

Las necesidades de agua potable por parte del pueblo Afar, pueblo nómada habitante en la región de Danakil, hacen que, debido a las condiciones ambiente que dicha región brinda, una alta temperatura y una humedad relativamente alta, sea interesante el estudio de distintas tecnologías que consigan condensar la humedad presente en el ambiente obteniendo de este modo agua. Aquí se estudian las diversas alternativas planteadas y se discuten los resultados obtenidos para cada una de ellas.

## **Introducción**

El agua se presenta como una necesidad básica para la vida de todo ser humano, pero muy en especial para aquellos que habitan en zonas castigadas por grandes periodos de sequías, tal es el caso del pueblo Afar, pueblo nómada que vive en la depresión de Danakil, una de las zonas más calurosas y con menos lluvias de todo el planeta. Esta situación límite, pone en peligro incluso, la propia supervivencia de estas personas.

Ante este contexto y las características que presenta esta región; una gran temperatura, una gran radiación y una humedad relativamente alta, convierte la condensación de esta humedad como una alternativa a estudiar en cuanto a obtención de agua se refiere.

El volumen diario mínimo de agua que se va a obtener se determina como el requerido por una población de 500 personas. Siendo las necesidades mínimas de agua diarias en condiciones críticas de aproximadamente unos 20 litros por persona y día, por lo que la cantidad requerida diariamente asciende a 10000 litros.

La condensación de la humedad ambiente requiere de un foco frío, creado artificialmente, en el que se hace descender la temperatura del aire en contacto, por debajo de la temperatura del punto de rocío, a partir del cual se produce la condensación.

## **Fuente primaria de energía.**

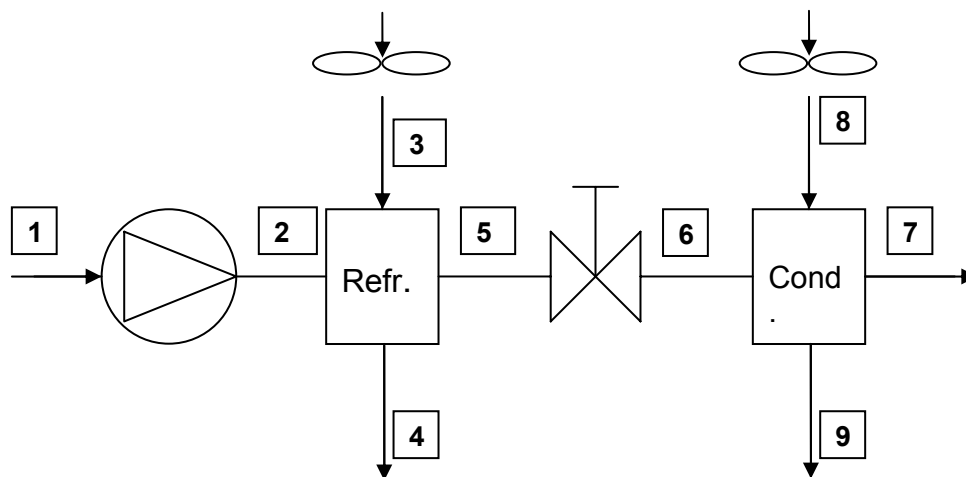
Una de las características principales de este proyecto es la de dotar de autonomía energética a la instalación propuesta, ya que en la situación geográfica que se encuentra, no se tiene un fácil acceso a la energía eléctrica.

Debido a dicha necesidad, las fuentes de energía que van a ser utilizadas, son la energía fotovoltaica y la energía solar térmica.

## **Sistemas estudiados**

Los sistemas propuestos que han sido objeto de estudio en el presente proyecto son:

**Compresión, refrigeración, seguidas de una expansión en válvula isentálpica.** En dicho sistema el aire ambiente, punto 1, sufre una compresión, modelada mediante un proceso politrópico con exponente 1.3, seguida de una refrigeración entre el punto 2 el cual posee una alta temperatura y el punto 5 que se consigue bajar a una temperatura cercana a la ambiente, para ello se utiliza aire tomado de la atmósfera. Seguidamente se produce expansión isentálpica, que hace descender considerablemente la temperatura del punto 6 por debajo de la ambiente. Este caudal de aire a baja temperatura es utilizado como foco frío del sistema, condensando la humedad del aire que discurre entre los puntos 8 y 9.



