captador solar plano con respecto a la configuración normal.

Es conveniente remarcar que para este caso las hipótesis del modelo inicial del que se dedujo la expresión de  $df$  sí se cumple por la existencia del tubo hueco relleno de aire. Por lo tanto, las presiones que se alcanzarían en el tubo serán representativas de comportamiento real del conjunto, no únicamente sirven como comparación con el caso del tubo relleno enteramente de agua.

Así pues teniendo en cuenta la reducción significativa de la presión alcanzada que se deduce de la Figura 58 esta solución puede ser una posible solución a problemas de sobrepresión en las instalaciones hidráulicas asociada al captador solar correspondiente. Se deja pendiente para posteriores investigaciones el estudio de esta técnica para solucionar problemas de sobrepresión.

#### **4.5 CONCLUSIONES DEL USO DEL MODELO**

Existen varias conclusiones del estudio teórico que conviene destacar.

De las soluciones aportadas, la única que según el modelo planteado puede ofrecer una protección efectiva frente a los problemas asociados de las heladas de los captadores solares planos es la configuración que consta de un tubo hueco relleno de aire. Además esta configuración, aunque no sea su objetivo principal, reduce enormemente las presiones alcanzadas en el interior del tubo de cobre del captador durante su funcionamiento normal. Pudiéndose a llegar a plantear como solución de los problemas asociados a la sobrepresión en las instalaciones hidráulicas.

En cuanto a la solución del tubo macizo se descarta totalmente como solución para la protección contra heladas, sobre todo el caso del teflón por su excesiva rigidez. Pese a ello, se continuó el estudio para condiciones de temperaturas a la que se encuentra el captador al estar

operativo para ver si la existencia del tubo en el interior de la tubería de cobre sería perjudicial en el comportamiento normal para su uso para otras aplicaciones. Según los resultados obtenidos las presiones alcanzadas serán menores que sin la existencia del tubo aunque no se produciría unos resultados tan adecuados como los alcanzados con la solución del tubo hueco flexible.

#### 4.6 PÉRDIDA DE CARGA ASOCIADA A LA PROPUESTA

El estudio del comportamiento del dispositivo propuesto en condiciones normales de funcionamiento del captador solar plano es indispensable. La razón de esto es comprobar si la existencia del tubo en el interior los tubos de cobre supone una gran inconveniente o todo lo contrario.

En el apartado anterior ha sido objeto de estudio la presión alcanzada en el interior del tubo de cobre a trabajar en condiciones en la que suele trabajar el captador solar. En esta parte se ha elegido el estudio del cambio de las pérdidas de carga al introducir el tubo de silicona en el interior del tubo de cobre.

##### 4.6.1 Cálculo pérdida de carga

Las pérdidas asociadas al rozamiento del fluido con las paredes de las tuberías se suelen calcular usando la expresión de Darcy-Weirsbach [16] y [20]. Dicha expresión se expone a continuación.

$$\Delta h_{roz} = f * \left(\frac{L}{D_h}\right) * \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (3.54)$$

Siendo.

$\Delta h_{roz} (mca)$  → Pérdida de presión total asociada al rozamiento del fluido con las paredes en metros columna de agua.

$L (m)$  → Longitud de la tubería.

$v \left(\frac{m}{s}\right)$  → Velocidad del fluido en el interior de la tubería.

$g \left(\frac{m}{s^2}\right)$  → Aceleración de la gravedad

$D_h (m)$  → Diámetro hidráulico. Es un parámetro que es defino por la siguiente relación.

$$D_h = 4 * \frac{A_p}{\Pi_m} \quad (3.55)$$

Con

$A_p(m^2)$  → Área de paso ocupada por el fluido en la sección perpendicular al eje de la tubería.

$\Pi_m (m)$  → Perímetro mojado. Constituido por la zona de contacto entre el fluido y las paredes de la tubería en la sección perpendicular al eje de la tubería.

$f$  → Factor de fricción. Este factor depende tanto del régimen del fluido que circula por la tubería definido por el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa de la tubería ( $rr$ ). La dependencia se expone en el conocido ábaco de Moody (Figura 59).

