

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE MEZCLAS DE REFRIGERANTES PARA
UN CIRCUITO FRIGORÍFICO
APLICADO A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE**

DOCTORANDO: CATALINA CÁNOVAS BERMEJO

DIRECTOR: Dr. FRANCISCO-JAVIER RECASENS BAXARIAS

TUTOR: Dr. SALVADOR CARDONA FOIX



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS

PROGRAMA DE DOCTORAT

FLUIDS, TURBOMÀQUINES I POTÈNCIA FLUIDA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR

D'ENGINYERIA INDUSTRIAL DE BARCELONA

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE MEZCLAS DE REFRIGERANTES PARA
UN CIRCUITO FRIGORÍFICO
APLICADO A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE**

**Tesis presentada para obtener el título de
Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya**

DOCTORANDO: CATALINA CÁNOVAS BERMEJO

DIRECTOR: Dr. FRANCISCO-JAVIER RECASENS BAXARIAS

TUTOR: Dr. SALVADOR CARDONA FOIX

BARCELONA, Noviembre 2015

RESUMEN

En la presente tesis doctoral se acomete el estudio del uso, gracias a sus propiedades deshidratantes, de una solución acuosa de LiCl como refrigerante secundario, en aquellas aplicaciones frigoríficas que requieren principalmente la deshumidificación del aire y donde los métodos convencionales presentan dificultades técnicas y/o elevado coste energético.

Se realiza el estudio de la transferencia de masa y calor entre la solución acuosa de LiCl y el aire y se aplica a diferentes condiciones de temperatura seca y humedad relativa del aire.

Se resuelve la regeneración de la solución acuosa de LiCl utilizando la potencia térmica del condensador del mismo circuito frigorífico, eliminando así la dependencia de otras fuentes de calor externas y aumentando la eficiencia energética de la instalación.

El análisis de los resultados obtenidos y la comparativa energética respecto a los métodos convencionales que se utilizan hasta ahora, muestra que es una alternativa a considerar.

Palabras clave: LiCl, deshumidificación del aire, circuito frigorífico, eficiencia energética, deshidratante, absorbedor, regenerador

ABSTRACT

The present thesis is undertaken to study the use of an aqueous solution of LiCl as a secondary refrigerant, due to its dehydrating properties, in those refrigeration applications that require mainly the air dehumidification and where the conventional methods show technical difficulties and/or a high energetic cost.

The study of mass and heat transference between the aqueous solution of LiCl and the air is made, and it is applied to different conditions of dry temperature and air relative humidity.

Regeneration of the aqueous solution of LiCl is solved using the condenser thermal power from the same refrigeration circuit, removing the dependence on other external heat sources, thus increasing the installation energetic efficiency.

The analysis of the obtained results and the energetic comparative regarding to the conventional methods used so far show this is really an alternative to consider.

Keywords: LiCl, air dehumidification, refrigeration circuit, energetic efficiency, desiccant, absorber, regenerator

PRÓLOGO

Tras años de experiencia profesional como Ingeniero Industrial y como docente universitario en Termodinámica, he aplicado los conocimientos adquiridos de refrigeración a una gran variedad de casos de tratamiento de aire en los que las necesidades eran muy variadas.

Es en el proceso de deshumidificación del aire, que consiste en reducir el contenido de vapor de agua, cuando he encontrado las mayores dificultades para su aplicación y en algunas ocasiones no se ha llevado a término por el elevado coste energético que suponía la instalación frigorífica requerida.

Por ello, hace un tiempo, me interesé en estudiar el proceso de deshumidificación de aire con mayor profundidad con el objetivo de encontrar una alternativa viable a la metodología convencional. A partir del estudio de la documentación internacional que localicé, decidí centrarme en el uso de un refrigerante secundario con propiedades deshidratantes, para incorporarlo en la instalación frigorífica que realizaría la deshumidificación del aire.