A la hora de diseñar el punto de funcionamiento de la instalación, se tienen en cuenta para minimizar la potencia requerida por dicha instalación en el mes más desfavorable a la hora de obtener el caudal de agua mínimo requerido, las siguientes variables; la presión de trabajo de la instalación (punto 2), la temperatura de entrada a la válvula (punto 5), la temperatura de salida de la instalación (punto 7) y la temperatura de salida tanto del punto 4 como del punto 9.

Las parámetros de funcionamiento una vez optimizadas los variables anteriormente expuestas, quedan:

- Mes más crítico: Junio
- Presión de funcionamiento: 267,5 kPa
- Temperatura de inter-enfriamiento ( $T_5$ ): 50 °C
- Temperatura de salida del fluido de trabajo ( $T_7$ ):  $T_{\text{ambiente}} + 10$  °C
- Temperatura de salida del segundo intercambiador ( $T_9$ ):  $T_{\text{rocio}} = -10$  °C
- La potencia requerida por la instalación: 1,5 MW
- Gasto másico principal: 12,46 kg/s
- Caudal mínimo de agua: 10001 L/día
- Coste total de la instalación: 28,5 M€

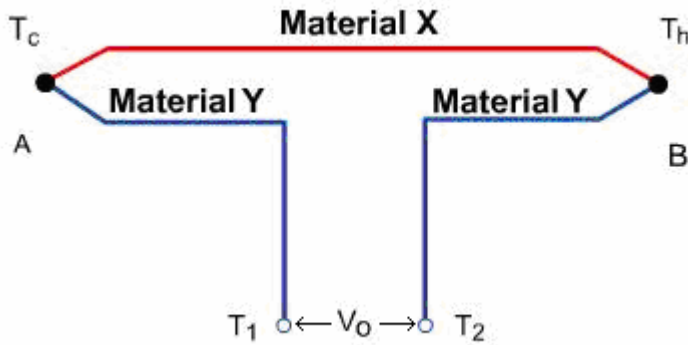
Las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos con los que se trabaja, son las siguientes ecuaciones:

Intercambiadores: Primer principio de la termodinámica, en sistemas abiertos  
 Compresor: Para modelarlo se utiliza las ecuaciones:

$Pv=Rt$	Ecuación de gases ideales
$Pv^n=k$	Proceso poliprónico
$W = \frac{n}{1-n} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$	Trabajo técnico

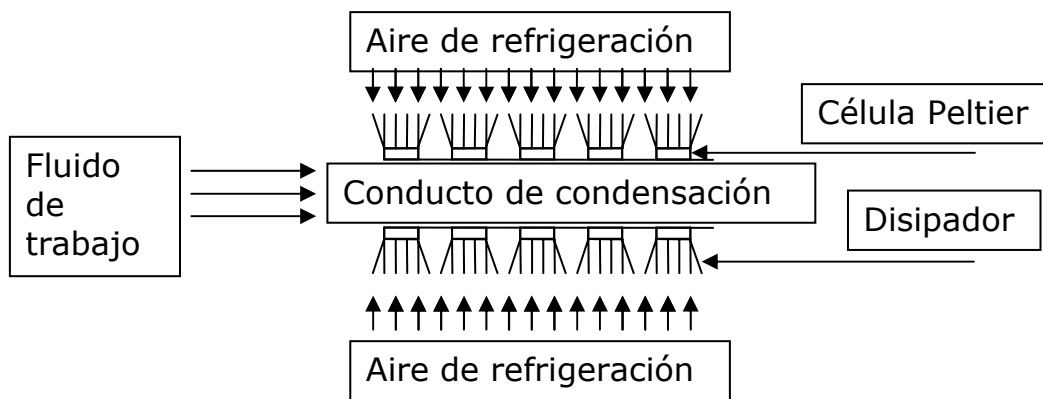
Válvula: Al considerar la válvula isentálpica, se utiliza conservación de la entalpía  
 $h=cte$  Entalpía

