



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

Apellidos y nombre: Velázquez Martí, Borja (borvemar@dma.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Universitat Politècnica de València

Índice general

| | |
|--|----|
| 1. Resumen de las ideas clave | 2 |
| 2. Objetivos | 2 |
| 3. Introducción | 3 |
| 4. Elementos del sistema | 3 |
| 5. Balance de masa y energía el sistema de refrigeración por absorción | 4 |
| 6. Análisis del sistema de refrigeración por absorción | 9 |
| 7. Cierre | 9 |
| 8. Ejercicio propuesto | 10 |
| 9. Bibliografía | 10 |

1 Resumen de las ideas clave

La refrigeración por absorción es un procedimiento por el cual se extrae calor de un recinto, denominado foco frío, haciendo pasar un refrigerante a menor temperatura a baja presión por un evaporador, y posteriormente el refrigerante se mezcla con un fluido absorbente que permite aumentar su presión en fase líquida mediante una bomba. A elevada presión se le proporciona calor a la mezcla en un generador, provocando una desabsorción del refrigerante liberándose en fase gaseosa a elevada temperatura, para hacerlo pasar posteriormente por un condensador cediendo calor a otro recinto llamado foco caliente. Tras el condensador el refrigerante en fase líquida se despresuriza a través de una válvula de expansión, comenzando de nuevo el ciclo en el evaporador. En este artículo se analiza el funcionamiento del sistema, muestra el cálculo de las variables termodinámicas en cada uno de los puntos de la instalación y se determina su eficiencia.

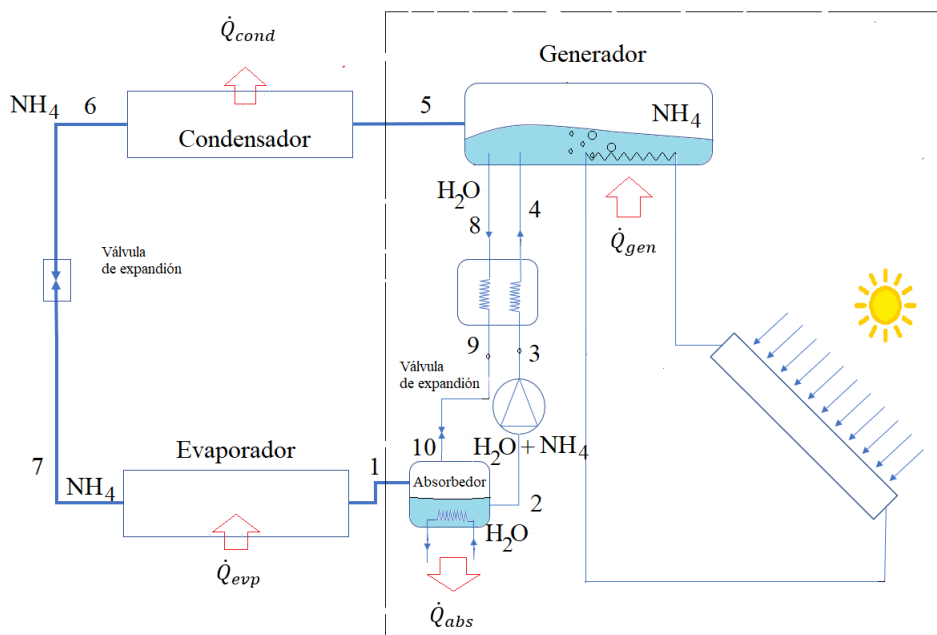


Figura 1: Esquema de un sistema de refrigeración por absorción de amoníaco como refrigerante y agua como absorbente

2 Objetivos

Tras la lectura detenida del presente artículo el alumno será capaz de:

1. Describir el funcionamiento de un sistema de refrigeración por absorción.
2. Determinar las propiedades termodinámicas del fluido refrigerante en cada uno de los puntos de la instalación.
3. Calcular la eficiencia de la instalación de refrigeración por absorción.

3 Introducció

La refrigeració per absorció és un sistema alternatiu a la refrigeració per compressió molt interessant quan en lloc de utilitzar com a font principal d'energia l'electricitat o la combustió en els compressors, es desitja utilitzar una font de calor. Aquesta font de calor pot ser residual d'un procés o provenir d'energies renovables, tals com la solar tèrmica. Per tant, és un sistema molt propici per millorar l'eficiència energètica.