Como fruto de ese estudio surgió el desarrollo de la tesis doctoral que se presenta en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias, y es de justicia, a mis padres y hermano, que siempre han confiado en mí, que han sabido transmitirme los valores tan importantes necesarios para ser una buena persona.

En segundo lugar quiero hacer público mi agradecimiento a aquellas personas que han contribuido en mayor medida a haber llegado hasta aquí:

- Dr. Jose Maria Nacenta. Mi primer director de tesis. Gracias por introducirme en la investigación aplicada, por animarme a iniciar los estudios de doctorado y porque a pesar del tiempo transcurrido y las dificultades del camino, siempre he contado con su apoyo, disponibilidad y generosidad.
- Dr. Francesc Recasens. Gracias por aceptar ser director de mi tesis y la ayuda prestada fundamentalmente en el planteamiento de la parte de modelización de la tesis.
- Dr. Salvador Cardona. Gracias por aceptar ser tutor de mi tesis y ayudar a resolver algunas de las dificultades surgidas a última hora.

En tercer lugar, me gustaría destacar algunas personas que me han resultado importantes en todo este tiempo:

- Dr. Carles de Mas. Gracias por ayudarme en la revisión de la modelización. Sin duda fueron importantes sus comentarios y me permitió dar un gran avance.
- Dr. Juan Antonio Baeza y Dr. Julio Pérez. Gracias por la ayuda prestada en mis primeros contactos con el Matlab.

- Dr. Antoni Sánchez. Gracias por la generosidad demostrada durante tantos años de compañeros y por todo lo que me ha enseñado en los proyectos final de carrera que co-dirigimos.
- Dr. Francisco Valero. Gracias por confiar en mi y alentarme para seguir adelante con la tesis hasta el final.

Me gustaría también manifestar públicamente mi agradecimiento a los diferentes directores que ha tenido el Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Autònoma de Barcelona desde que inicié mi etapa docente allí, gracias por confiar en mi y permitirme desarrollar mi vocación docente, además de evolucionar personal y profesionalmente.

También manifiesto un agradecimiento colectivo al resto de compañeros de la Universidad y a los de trabajo en la ingeniería por la suerte que he tenido de encontrar profesionales que me han inspirado para disfrutar del trabajo bien hecho y me han transmitido las ganas de mejorar como profesional día a día.

Finalmente un agradecimiento a mi entorno más personal, en especial a Paqui, Mari, Joaquim y Manolo, por soportar mi pesadez y en los últimos tiempos mis preocupaciones, tensiones, nervios y mi obsesión: la tesis. He sentido su apoyo permanente, me han dado fuerza y energía para continuar y llegar hasta aquí.

Gracias a todos

SUMARIO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
PRÓLOGO.....	5
AGRADECIMIENTOS.....	7
SUMARIO.....	9
LISTADO DE FIGURAS.....	13
LISTADO DE TABLAS.....	17
LISTADO DE GRÁFICAS.....	19
LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	23
GLOSARIO.....	25
1. INTRODUCCIÓN.....	27
1.1. INTRODUCCIÓN.....	29
1.2. OBJETIVOS.....	31
1.3. ESTADO DEL ARTE.....	33
1.4. REFRIGERANTES. CICLO FRIGORÍFICO.....	35
1.4.1. REFRIGERANTES PRIMARIOS.....	35
1.4.2. REFRIGERANTES SECUNDARIOS.....	39

2. TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR ENTRE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO Y EL AIRE	41
2.1. SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO	43
2.2. ABSORBEDOR DE VAPOR DE AGUA	49
2.2.1. FLUJO EN EQUICORRIENTE	51
2.2.2. FLUJO EN CONTRACORRIENTE	59
2.3. CICLO COMPLETO DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO	67
3. APLICACIÓN A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE EN SECADEROS INDUSTRIALES.....	73
3.1. INTRODUCCIÓN	75
3.2. TRATAMIENTO DEL AIRE EN SECADEROS INDUSTRIALES	79
3.2.1. PROCESO 1 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO.....	79
3.2.2. PROCESO 2 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO MEJORADO.....	85
3.2.3. PROCESO 3 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 1	91
3.2.4. PROCESO 4 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 2	119
3.2.5. RESULTADOS. COMPARATIVA	145
4. APLICACIÓN A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD	153
4.1. INTRODUCCIÓN	155