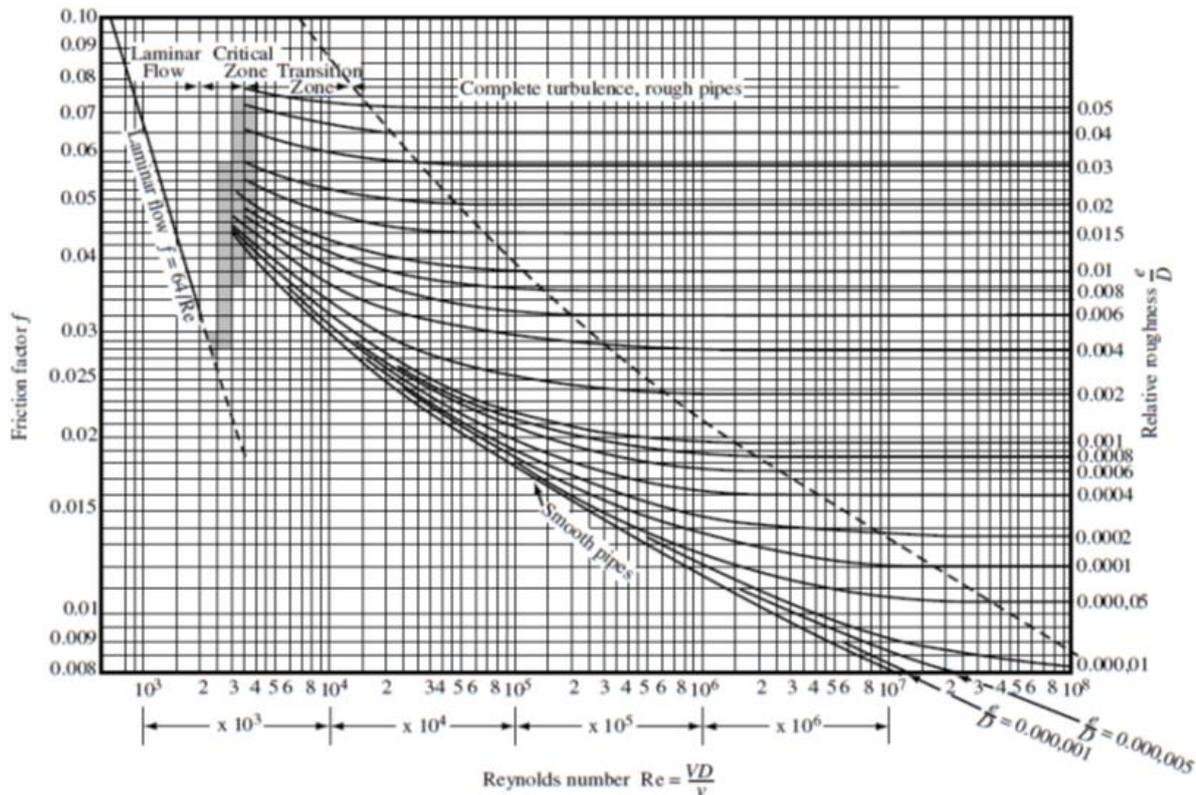


Figura 59: Ábaco de Moody [16].

Como se aprecia en la Figura 59 se trata de una relación mostrada de manera gráfica. En nuestro estudio se necesitará una aproximación algebraica del mismo para poder comparar para numerosos casos la pérdida de carga adicional debida a la inclusión de un tubo interior de silicona. La aproximación usada es la correlación de Churchill de 1977 [21].

$$f = 8 * \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \left( \left[ 2.457 * \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 * rr} \right) \right]^{16} + \left[ \frac{37530}{Re} \right]^{16} \right)^{-1.5} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (3.56)$$

Con:

$$Re = \frac{\mu \rho D_c}{v} \quad (3.57)$$

El número de Reynolds queda definido por

$\mu \left( \frac{Ns}{m^2} \right)$  → Viscosidad del fluido que circula por la tubería.

$v \left( \frac{m}{s} \right)$  → Velocidad del fluido en el interior de la tubería.

$D_c$  → Diámetro característico de la tubería, en estos casos  $D_c = D_h$  (3.58)

$\rho \left( \frac{m^3}{kg} \right)$  → Densidad del fluido.

La rugosidad relativa queda definida por.

$$rr = \frac{\varepsilon}{D_c} \quad (3.59);$$

$\varepsilon(m)$  → Rugosidad superficial.

Si pasamos la presión de metros columna de agua a pascales la expresión (3.54) quedaría como:

$$\Delta p_{roz}(Pa) = f * \left( \frac{\rho L}{2D_h} \right) v^2 * \quad (3.60)$$