En essència substitueix la feina dels compressors d'un Sistema de Refrigeració per Compressió (SRC) per un sistema d'absorció i desabsorció del refrigerant, que al barrejar-se amb l'absorbent, en fase líquida pot augmentar-se la seva pressió amb una simple bomba. El consum elèctric de la bomba és significativament menor al dels compressors d'un SRC, i l'augment de la temperatura s'aconsegueix amb una font de calor.

4 Elements del sistema

- a) *Evaporador*: Dispositiu format per un haz de tubs per el qual circula un refrigerant a baixa temperatura, que absorbeix calor del foc fred, canviant d'estat de líquid a vapor.
- b) *Absorbent*: Dispositiu col·locat després de l'evaporador en el qual el refrigerant en fase gasosa és absorbit per un fluid absorbent, el qual el reté en fase líquida. Per afavorir l'absorció es realitza un refredament disminuint la temperatura.
- c) *Bomba*: Eleua la pressió de la mescla refrigerant-absorbent a la pressió de treball del condensador.
- d) *Generador*: Dispositiu per el qual la mescla refrigerant-absorbent rep la font principal de calor, amb la qual augmenta la seva temperatura i es produeix la desabsorció, separant-se el refrigerant que es libera en forma de vapor i l'absorbent que es manté en fase líquida.
- f) *Rectificador*: Dispositiu col·locat després del generador que millora la separació del refrigerant i l'absorbent el qual el redirigeix cap a l'absorbent.
- g) *Intercambiador intermediari o regenerador*: Abans d'introduir la mescla refrigerant-absorbent en el generador es produeix un precalentament mitjançant un intercanviador on s'utilitza el calor residual reté en l'absorbent per transferir-lo a la mescla.
- h) *Condensador*: Sistema de tubs per el qual circula el refrigerant a una temperatura més alta que el mitjà, per el qual libera calor del sistema de tal manera que passa d'estat de vapor a estat líquid a alta pressió.
- i) *Vàlvula d'expansió*: Dispositiu que despressuritza el refrigerant mantenint la seva entalpia fins a la pressió de treball de l'evaporador.

Es pot dir que tot el sistema està compost per dos cicles: el cicle de l'absorbent i el de refrigerant. El cicle de l'absorbent té lloc entre l'absorbent (on es barreja amb el refrigerant) i el generador (on la dissolució es dissocia del refrigerant). El cicle de refrigerant va des de l'evaporador, passa per l'absorbent (barrejant-se amb l'absorbent), es pressuritza la mescla amb la bomba, es dirigeix al generador (on es dissocia amb l'absorbent), travessa el condensador i passant per la vàlvula d'expansió torna a l'evaporador (Figura 1).

El absorbent i l'evaporador constitueixen la zona de baixa pressió, mentre que el generador i el condensador constitueixen la zona de alta pressió.

Els sistemes més comuns de refrigeració per absorció utilitzen amoníac com a refrigerant i aigua com a absorbent, o aigua com a refrigerant i bromur de litium com a absorbent.

5 Balance de masa y energía el sistema de refrigeración por absorción

El análisis de una instalación implica el cálculo de los valores de entalpía para cada uno de los puntos del ciclo mostrados en la Figura 1, así como flujos de la disolución y refrigerante, concentraciones a la salida del absorbedor y generador, y las potencias de trabajo de cada componente.

A continuación se va a realizar un balance energía para cada uno de los componentes.

Evaporador

El calor absorbido en el evaporador (\dot{Q}_{evp}) será equivalente a la carga térmica que se desea disipar del foco frío. Si se consideran despreciables las variaciones de energía cinética y potencial Se calcula por la ecuación 1:

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_1 - h_7) \quad (1)$$

Donde \dot{m}_{ref} es el flujo de refrigerante que circula por el evaporador, y h_7 y h_1 su entalpía de entrada y salida respectivamente. Entonces se obtiene la ecuación 2.