4.2.	TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD.....	157
4.2.1.	PROCESO 1 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO.....	157
4.2.2.	PROCESO 2 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 1.....	163
4.2.3.	PROCESO 3 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 2.....	183
4.2.4.	RESULTADOS. COMPARATIVA	203
5.	CONCLUSIONES GENERALES	209
6.	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	213
7.	BIBLIOGRAFÍA	217
ANEXO A	221
A.1	TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 2. ABSORBEDOR.....	223
A.2	TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 2. REGENERADOR	227
A.3	TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 3. ABSORBEDOR.....	231
A.4	TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 3. REGENERADOR	235

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 2.1. Presión de vapor de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica
- Figura 2.2. Entalpía de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica
- Figura 2.3. Ficha de seguridad química del cloruro de litio
- Figura 2.4. Esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) en flujo equicorriente
- Figura 2.5. Esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) en flujo contracorriente
- Figura 2.6. Esquema de principio general del ciclo completo de la solución acuosa de cloruro de litio
- Figura 3.1. Secadero industrial de jamón
- Figura 3.2. Secadero industrial de fuet
- Figura 3.3. Esquema de principio del tratamiento de aire en un secadero industrial convencional. Proceso 1
- Figura 3.4. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial. Proceso 1
- Figura 3.5. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial mejorado. Proceso 2
- Figura 3.6. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial convencional mejorado. Proceso 2
- Figura 3.7. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3
- Figura 3.8. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3
- Figura 3.9. Esquema de principio general del proceso 3

- Figura 3.10. Relleno interno de un absorbedor de vapor de agua
- Figura 3.11. Relleno interno de un absorbedor de vapor de agua
- Figura 3.12. Detalle del relleno interno de un absorbedor de vapor de agua
- Figura 3.13. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3
- Figura 3.14. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4
- Figura 3.15. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4
- Figura 3.16. Esquema de principio general del proceso 4
- Figura 3.17. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4
- Figura 4.1. Esquema de principio del tratamiento de aire en dos etapas. Proceso 1
- Figura 4.2. Diagrama psicrométrico del tratamiento del aire en dos etapas. Proceso 1
- Figura 4.3. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2
- Figura 4.4. Diagrama psicrométrico del tratamiento del aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2
- Figura 4.5. Esquema de principio general del proceso 2
- Figura 4.6. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2
- Figura 4.7. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

Figura 4.8. Diagrama psicrométrico del tratamiento del aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio.

Proceso 3

Figura 4.9. Esquema de principio general del proceso 3

Figura 4.10. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

LISTADO DE TABLAS

- Tabla 3.1. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 1
- Tabla 3.2. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 2
- Tabla 3.3. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 3
- Tabla 3.4. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 3
- Tabla 3.5. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3
- Tabla 3.6. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el absorbedor del proceso 3
- Tabla 3.7. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el regenerador del proceso 3
- Tabla 3.8. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 4
- Tabla 3.9. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 4
- Tabla 3.10. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4
- Tabla 3.11. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el absorbedor del proceso 4
- Tabla 3.12. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el regenerador del proceso 4
- Tabla 3.13. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Tabla 3.14. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Tabla 3.15. Comparativa de la potencia frigorífica necesaria en el circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Tabla 3.16. Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los cuatro procesos presentados
- Tabla 4.1. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 1