**Bombeo de calor mediante células Peltier:** La obtención de la pared fría que será utilizada para decantar la humedad ambiente, se realiza mediante termoelementos o células Peltier. Su principio de funcionamiento es el siguiente; haciendo circular una corriente continua por dos semiconductores unidos entre si, aparece en las uniones entre ambos, una diferencia de temperatura que es la que propicia el bombeo de calor de la unión a más temperatura hacia la unión a menor temperatura, como puede observarse en la figura:

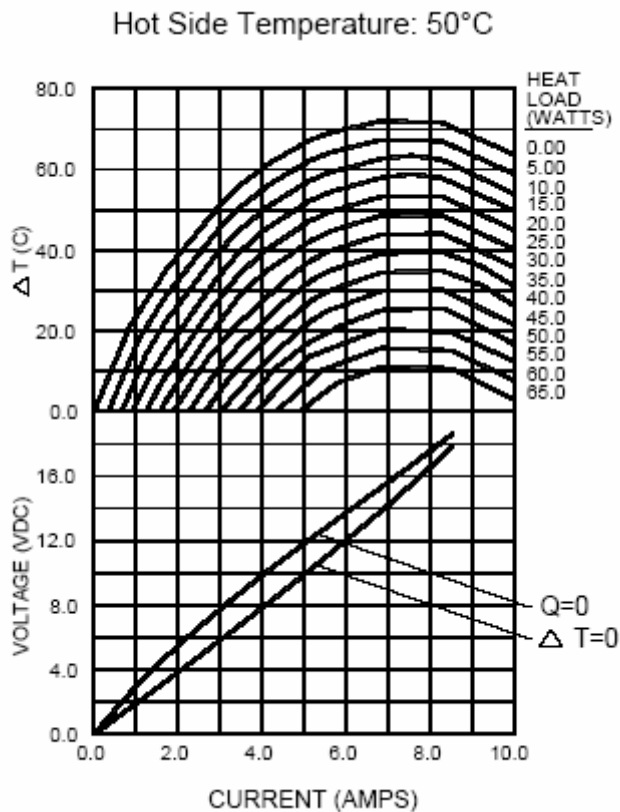


Utilizando este principio, se obtiene el foco frío. El calor necesario para la condensación de la cantidad de agua requerida es calculado como la suma de las potencias que se deben extraer de un flujo de aire a la temperatura y humedad ambiente para descender su temperatura hasta la del punto de rocío correspondiente, más la potencia requerida para la condensación del volumen de agua anteriormente calculado.

El esquema de la instalación es el siguiente:



Para determinar el punto de funcionamiento de cada termo-elemento, se parte de la característica de dicho termo-elemento que se encuentra en sus especificaciones técnicas, expuestas a continuación.



Una vez es determinada la temperatura del lado frío y conociendo la temperatura ambiente, se establece una diferencia de temperaturas entre sus extremos, a la cual corresponde una intensidad y una potencia calorífica introducida por la energía eléctrica utilizada. Sumando ambas potencias, la extraída del lado frío y la introducida por la E eléctrica, se obtiene la potencia que se requiere disipar desde el lado caliente, con lo cual se determina el disipador necesario. Para obtener unos resultados más controlados, se ha obtenido la característica rendimiento en función de la intensidad y de la diferencia de temperaturas, quedando el punto de funcionamiento para las condiciones más desfavorables así:

$$I = 5,7 \text{ A}$$

$$V = 11,6 \text{ V}$$

$$\eta = 35\%$$

$$\Delta T = 35^\circ\text{C}$$

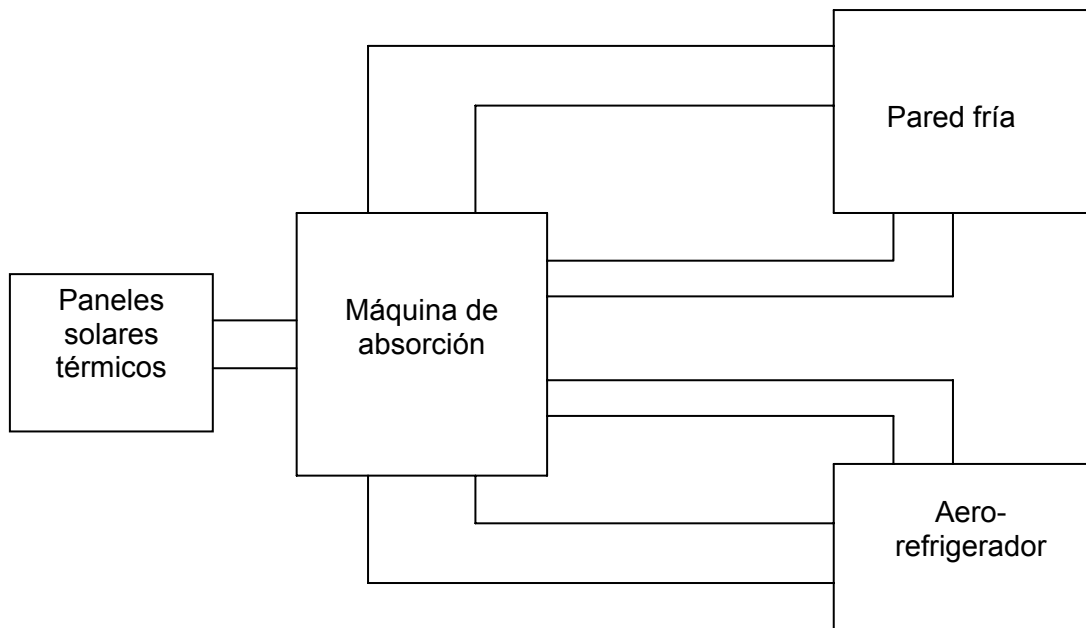
En el lado caliente de la célula es necesaria la colocación de un disipador, y una corriente forzada de aire, por lo que se necesitará la colocación de una serie de ventiladores. La potencia requerida por dichos ventiladores es calculada según:  $\frac{1}{2} v^3 \rho A$ , introduciendo un rendimiento del 50%, se tiene que la potencia eléctrica requerida es de 21,5 KW. La potencia eléctrica total requerida es de 1,3MW. El coste total de la instalación asciende a 26,7 M€

**Ciclo de absorción:** Este sistema basa la obtención de un foco frío en el ciclo frigorífico de absorción. El ciclo de absorción es bastante similar a un ciclo frigorífico por compresión convencional, con la única diferencia que el compresor es sustituido por un conjunto de intercambiadores y una bomba y el fluido de trabajo en la zona que sustituye al compresor es una sal disuelta en agua. La característica más reseñable de este ciclo es la forma en la que se aporta la energía, mientras que en un ciclo de compresión convencional, toda la energía que se ha de aportar, se aporta en forma de energía eléctrica, es este ciclo se aporta la mayor parte del

calor en forma de energía térmica. Esto constituye una gran ventaja por el emplazamiento que ha sido estudiado, ya que en lugar de utilizar una gran cantidad de paneles fotovoltaicos, gran parte de ellos eliminados y en su lugar se colocan colectores solares de vacío, con una mayor eficiencia y con muchas menos pérdidas.

El cálculo de la potencia requerida para la obtención de la cantidad de agua requerida, se ha realizado del mismo modo que en el sistema mediante células Peltier.

El esquema de la instalación es el siguiente:



El ciclo de absorción estudiado es un ciclo de simple efecto de agua-bromuro de litio, el cual en cualquier libro de termodinámica se puede observar su resolución y en el que se parte de los siguientes datos: Temperatura de condensación  $T_K$ , temperatura de evaporación  $T_E$ , la capacidad de refrigeración  $\dot{Q}_{evap}$ , la temperatura de absorción  $T_a$ , la temperatura del generador  $T_g$  y la eficiencia del regenerador  $\eta_{reg}$ . Las temperaturas han sido seleccionadas para cumplir los requisitos de volumen de agua, sin hacer excesivo el tamaño de la máquina requerida y la potencia demandada por esta. La capacidad de refrigeración es el punto inicial, ya que este calor extraído del ambiente es el que consigue que se condense la humedad ambiente, y es calculado según se ha descrito anteriormente.