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_{evp}}{h_1 - h_7} \quad (2)$$

Absorbedor

El balance de este dispositivo resulta más complicado. Si h_2 es la entalpía del flujo de salida del absorbedor, h_{10} es la entalpía del flujo de retorno al absorbedor, \dot{m}_d el flujo de la disolución de salida al absorbedor y \dot{Q}_{abs} que calor disipado en el absorbedor, se tiene la ecuación 3.

$$\dot{m}_{ref} \cdot h_1 + (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot h_{10} = \dot{m}_d \cdot h_2 + \dot{Q}_{abs} \quad (3)$$

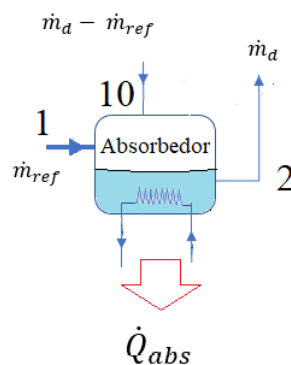


Figura 2: Esquema del absorbedor

Generalmente la entalpía del refrigerante a la entrada del absorbedor es conocida (h_1), lo mismo que el flujo de refrigerante necesario en el evaporador. Para una presión dada, la temperatura de saturación de un disolvente, y por ende la entalpía de saturación, queda modificada de acuerdo a la concentración de soluto en la disolución. Por tanto, para determinar la entalpía de salida de la disolución (h_2) se ha de conocer la concentración de refrigerante en el absorbente, el cual dependerá de la presión y temperatura a la que este dispositivo está trabajando. La relación entre estos parámetros está representada en los [Diagramas de Dühring](#).

Se puede observar que a temperatura más baja mayor absorción. Por eso se suele realizar una refrigeración en el absorbedor.

La entalpía para una concentración dada depende de la temperatura, la cual se puede obtener a partir de los [Diagramas de Merkel](#).

La concentración de refrigerante en la disolución que sale del absorbedor hacia el generador es x_{abs} . La concentración del refrigerante en el retorno del generador al absorbedor es x_{gen} , tal que

$$\dot{m}_{ref} = \dot{m}_d \cdot x_{abs} - (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot x_{gen}$$

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{ref} \cdot \frac{1 - x_{gen}}{x_{abs} - x_{gen}}$$

Por tanto, conociendo las concentraciones de refrigerante en los flujos de la disolución a la salida y a la entrada del absorbedor, a partir del flujo del refrigerante se puede obtener el flujo másico de la disolución de salida.

Utilizando los diagramas e Dühring y Merkel se obtienen las concentraciones en los flujos de entrada y salida del absorbedor, así como sus entalpías.

Del balance de energía se obtendrá el calor que hay que disipar en el absorbedor (ecuación 4):

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{ref} \cdot h_1 + (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot h_{10} - \dot{m}_d \cdot h_2 \quad (4)$$

Generador

El balance de energía en el generador viene dado por la ecuación 5:

$$\dot{m}_d \cdot h_4 + \dot{Q}_{gen} = \dot{m}_{ref} \cdot h_5 + (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot h_8 \quad (5)$$

Donde el h_4 y h_8 son la entalpía de la disolución a la entrada y salida del generador respectivamente; h_5 es la entalpía del refrigerante a la salida del generador; \dot{Q}_{gen} es la energía calorífica que se precisa aportar en el generador para la disociación refrigerante absorbente.

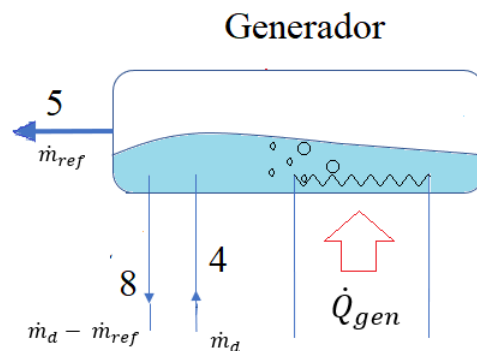


Figura 3: Esquema del generador

Regenerador

El balance de energía en el regenerador vendrá dado por la ecuación 6:

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_d \cdot (h_4 - h_3) = (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot h_8 - h_9 \quad (6)$$

Donde el h_4 y h_8 son las entalpías de la disolución a la entrada y salida del generador respectivamente; h_3 es la entalpía de la disolución tras haber aumentado la presión a través de la bomba. h_9 es la entalpía de la disolución a la entrada de la válvula de expansión para dirigirse al absorbedor.

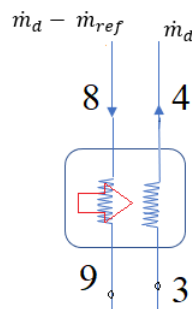


Figura 4: Esquema del regenerador

Condensador

El balance de energía en el condensador será el definido por la ecuación 7:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_6 - h_5) \quad (7)$$

Donde el h_5 y h_6 son las entalpías del refrigerante a la entrada y salida del condensador respectivamente.