- Tabla 4.2. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 2
- Tabla 4.3. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 2
- Tabla 4.4. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2
- Tabla 4.5. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 3
- Tabla 4.6. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 3
- Tabla 4.7. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3
- Tabla 4.8. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Tabla 4.9. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Tabla 4.10. Comparativa de la potencia frigorífica necesaria en el circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Tabla 4.11. Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los tres procesos presentados
- Tabla A.1. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el absorbedor del proceso 2
- Tabla A.2. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el regenerador del proceso 2
- Tabla A.3. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el absorbedor del proceso 3
- Tabla A.4. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z , en el regenerador del proceso 3

LISTADO DE GRÁFICAS

- Gráfica 3.1. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor.
Proceso 3
- Gráfica 3.2. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor.
Proceso 3
- Gráfica 3.3. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el
absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 3.4. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el
absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 3.5. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el
absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 3.6. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador.
Proceso 3
- Gráfica 3.7. Evolución de la fracción másica de la solución en el
regenerador. Proceso 3
- Gráfica 3.8. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el
regenerador. Proceso 3
- Gráfica 3.9. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el
regenerador. Proceso 3
- Gráfica 3.10. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el
regenerador. Proceso 3
- Gráfica 3.11. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor.
Proceso 4
- Gráfica 3.12. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor.
Proceso 4
- Gráfica 3.13. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el
absorbedor. Proceso 4

- Gráfica 3.14. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 4
- Gráfica 3.15. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 4
- Gráfica 3.16. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 4
- Gráfica 3.17. Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 4
- Gráfica 3.18. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4
- Gráfica 3.19. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4
- Gráfica 3.20. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4
- Gráfica 3.21. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Gráfica 3.22. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Gráfica 3.23. Comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en el circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados
- Gráfica 3.24. Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los cuatro procesos presentados
- Gráfica 4.1. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 2
- Gráfica 4.2. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 2
- Gráfica 4.3. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2

- Gráfica 4.4. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2
- Gráfica 4.5. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2
- Gráfica 4.6. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 2
- Gráfica 4.7. Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 2
- Gráfica 4.8. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2
- Gráfica 4.9. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2
- Gráfica 4.10. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2
- Gráfica 4.11. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 4.12. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 4.13. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 4.14. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 4.15. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3
- Gráfica 4.16. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 3
- Gráfica 4.17. Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 3
- Gráfica 4.18. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

- Gráfica 4.19. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3
- Gráfica 4.20. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3
- Gráfica 4.21. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Gráfica 4.22. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Gráfica 4.23. Comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en el circuito frigorífico de los tres procesos presentados
- Gráfica 4.24. Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los tres procesos presentados

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

a	Área del absorbedor por unidad de volumen (m^2/m^3)
C_{pm}	Calor específico del aire ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)
C_{ps}	Calor específico de la solución ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)
K_G	Coefficiente de transferencia de masa ($\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$)
K_Y	Coefficiente de transferencia de masa ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
H_a	Entalpía del aire (kJ/kg)
H_s	Entalpía de la solución (kJ/kg)
H_{rel}	Humedad relativa del aire (%)
H_{vap}	Entalpía latente del vapor de agua (kJ/kg)
\dot{m}_a	Caudal de aire seco (kg/s)
\dot{m}_{agua}	Caudal de agua (kg/s)
\dot{m}_s	Caudal de la solución ($\text{kg}_{solución}/\text{s}$)
\dot{m}_{LiCl}	Caudal del cloruro de litio (kg/s)
P	Presión total del aire (Pa)
P_a	Presión parcial de vapor de agua en el aire (Pa)

- P_s Presión de vapor de la solución a T_s y X (Pa)
- T_a Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- T_s Temperatura de la solución ($^{\circ}\text{C}$)
- S Superficie (sección transversal del absorbedor) (m^2)
- U Coeficiente de transferencia de calor ($\text{kW}/\text{m}^2\text{C}$)
- V Volumen del absorbedor (m^3)
- W_a Humedad absoluta del aire ($\text{kg}_{\text{vapor agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$)
- X Fracción másica de cloruro de litio ($\text{kg}_{\text{LiCl}}/\text{kg}_{\text{solución}}$)
- z Altura del absorbedor (m)

GLOSARIO

ABSORBEDOR. Equipo deshumidificador del aire.