Con

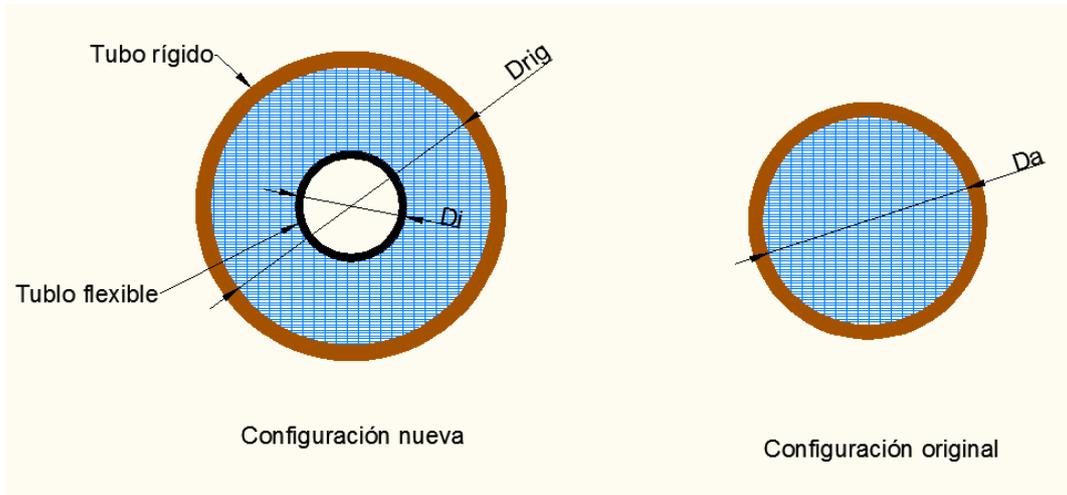
$\Delta p_{roz}(Pa)$  → Pérdida de carga debido al rozamiento del fluido en Pa.

#### 4.6.2 Pérdidas de carga en el sistema propuesto

##### - Definición geometrías

Se va a proceder a la definición de las geometrías de tuberías a comparar. Por un lado se encuentra el tubo de cobre rígido sin ningún tipo de complemento por el que circula el agua en todo su interior, esta disposición se llamará **configuración original**. Por otro lado se tiene

el tubo de cobre rígido al que se le ha añadido el tubo interior de silicona que se llamará **nueva configuración**. El agua circula en el espacio existente entre el tubo de silicona y el de cobre. Ambos casos se encuentran representados en el siguiente esquema. Este esquema es exactamente el mismo que el mostrado en la Figura 60.



**Figura 60:** Esquemas de las configuraciones usadas para definir las pérdidas de carga.

Se desea que ambas configuraciones presenten las mismas características respecto a la cantidad de fluido que circula por ambas. Para ello se realizan las siguientes consideraciones.

- El área de paso de ambas es la misma, es decir:

$$A_n = A_o \quad (3.61)$$

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(D_{rig}^2 - D_i^2)}{4} \quad (3.62)$$

Con

$A_n$  ( $m^2$ ) → Área de paso del agua por la tubería en la configuración nueva.

$A_o$  ( $m^2$ ) → Área de paso del agua por la tubería en la configuración original.

$D_a, D_{rig}, D_i$  ( $m$ ) → Diámetro existentes en las distintas configuraciones (ver Figura 60).

Se recuerda en este punto que el parámetro clave usado en apartados anteriores para el establecimiento de la geometría en el caso de la nueva configuración fue la relación entre diámetros. La definición de este parámetro está descrita en la expresión (3.12). Si se rescribe la misma expresión con la nomenclatura empleada en la Figura 60 quedaría como sigue.

$$r_D = \frac{D_{rig}}{D_i} \quad (3.12)$$

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (3.53) se obtiene una expresión del valor de  $D_{ext}$

$$D_{rig} = \frac{D_a}{\sqrt{1 - r_D^2}} \quad (3.63)$$

- En primera aproximación el caudal que circulará por cada configuración será el mismo

$$Q_o = Q_n \quad (3.64)$$

Con

$Q_o \left( \frac{m^3}{s} \right)$  → Caudal volumétrico de fluido que circula por la configuración original.

$Q_n \left( \frac{m^3}{s} \right)$  → Caudal volumétrico de fluido que circula por la configuración nueva.

Teniendo en cuenta que la igualdad del área de paso en ambas configuraciones (3.61) y aplicando la definición de caudal se obtiene como resultado la igualdad de la velocidad de circulación del agua en ambas configuraciones.

$$v_o A_o = v_n A_n \quad (3.65) \rightarrow v_o = v_n \quad (3.66)$$

Siendo

$v_o \left( \frac{m}{s} \right)$  → Velocidad de circulación del fluido por la configuración original.

$v_n \left( \frac{m}{s} \right)$  → Velocidad de circulación del fluido por la configuración nueva.

### - Relación entre las pérdidas de cargas en las distintas configuraciones

La comparación de las pérdidas de cargas para los casos presentados en la Figura 60 se obtiene de la aplicación de la expresión (3.60) para cada configuración.

$$\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}} = \frac{f_n * \left( \frac{\rho_n L_n}{2D_{hn}} \right) v_n^2}{f_o * \left( \frac{\rho_o L_o}{2D_{ho}} \right) v_o^2} \quad (3.67)$$

Siendo el subíndice o el referente a la configuración original y el subíndice n referente a la configuración nueva.