La potencia eléctrica demandada es igual a la potencia requerida por la bomba del ciclo de absorción, más la que necesita el aerorefrigerador. La primera se calcula según el ciclo y la segunda se obtiene mediante el catálogo del aerorefrigerador seleccionado. La potencia eléctrica total, en el caso más desfavorable es de: 78.8kW. Se destaca este dato, ya que las necesidades eléctricas de esta instalación son del orden de un 6% de las necesidades de las otras dos instalaciones. Los paneles fotovoltaicos necesarios son 1617.

En cuanto a la potencia térmica demandada, esta asciende a 1,2 MW. Se obtienen mediante colectores solares de vacío, y el número de colectores que son necesarios es de 1380 paneles. El coste total de la instalación asciende a 5,1 M€.

## Conclusiones

Las conclusiones están centradas en torno a cuatro variables: El coste de la instalación, el volumen, el mantenimiento estático y el mantenimiento dinámico. En la siguiente tabla resumen se detalla el comportamiento de cada uno de los sistemas frente a dichas variables:

<b>Criterio</b>	<b>Compresión Expansión</b>	<b>Peltier</b>	<b>Absorción</b>
<b>Costes</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Volumen de la instalación</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Mantenimiento estático</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
<b>Mantenimiento dinámico</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

El criterio que va a ser comentado en primer lugar es el relativo al coste, al ser este el parámetro más objetivo de entre todos ellos. Los costes de cada uno de los sistemas, en millones de euros, son los siguientes: Para el caso del sistema que utiliza un ciclo de absorción, es de 5.1; el sistema basado en células Peltier tiene un coste total de 26.7 y por último el sistema basado en el ciclo de compresión cuesta 31.4. Se observa claramente que el sistema que tiene un coste menor es el que utiliza un ciclo de absorción, esto es debido a la forma de aplicar energía en este ciclo, que se realiza en forma de energía térmica. Al basar la obtención de energía en la energía solar, el mayor rendimiento de los colectores solares térmicos, frente a los paneles solares fotovoltaicos, hace que el número de los primeros necesarios para aportar la misma cantidad de energía, sea grandemente menor, con lo cual el coste total de la instalación se reduce de forma drástica. En cuanto a las diferencias de coste de la instalación de compresión con respecto a la de Peltier, la diferencia también se explica a través de la cantidad de paneles solares necesarios en la instalación de compresión. El número de paneles es sensiblemente mayor por lo que el coste también es mayor.

En cuanto al volumen ocupado por la instalación, podría concretarse un poco más, diciendo que realmente es la superficie utilizada. Los elementos que realmente ocupan espacio en estas instalaciones son los paneles solares, por lo cual es muy simple la justificación de la clasificación entre los tres sistemas, al ser la misma que en el criterio de costes, por la misma razón; la cantidad de paneles necesarios.

El mantenimiento estático se refiere a la necesidad de limpieza de los paneles y demás órganos no móviles, para los cuales son necesarios la no presencia de polvo en la superficie de los elementos utilizados. En este caso, al igual que en los dos anteriores el ciclo de absorción es el sistema que se encuentra en primera posición, debido a la menor presencia de paneles solares. En cuanto al sistema Peltier, a la necesidad de limpiar los paneles se une la necesidad de limpiar las células y los disipadores, al deber estar la superficie de estas limpias, para que la transferencia de calor entre el ambiente y la célula se realice con la mayor eficiencia posible, por lo que es el sistema más desventajoso de los tres. El sistema de compresión es el sistema intermedio debido a que únicamente hay que limpiar los paneles, que en conjunto suman un número de elementos menor que la suma de las células Peltier y los paneles utilizados en Peltier.

En cuanto al mantenimiento dinámico, este se refiere a la sustitución, reparación y mantenimiento de aquellos elementos que tengan movimiento relativo entre sí, como pueden ser elementos giratorios. En este sentido hay un sistema que se

destaca en relación con los otros 2, y es el sistema Peltier, ya que no posee ningún elemento que tenga movimiento relativo con respecto a otro, por lo que es el mejor colocado en esta clasificación. En cuanto a los otros dos sistemas, el mantenimiento dinámico es similar en ambos por lo que se los ha calificado de la misma manera.