Equipo encargado de absorber parte del vapor de agua presente en el aire, mediante la transferencia de masa entre la aire y la solución acuosa de cloruro de litio.

CEE Coeficiente de eficiencia energética.

Coeficiente que relaciona la potencia obtenida en un circuito frigorífico con la potencia absorbida en el compresor del circuito.

CEE_F Coeficiente de eficiencia energética en el evaporador.

Coeficiente que relaciona la potencia frigorífica obtenida en el evaporador de un circuito frigorífico con la potencia absorbida en el compresor del circuito.

CFC Refrigerantes Clorfluorcarbonados.

Refrigerantes derivados de cadenas de hidrocarburos que contienen Cloro y Fluor, además del carbono.

Fcs Factor de calor sensible.

Relaciona la potencia frigorífica sensible con la potencia frigorífica total de un proceso de refrigeración.

HC Refrigerantes Hidrocarbonados.

Refrigerantes derivados de cadenas de hidrocarburos que contienen Hidrógeno, además del carbono.

HCFC Refrigerantes Hidroclorfluorcarbonados.

Refrigerantes derivados de cadenas de hidrocarburos que contienen Hidrógeno, Cloro y Fluor, además del carbono.

HFC Refrigerantes Hidrofluorcarbonados.

Refrigerantes derivados de cadenas de hidrocarburos que contienen Hidrógeno y Fluor, además del carbono.

PAO Potencial de agotamiento del Ozono.

Índice que indica la contribución a la destrucción de la capa de ozono.

PCA Potencia de calentamiento atmosférico.

Índice que indica la contribución al calentamiento global de la tierra debido al efecto invernadero.

POTENCIA FRIGORÍFICA LATENTE.

Parte de la potencia frigorífica total asociada a la variación de humedad absoluta del aire, manteniendo constante la temperatura.

POTENCIA FRIGORÍFICA SENSIBLE.

Parte de la potencia frigorífica total asociada a la variación de temperatura del aire, manteniendo constante la humedad absoluta.

TEMPERATURA DE ROCIO.

Temperatura límite por debajo de la que se inicia la condensación del vapor de agua presente en el aire.

REGENERADOR. Equipo humidificador del aire.

Equipo encargado de regenerar la solución acuosa de cloruro de litio mediante la transferencia al aire de parte del agua presente en la solución.

1 INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Son muchas las aplicaciones industriales en las que se requiere la deshumidificación del aire, a baja temperatura, como parte de su tratamiento. Se pretende que el aire, después del tratamiento, resulte con una humedad absoluta menor que la inicial.

Para ello, mayoritariamente se utiliza el evaporador de un circuito frigorífico, el cual enfría el aire a una temperatura inferior a la temperatura de rocío, consiguiendo disminuir simultáneamente la temperatura y la humedad absoluta del aire.

El resultado es un aire con la humedad absoluta deseada pero, en gran mayoría de aplicaciones, la temperatura es inferior a la exigida, por lo que es necesario un aporte de calor posterior para alcanzar la temperatura final adecuada.

Existen algunas aplicaciones en las que mediante el uso de circuitos frigoríficos se hace difícil conseguir el nivel de deshumidificación requerido o presentan consumos energéticos muy elevados.

Algunas de estas aplicaciones son:

- Procesos industriales de secado a baja temperatura, como por ejemplo alimentos, madera, pieles,
- Procesos industriales en los que el aire recibe un aporte de carga latente importante en comparación a la carga sensible y el factor de calor sensible resultante es muy pequeño.
- Procesos de climatización de piscinas.