Se considerará que ambas configuraciones presenta una misma longitud (3.68). Además de ello, se compararán las dos situaciones mencionadas para las mismas condiciones de presión absoluta y temperatura así que la densidad en ambos casos es la misma (3.69).

$$L_o = L_n \text{ (3.68); } \quad \rho_n = \rho_o \text{ (3.69)}$$

Si a esto se le une lo presentado en (3.66) la expresión 3.67 se simplifica notablemente quedando:

$$\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}} = \frac{\frac{f_n}{D_{hn}}}{\frac{f_o}{D_{ho}}} = \left(\frac{f_n}{f_o}\right) \left(\frac{D_{ho}}{D_{hn}}\right) \text{ (3.70)}$$

De la expresión (3.70) se puede deducir que la diferencia entre pérdidas de carga de distintas configuraciones depende de dos factores principalmente el primero del diámetro hidráulico y la segunda debido al factor de fricción. El primer factor se encuentra relacionado con el cambio de la distribución geométrica del agua al circular por la tubería y se denominará **factor geométrico**. Por otro lado el segundo factor atendiendo a la expresión (3.56) depende tanto del cambio de materiales (rugosidad) como el posible cambio del régimen de circulación del fluido en el interior de las distintas configuraciones y se llamará **factor de fricción**.

En los siguientes párrafos se va a analizar tanto la importancia relativa de cada uno de los dos factores, como la dependencia de ambos con respecto a la geometría elegida.

- Factor geométrico

Para calcular la relación entre los diámetros hidráulicos entre las distintas configuraciones no es necesario más que aplicar la ecuación (3.56) para cada una de ellas, siendo para cada caso

$$D_{ho} = 4 * \frac{\pi D^2}{\pi D} = D \text{ (3.71); } \quad D_{hn} = 4 * \frac{\pi(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{\pi D_{ext} + \pi D_{int}} = (D_{ext} - D_{int}) \text{ (3.72)}$$

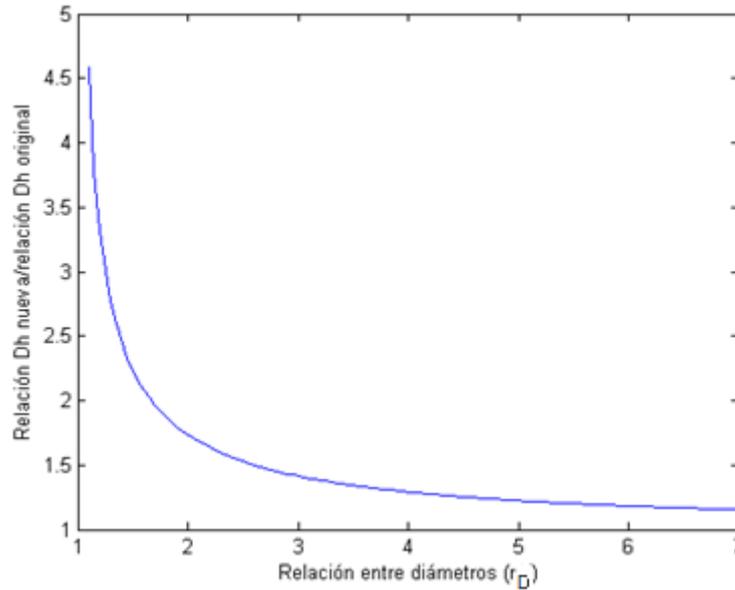
Usando las expresiones (3.12) y (3.63) en las relaciones anteriores se puede hallar el valor de  $D_{hn}$  de una manera simplificada en (3.73)

$$D_{hn} = D_o \frac{1 - r_D^{-1}}{\sqrt{1 - r_D^{-2}}} \text{ (3.73)}$$

Quedando

$$\left(\frac{D_{ho}}{D_{hn}}\right) = \left(\frac{1 - r_D^{-1}}{\sqrt{1 - r_D^{-2}}}\right)^{-1} \quad (3.74)$$

La representación de este factor para varios valores de  $r_D$  se muestra en la Figura 61.



**Figura 61:** Evolución de la relación entre diámetros hidráulicos de las distintas configuraciones con  $r_D$ .

Como se observa en la Figura 61 la relación parte de una asíntota para el valor extremo en el que  $r_D=1$ . En este caso irreal el diámetro del tubo flexible coincide con el del interior de la tubería de cobre rígida, no habiendo espacio para el agua. Por lo tanto el valor infinito que alcanza la relación de diámetros hidráulicos no debe de extrañar al lector. A medida que la relación entre diámetro aumenta, o lo que es lo mismo, el diámetro del tubo flexible se hace menor con respecto al diámetro de la tubería rígida, la relación entre diámetros hidráulicos disminuye tendiendo para valores mayores de  $r_D$  hacia uno. Es decir, a medida que el diámetro del tubo flexible se hace más pequeño más se parece a la geometría de la configuración nueva a la original.