Bomba

La potencia eléctrica requerida en la bomba vendrá dada por

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_d \cdot (h_3 - h_2)$$

Donde el h_2 y h_3 son las entalpías de la disolución a salida del absorbedor y la entrada del regenerador respectivamente.

La eficiencia energética de refrigeración de la máquina o COP vendrá dada por la siguiente expresión:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evp}}{\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_{bomb}}$$

Para ilustrar el cálculo de las entalpías de todos puntos y las potencias de los aportes o disipaciones de energía se expone el ejemplo 1. ¡ÁNIMO QUE ES SENCILLO!

Ejemplo 1

La instalación frigorífica por absorción de la figura utiliza amoníaco como refrigerante y agua como absorbente. Los requerimientos de la instalación son:

Potencia frigorífica $\dot{Q}_A = 50 \text{ kW}$

Temperatura de evaporación -10°C

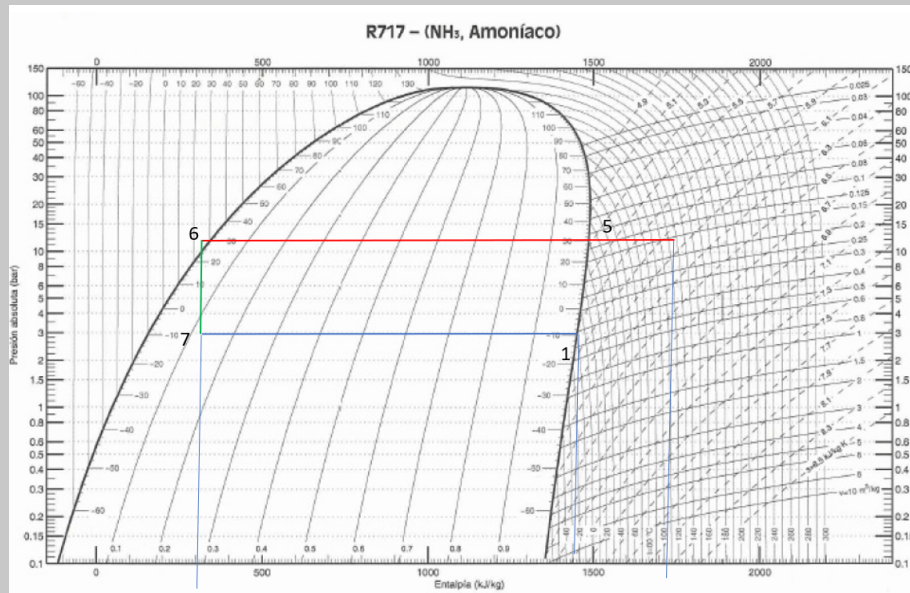
El condensador disipa por agua a 20°C a través de una torre de refrigeración así que la temperatura de condensación 30°C

En el evaporador se produce sobrecalentamiento de 5°C y en el condensador un subenfriamiento también de 5°C

Se desea dimensionar el sistema de absorción, sabiendo que en el regenerador se transfiere una potencia calorífica de 35 kW .

Resolución

De acuerdo al diagrama P-h del amoníaco se obtienen las entalpías de los puntos 1, 6 y 7.



| | P (bar) | T ($^\circ\text{C}$) | h (kJ/kg) |
|---|---------|------------------------|-----------|
| 1 | 1,8 | -5 | 1450 |
| 6 | 12 | 25 | 310 |
| 7 | 1,8 | -10 | 310 |

La temperatura del refrigerante a la entrada del absorbedor son -5°C a una presión de 1,8 bar, es decir 0,18 MPa. Entonces su entalpía es $h_1 = 1450 \text{ kJ/kg}$.

La salida de la disolución del absorbedor la podemos fijar igual que la del condensador en 30°C a la misma presión que el evaporador, dado que se podrá disipar calor con agua a 20°C tanto condensador como absorbedor. En el [diagrama de Dühring](#) amoníaco-agua se puede determinar el porcentaje de la mezcla que se puede conseguir en el absorbedor a esa presión y temperatura es aproximadamente del 45 %. A partir del [diagrama de Merkel](#) se obtiene que la entalpía de la mezcla, que se calcula como

$$h_2 = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (30) = 39,0 \text{ kJ/kg de disolución}$$

La temperatura de trabajo del condensador con NH_4 son 30°C que corresponde a una presión a 12 bares, es decir 1,2 MPa. A esa presión el amoniaco puede entrar en el condensador a 110°C .