- Procesos de climatización de locales con alto índice de ocupación, principalmente en épocas intermedias del año.
- En general, procesos en los que es necesario enfriar el aire a temperaturas muy bajas para conseguir eliminar toda la humedad absoluta excedente.

Cuando es necesario enfriar el aire a baja temperatura, la temperatura de evaporación del refrigerante primario que recorre el circuito frigorífico, ha de ser aún menor, la consecuencia directa es el aumento del trabajo del compresor frigorífico, que representa un aumento del consumo energético y la disminución de la eficiencia energética de la instalación frigorífica.

Alternativamente, en algunos casos, se realiza la deshumectación mediante el uso de un deshidratante, el cual absorbe parte de la humedad absoluta presente en el aire. Su principal desventaja es el coste de la regeneración del deshidratante.

Con este trabajo se pretende avanzar en los procesos de deshumidificación del aire a baja temperatura, mediante la combinación del uso del circuito frigorífico convencional con la deshumidificación a través del uso de un deshidratante líquido (refrigerante secundario) y la posterior regeneración del mismo, con el calor del condensador del mismo circuito frigorífico.

Se ha realizado el estudio del proceso necesario y se han elegido dos aplicaciones que corresponden a casos reales, para estudiar y analizar los resultados y compararlos con los que se obtienen mediante la solución convencional.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son:

- Definición de las variables que intervienen en el proceso de deshumectación del aire, mediante el uso de un deshidratante líquido.
- Análisis de la evolución de las variables que intervienen en un absorbedor .
- Estudio de la regeneración de un deshidratante líquido.
- Desarrollo del ciclo completo necesario para un deshidratante líquido aplicado a la deshumidificación del aire.
- Presentación de alternativas a la refrigeración con refrigerantes primarios, aplicada a la deshumidificación del aire.
- Aplicación de la deshumidificación del aire mediante un circuito frigorífico que utiliza un refrigerante primario y un refrigerante secundario, deshidratante líquido, en varios procesos que corresponden a casos reales.
- Comparativa energética de diferentes alternativas para la deshumidificación del aire

1.3. ESTADO DEL ARTE

La deshumidificación del aire, a baja temperatura, es un proceso necesario en muchas aplicaciones, a lo largo de la historia.

El método que habitualmente se ha utilizado ha sido mediante el uso de un circuito frigorífico, haciendo pasar el caudal de aire a tratar por el evaporador del circuito frigorífico, enfriando el aire por debajo de la temperatura de rocío, consiguiendo condensar el exceso del vapor de agua, después se aporta calor para aumentar la temperatura del aire hasta las condiciones requeridas. Habitualmente el calor se suministra a partir del calor cedido por el refrigerante en el condensador del circuito frigorífico. [8], [9], [10]

La utilización de deshidratantes líquidos es una alternativa al método explicado anteriormente, que consigue la deshidratación del aire, pero para conseguir la transferencia de masa deseada, precisa aporte de energía frigorífica y energía calorífica, que aumenta el consumo energético, haciendo difícil la aplicación a casos reales [9]

La solución acuosa de cloruro de litio por su baja presión de vapor a baja temperatura hace que sea un deshidratante elegido para la deshumidificación del aire. [8]

Trabajos realizados presentan las ecuaciones empíricas obtenidas para el cálculo de la presión de vapor y la entalpía de la solución acuosa de cloruro de litio, en función de la temperatura y la fracción másica. [2], [4])

En el proceso de deshidratación del aire, el deshidratante líquido, en el absorbedor, absorbe parte del vapor de agua presente en el aire, después es necesario la regeneración del deshidratante para recuperar las condiciones iniciales para realizar un nuevo ciclo. Precisa realizar el proceso contrario en el regenerador y ceder el agua absorbida.

Para la regeneración del deshidratante, algunos autores han propuesto el uso de energía solar consiguiendo temperaturas mayores, facilitando la eliminación del vapor de agua de la solución pero teniendo la dependencia de la disponibilidad de la energía solar se hace necesario implementar un sistema de aporte de calor alternativo para la regeneración del deshidratante, haciendo costosa la inversión necesaria [4], [5]

La regeneración del deshidratante de forma viable energéticamente es un problema no resuelto.