- Factor de fricción

Para el cálculo del factor de fricción es necesario obtener dos datos imprescindibles la rugosidad de los materiales que componen el montaje y el número del Reynolds asociado al flujo de agua.

En relación con el cálculo con la rugosidad relativa se ha obtenido el valor de la rugosidad absoluta del cobre en siendo este de 0.0015 mm [30] En cuanto a la rugosidad de la silicona, debido a no ser un material normalmente usado en la canalización los datos de rugosidad no suele estar recogidos en la bibliografía sobre el tema. Frente a este problema se pueden optar dos soluciones bien aproximarla la rugosidad de la silicona a la de otros materiales plásticos usados en la canalización de agua como PVC o PE o tomar la rugosidad absoluta de la silicona como del mismo orden que del cobre ya que los estudios realizados como [31] lo corroboran. En cualquier caso el resultado sería el mismo: escoger una rugosidad absoluta similar a la del cobre.

La rugosidad relativa asociada a la nueva configuración se realiza con una media ponderada de las rugosidades de las dos superficies como se muestra en (3.75).

$$rr_n = \frac{\Pi_{Cu}}{\Pi_{nn}} * rr_{Cu} + \frac{\Pi_{sil}}{\Pi_{nn}} * rr_{sil} \quad (3.75)$$

Con

$rr_n$  → Rugosidad relativa de la nueva configuración.

$rr_{Cu}$  → Rugosidad relativa de la superficie de cobre.

$rr_{sil}$  → Rugosidad relativa de la superficie de silicona.

$\Pi_{nn} (m)$  → Perímetro mojado nueva configuración.

$\Pi_{Cu} (m)$  → Perímetro mojado de la nueva configuración constituido por la superficie de la tubería de cobre.

$\Pi_{sil} (m)$  → Perímetro mojado de la nueva configuración constituido por la superficie de la tubería de cobre.

En cuanto al cálculo del número de Reynolds asociado al flujo es necesario conocer atendiendo a (3.67) el orden del diámetro de las tuberías de cobre en la configuración original y la velocidad a la que circula el agua por ella. Para ello se han consultado varios catálogos de captadores solares planos [10], [11] llegando a la elección de un valor característico del

diámetro original y la velocidad de circulación. Los valores en la configuración nueva son posibles de obtener a partir de los anteriores usando las ecuaciones (3.73) y (3.66). Los parámetros elegidos para este estudio se muestran en la Tabla 13.

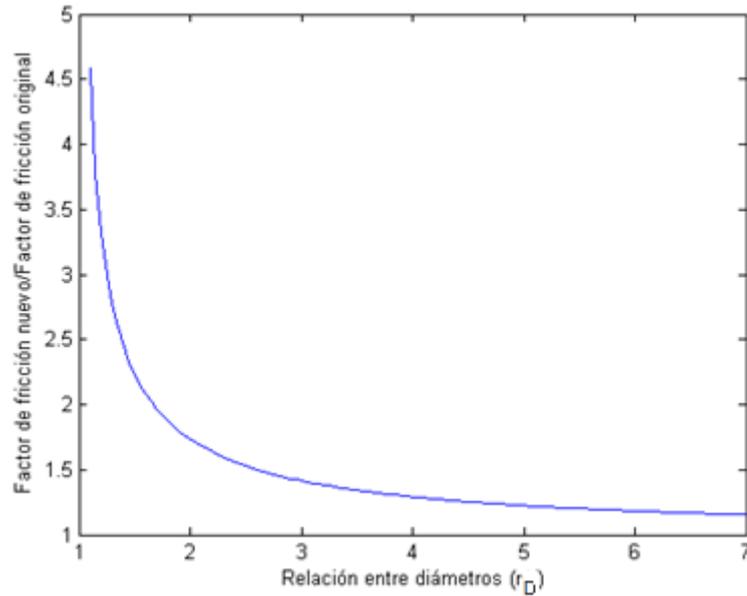
Según (3.57) también es necesario el conocimiento de los valores de la viscosidad y de la densidad del agua para cada caso. Como se quieren comparar ambas configuraciones para las mismas condiciones de temperatura y presión, se considerarán el mismo valor de estos parámetros para la configuración original que la nueva. Se han tomado la densidad como  $1000 \text{ m}^3/\text{kg}$  y la viscosidad la correspondiente a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  según [14].

Los valores de los parámetros característicos usado para caracterizar el régimen de los flujos de agua en cada una de las configuraciones son los siguientes.