En el [diagrama de Dühring](#) se puede observar que a presión de 1,2 MPa y 110°C la concentración de la mezcla amoniaco/agua se reduce al 30 %.

En el [diagrama de Merkel](#) se puede observar que la entalpía en esas condiciones es

$$h_8 = 2,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (110) = 264,0 \text{ kJ/kg de disolución}$$

Los flujos de refrigerante y de disolución necesarios se calculan como

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{Q}_{evp}}{h_1 - h_7} = \frac{50}{1450 - 305} = 0,044 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{ref} \cdot \frac{1 - x_{gen}}{x_{abs} - x_{gen}} = 0,044 \cdot \frac{1 - 0,45}{0,45 - 0,3} = 0,191 \text{ kg/s}$$

Al pasar la disolución por la bomba se aumenta la presión de 0,3 MPa a 1,2 MPa, y a partir del diagrama de Merkel se comprueba que

$$h_3 = 2,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (30) = 66,0 \text{ kJ/kg de disolución}$$

Las entalpías de los puntos 4 y 9 se obtienen a partir del calor transferido en el regenerador:

$$h_4 = h_3 + \frac{\dot{Q}_{int}}{\dot{m}_d} = 66 + \frac{35}{0,191} = 249,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_9 = h_8 - \frac{\dot{Q}_{int}}{(\dot{m}_d - \dot{m}_{ref})} = 264 - \frac{35}{(0,191 - 0,044)} = 26 \text{ kJ/kg}$$

La entalía del punto 10 es la misma que la del 9 porque la válvula de expansión no modifica la entalpía.

| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|------|------|------|-------|------|-----|-----|-------|-------|-------|
| h (kJ/kg) | 1450 | 39,0 | 66,0 | 249,2 | 1750 | 305 | 305 | 264,0 | 26,52 | 26,52 |
| T °C | -10 | 30 | | | 110 | 30 | -10 | 110 | | |

La potencia requerida en la bomba será:

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_d \cdot (h_3 - h_2) = 0,191 \cdot (66 - 39) = 5,2 \text{ kW}$$

La potencia disipada en el condensador será:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_5 - h_6) = 0,044 \cdot (1580 - 305) = 63,1 \text{ kW}$$

La potencia requerida en el generador será: $\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_5 - h_8) + \dot{m}_d \cdot (h_8 - h_4) = 0,044 \cdot (1750 - 264) + 0,191 \cdot (264 - 249,2) = 67,72 \text{ kW}$

La potencia a disipar en el absorbedor será: $\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{ref} \cdot h_1 + (\dot{m}_d - \dot{m}_{ref}) \cdot h_{10} - \dot{m}_d \cdot h_2 = 0,044 \cdot 1450 + (0,191 - 0,045) \cdot 26,52 - 0,191 \cdot 39 = 59,78 \text{ kW}$

La eficiencia de la instalación vendrá dada por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evp}}{\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_{bomb}} = \frac{50}{67,72 + 5,2} = 0,69$$

SI HAS LLEGADO HASTA AQUÍ, ¡ESTUPENDO!

6 Análisis del sistema de refrigeración por absorción

A pesar de que el sistema de refrigeración por absorción (SRA) permite sustituir en gran medida la energía eléctrica utilizada por un sistema de refrigeración por compresión (SRC) con las mismas prestaciones por energía calorífica, presenta algunos inconvenientes que es necesario evaluar.

El SRA es técnicamente más complejo que el SRC. Presenta mayor número de dispositivos, es más voluminoso y es generalmente más caro. Además, requiere un mayor mantenimiento y una regulación más complicada.

Los fluidos más comúnmente empleados como refrigerante y absorbente son: el amoníaco como refrigerante con agua como absorbente ($\text{NH}_4 + \text{H}_2\text{O}$), y el agua como refrigerante con bromuro de litio como absorbente ($\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$).

Este segundo sistema es el más utilizado sin embargo presenta limitación importante. La utilización de agua como refrigerante limita la temperatura del evaporador a 5°C , es decir una temperatura mínima del foco frío de 15°C . De otro modo existe el riesgo de congelación del agua. Esto significa que puede ser utilizado en instalaciones de climatización de recintos pero no en cámaras de congelación.