Parámetros	Valor característico
Diámetro configuración original	10 mm
Rugosidad superficial del cobre	0.0015 mm
Rugosidad superficial de las silicona	0.0015 mm
Viscosidad del agua	$466 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
Caudal que circula por el tubo	15 l/h
Velocidad circulación agua	0.055 m/s

**Tabla 13.** Parámetros usados para calcular el número de Reynolds.

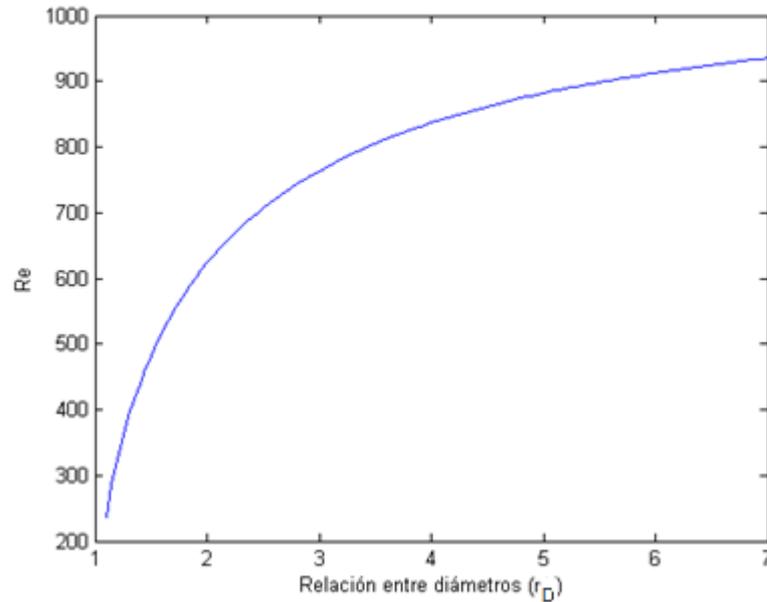
Una vez establecidos los valores descritos en la Tabla 13 es posible proceder a cálculo del segundo factor que influye en la variación de las pérdidas de carga entre la configuración inicial y la nueva (factor de fricción). Éste, al igual que el caso anterior, ha sido calculado para varios valores de la relación geométrica  $r_D$  que define la nueva configuración. Para ello se ha usado la aplicación matemática Matlab. El resultado de esta operación se muestra en la Figura 62.



**Figura 62.** Evolución de la relación entre factores de fricción de las distintas configuraciones con  $r_D$ .

Resulta sorprendente que la evolución mostrada en la Figura 62 sea similar a la evolución de la relación entre diámetros hidráulicos expuesta en la Figura 61, a pesar de que en principio el factor de fricción depende de más factores que la geometría de las configuraciones. Existen varias razones para ello.

En primer lugar al escogerse la misma rugosidad absoluta para las dos configuraciones, el uso de una superficie distinta (silicona) no influye en la variación del factor. En segundo lugar y más importante, según los cálculos realizados tomando como referencia los valores expuestos en la Tabla 13 el valor del número de Reynolds en la configuración original es 1054, un valor bajo. En el caso de la nueva configuración este número es menor en todos los casos como se muestra en Figura 63.



**Figura 63.** Evolución del número de Reynolds en la nueva configuración con  $r_D$ .

Observando el Ábaco de Moody mostrado en la Figura 59 para este rango de valores el factor de fricción no depende de la rugosidad relativa de la superficie de la tubería y se puede expresar el valor de factor de fricción de la siguiente forma.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.76)$$

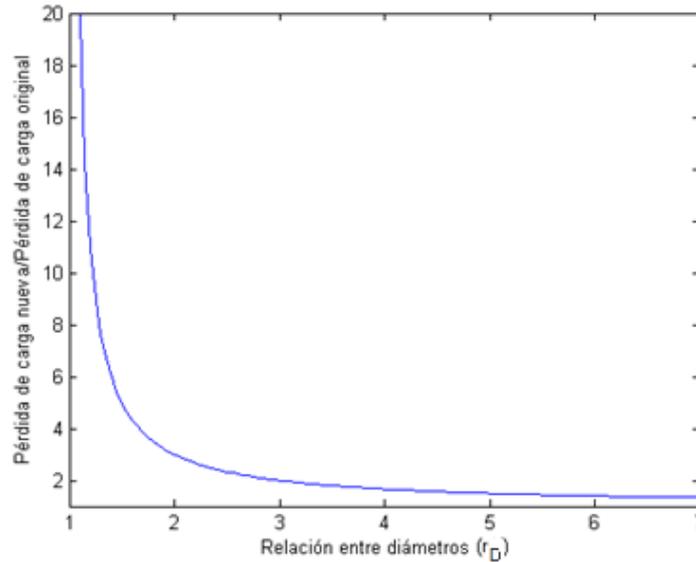
Teniendo en cuenta la expresión del número de Reynolds (3.57) y que se han considerado el mismo valor de la viscosidad, densidad del agua y velocidad de circulación tanto en la configuración original como en la nueva la relación la relación entre factor de fricción de ambas configuraciones sería.

$$\left(\frac{f_n}{f_o}\right) = \left(\frac{D_{ho}}{D_{hn}}\right) \quad (3.77)$$

Esta expresión únicamente es válida en rangos de valor del número de Reynolds por debajo de 2000 y bajo las consideraciones nombradas anteriormente. Este comportamiento queda perfectamente aproximado por la correlación usada (3.56) a la vista de la evolución mostrada en Figura 62.

- Combinación de factores. Resultado final

El producto de los dos factores nos da la comparación entre las pérdidas de carga entre las dos configuraciones en función de la relación  $r_D$ , mostrándose en la Figura 64.



**Figura 64.** Comparación de las pérdidas de carga debido a las diferentes configuraciones con  $r_D$ .

La evolución mostrada en la Figura 64 es la siguiente: para el caso extremo en que  $r_D$  se acerca a 1 las pérdidas de carga tiende a infinito. Esto quiere decir que el diámetro del tubo interior es igual al de la tubería de cobre no habiendo espacio para la circulación de agua, por lo que el resultado es totalmente coherente. A medida que  $r_D$  aumenta y, por lo tanto, el diámetro del tubo interior disminuye respecto al de la tubería de cobre, las pérdidas de carga se van acercando a la de la configuración original tendiendo a la misma en el caso de que  $r_D$  fuera infinito.

Si se escoge como  $r_D$  característico el obtenido tras el estudio geométrico del problema, es decir,  $r_D=3$ . Las pérdidas de carga en la nueva configuración se doblarían con respecto a las pérdidas de carga que sucederían en la configuración original.

#### 4.6.3 Notas finales

Puede pensarse que el resultado obtenido para el caso anterior es algo excesivo. Esto se convierte en especialmente preocupante para el caso de la aplicación de la solución propuesta

en sistemas termosifón. Para este caso, las pérdidas de carga son cruciales para un correcto funcionamiento del sistema.

Sin embargo, si se piensa exclusivamente en la aplicación de la solución propuesta para este tipo de sistema es conveniente mencionar los siguientes puntos:

- 1) El uso de sistema directo conllevaría a que el fluido que pase por el captador sea agua en lugar de la mezcla agua más anticongelante. Esta mezcla posee un coeficiente de capacidad térmica menor que el agua pura. Por lo tanto se podría almacenar la misma cantidad de energía procedente de la radiación con un menor caudal al usar agua en lugar de la mezcla. Esto provoca una reducción de las pérdidas de carga debido a la menor velocidad de circulación del fluido por los tubos de captador.
- 2) La pérdida de carga asociada al circuito hidráulico del sistema directo sería mucho menor que al indirecto original. La razón de esto es la desaparición en la nueva configuración de la pérdida de carga asociada al intercambiador intermedio.

En los siguientes párrafos se hará una estimación de cada uno de los factores mencionados anteriormente.

#### - **Cambio de la capacidad térmica del fluido**

En primer lugar se establecerá la igualdad de capacidad térmica tanto en la configuración del sistema con agua como en la de la mezcla de agua más anticongelante. Es decir, que sea posible transportar la misma cantidad de energía en ambos casos.

$$\dot{m}_A c_{pA} = \dot{m}_M c_{pM} \quad (3.78) \rightarrow \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_M} = \frac{c_{pM}}{c_{pA}} \quad (3.79)$$

Con

$\dot{m}_A \left( \frac{kg}{s} \right) \rightarrow$  Caudal másico de fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$\dot{m}_M \left( \frac{kg}{s} \right) \rightarrow$  Caudal másico de fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$c_{pA} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$  → Capacidad calorífica del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua. Se considerará del orden de 4.18 kJ/kg (capacidad calorífica del agua).

$c_{pM} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$  → Capacidad calorífica del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante. Se considerará un valor típico para estas disoluciones de 3.5 kJ/kg.

Considerando la definición de caudal másico se puede encontrar una relación entre la velocidad de circulación del fluido entre ambas configuraciones. Se harán las siguientes consideraciones.

A pesar de no ser exactamente las mismas sustancias, las densidades del agua pura y la mezcla con el tipo de anticongelante usado normalmente son muy parecidas. Por lo tanto se considerarán iguales. Además de esto, se recordará que se definió el área de las distintas configuraciones como iguales (3.52). Con esto se obtiene

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_M} = \frac{\rho_A v_A A_A}{\rho_M v_M A_M} = \frac{v_A}{v_M} \quad (3.80)$$

Siendo

$\rho_A \left( \frac{kg}{m^3} \right)$  → Densidad del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$\rho_M \left( \frac{kg}{m^3} \right)$  → Densidad del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$v_A \left( \frac{m}{s} \right)$  → Velocidad del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$v_M \left( \frac{m}{s} \right)$  → Velocidad del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

$A_A \left( m^2 \right)$  → Área de paso del fluido en la configuración en la que circula únicamente agua.

$A_M \left( m^2 \right)$  → Área de paso del fluido en la configuración en la que circula agua más anticongelante.