7 Cierre

Los sistemas de refrigeración por absorción (SRA) suponen una alternativa a los sistemas de refrigeración por compresión (SRC) cuando se dispone de una fuente de calor para el generador que permite reducir el consumo de energía eléctrica. El modelo de cálculo se basa en los diagramas de Dühring y Merkel. En la Figura 5 se muestra el procedimiento partiendo como datos: la temperatura del foco frío y caliente (T_{FF}, T_{FC}), la carga térmica del recinto que se pretende refrigerar (\dot{Q}_{evp}) y el calor transferido en el regenerador (\dot{Q}_{int}).

Los puntos de la instalación están enumerados del 1 al 10 en el esquema.

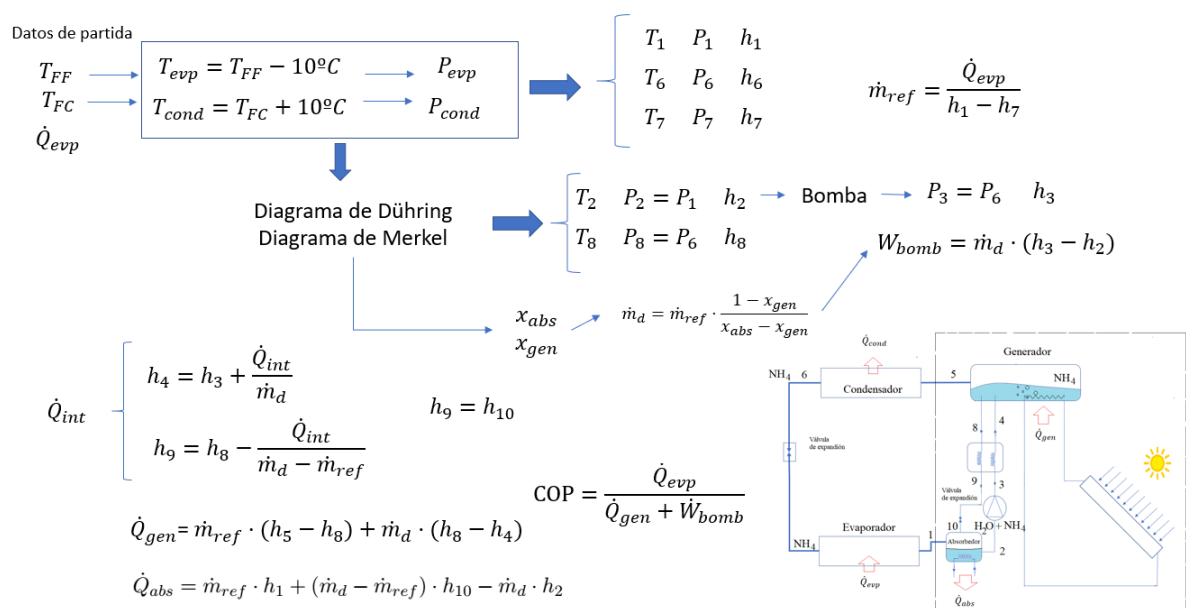


Figura 5: Diagrama del modelo de cálculo

8 Ejercicio propuesto

Ejercicio 1

La instalación frigorífica por absorción utiliza agua como refrigerante y bromuro de litio como absorbente. Los requerimientos de la instalación son:

Potencia frigorífica $\dot{Q}_A = 65 \text{ kW}$
Temperatura de evaporación 5°C
Temperatura de condensación 40°C

Se desea dimensionar el sistema de absorción, sabiendo que en el regenerador se transfiere una potencia calorífica de 5 kW .

9 Bibliografía

Albright, L. D. (1990). Environment control for animals and plants. Ed. American Society of Agricultural Engineers.

ATECYR (2010). Fundamentos de climatización: para instaladores e ingenieros recién titulados. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)

ATECYR (2016). Fundamentos de refrigeración. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)(Fernández Seara, J. et al.)

Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., van de Braak, N. J. (Eds.). (1995). Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Academic Publishers.

Carbó Ballester, J. (2021). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Ed. Marcombo.

DTIE 3.01, psicrometría (Pinazo Ojer, José Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

DTIE 7.05, cálculo de cargas térmicas (Pinazo Ojer, José Manuel | Soto Francés, Víctor Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)

Fenton, Donald L. (2010). Fundamentals of refrigeration I-P. Ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Pinazo, JM (1996) Cálculo de instalaciones frigoríficas. Editorial UPV

[Real Decreto 1027/2007](#), de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.

[Real Decreto 552/2019](#), de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias.

Stoecker, Wilbert F. (1998). Industrial refrigeration handbook. Ed. McGraw-Hill Education

Velázquez Martí, B. (2017). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Ed. UPV-Reverté. 885 pp.