Teniendo en cuenta la expresión (3.79) se llega.

$$\frac{v_A}{v_M} = \frac{c_{pM}}{c_{pA}} = \frac{3.5}{4.1} \quad (3.81)$$

En este caso no se cumple la consideración de igualdad de velocidad considerada en la expresión (3.66). Por lo tanto, a la hora de comparar las pérdidas de cargas de una configuración frente a otra no serviría la expresión (3.70) sino que habría que añadirle el siguiente factor procedente de la expresión (3.67).

$$\left(\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}}\right)_A = \left(\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}}\right)_{original} * \left(\frac{v_A}{v_M}\right)^2 \quad (3.82)$$

Con

$\left(\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}}\right)_A$  → Relación entre la pérdida de carga en la nueva configuración y la original considerando el uso de sistema directo.

$\left(\frac{\Delta p_{rozn}}{\Delta p_{rozo}}\right)_{original}$  → Relación entre la pérdida de carga en la nueva configuración y la original mostrada en la expresión (3.70).

Aplicando el nuevo factor cuyo valor se expone en la ecuación (3.82) se puede concluir lo siguiente: Para el caso en que la relación geométrica sea  $r_D=3$ , la relación entre la pérdidas de la nueva configuración pasaría de ser el doble a tener un valor de **1.456 con la nueva consideración**.

#### - Pérdida de carga en el intercambiador

Se calcularan las pérdidas de carga para un intercambiador de serpentín situado en un acumulador solar tipo. Las características elegidas para la definición del mismo se han extraído de la consulta de varios catálogos [12] [13] y se exponen en la Tabla 14.

Característica	Valor característico
Diámetro serpentín	20 mm
Material realizado	Acero
Rugosidad superficial del acero	0.0048 mm [5]
Caudal que circula por el serpentín	150 l/h
Temperatura del fluido	60 °C
Viscosidad del fluido	0.055 m/s
Área de intercambio	1m <sup>2</sup>

**Tabla 14:** Parámetros usados para caracterizar el intercambiador.

Para calcular la pérdida de carga por el serpentín se aplica la expresión (3.60).

$$\Delta p_{roz}(Pa) = f * \left( \frac{\rho L}{2D_h} \right) v^2$$

Para hallar la longitud del serpentín se aplica la definición del área de intercambio.

$$A_i = \pi D_s L_s \quad (3.83) \rightarrow L_s = \frac{A_i}{\pi D_s} \quad (3.84)$$

Con

$A_i$  (m<sup>2</sup>) → Área de intercambio.

$D_s$  (m) → Diámetro del serpentín.

$L_s$  (m) → Longitud del serpentín.

Llegando a las siguientes consideraciones.

Característica	Valor
Factor de fricción	0.0368
Densidad	1000 kg/m <sup>3</sup>
Longitud del serpentín	15m
Velocidad de circulación por el serpentín	0.1326 m/s
Diámetro hidráulico	10 mm

**Tabla 15.** Parámetros usados para caracterizar el intercambiador.

Aplicando los valores de la Tabla 15 en la expresión (3.60) se concluye que la pérdida de carga tipo sería del orden de **800Pa ó 0.08 mca.**

Esta pérdida de carga se ahorraría a la hora de usar un sistema directo en lugar del sistema indirecto.

#### **4.6.4 Consecuencias del cálculo de la nueva pérdida de carga**

El comportamiento de las pérdidas de carga estudiado en Figura 64 muestra la conveniencia de la elección de una configuración con una relación entre diámetros ( $r_D$ ) lo mayor posible para que las pérdidas de carga al paso del agua por el captador no se disparen. A partir de un  $r_D=3$  las pérdidas de carga por la nueva configuración duplican a las de la configuración original.

Sin embargo, en el estudio geométrico del problema se demostró que para la funcionalidad de la solución propuesta en la congelación del agua que se produce en las heladas el valor de  $r_D$  debería ser cuanto mayor sea posible. A medida que el parámetro  $r_D$  fuera mayor, la presión alcanzada en el interior de la tubería de cobre sería menor.

Por todo ello, la elección realizada de una solución de compromiso con un  $r_D=3$  resulta totalmente adecuada. Para este caso, según el estudio mostrado en la Figura 64 las pérdidas de carga del agua al pasar por el captador al que le incluya un tubo flexible en su interior son el doble de las que tendría si circula por un captador convencional.

La variación de pérdidas puede ser un tanto elevada, sobre el todo para el uso de la solución propuesta en sistemas de termosifón. Sin embargo, se ha demostrado que para el uso

del sistema directo las pérdidas de carga se reducen debido dos factores clave. El primero es la necesidad de un menor caudal para el transporte de la misma energía. El segundo es la desaparición de la pérdida de carga asociada al intercambiador intermedio.