Con este trabajo se pretende avanzar en esta línea y mostrar una alternativa a la deshumidificación convencional del aire, incorporando el uso de una solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario de una instalación frigorífica, estudiando los intercambios térmicos necesarios en el aire y en la solución acuosa de cloruro de litio, para conseguir las condiciones de trabajo adecuadas tanto en el absorbedor como en el regenerador.

Se estudiará muy especialmente el uso de recuperadores de calor y el aprovechamiento energético del circuito frigorífico utilizado, para conseguir mejorar la eficiencia energética del conjunto de la instalación.

1.4. REFRIGERANTES. CICLO FRIGORÍFICO

1.4.1. REFRIGERANTES PRIMARIOS

El ciclo frigorífico por compresión está formado por cuatro elementos principales, que son recorridos por el fluido refrigerante, refrigerante primario:

- Evaporador. Intercambiador de calor en el que el refrigerante se evapora absorbiendo energía a baja presión y temperatura. Es donde se dispone de potencia frigorífica.
- Condensador. Intercambiador de calor en el que el refrigerante condensa cediendo energía a alta presión y temperatura. Es donde se dispone de potencia calorífica.
- Compresor frigorífico. Es el encargado de conseguir y mantener la diferencia de presiones con las que trabaja el refrigerante. Realiza el trabajo de compresión del refrigerante.
- Elemento de expansión. Normalmente se trata de una válvula en la que se produce una alta caída de presión, consiguiendo la expansión del refrigerante.

El parámetro más utilizado que indica la eficiencia energética de un circuito frigorífico real es el Coeficiente de Eficacia Energética, CEE, que relaciona la potencia frigorífica obtenida en el evaporador con la potencia absorbida por el compresor al realizar el trabajo de compresión. Cuanto mayor sea el valor del CEE, mayor será la eficiencia conseguida y menor la potencia absorbida requerida.

El CEE aumenta cuando la temperatura de evaporación aumenta y/o la temperatura de condensación disminuye. Las temperaturas de evaporación y de condensación se eligen para cada aplicación en función de las temperaturas de intercambio térmico necesarias.

Y para cada aplicación, en función de las condiciones de trabajo que se requieran, se elige el refrigerante primario que mejor se adapta a las temperaturas y presiones necesarias.

En cuanto a la aplicación de los circuitos frigoríficos, cuando la potencia frigorífica está destinada al tratamiento del aire se realiza el enfriamiento de éste.

Si la temperatura final es menor que la temperatura de rocío del aire en las condiciones iniciales, habitual en gran número de aplicaciones, además de enfriar el aire, simultáneamente lo deshumidifica.

En ese caso, la potencia frigorífica total conseguida en el evaporador del circuito frigorífico se divide en dos partes:

- Potencia frigorífica sensible destinada a enfriar el aire, reduce la temperatura del aire
- Potencia frigorífica latente destinada a deshumectar el aire, reduce la humedad absoluta del aire.

Así pues, cuando el objetivo de la instalación frigorífica es deshumectar el aire, tradicionalmente se ha realizado el enfriamiento de éste por debajo de la temperatura de rocío, consiguiendo la condensación del excedente de vapor de agua contenido en el aire, obligando a que la temperatura de evaporación del refrigerante primario sea menor, aumentando el trabajo de compresión necesario, disminuyendo el CEE del circuito frigorífico y aumentando la potencia absorbida por la instalación.

En lo relativo al uso de los refrigerantes primarios, las normativas que regulan el uso de los fluidos refrigerantes, con el fin de velar por la necesaria protección del medio ambiente, prohibieron, en primer lugar, el uso de aquellos refrigerantes que, en caso de producirse una fuga hacia la atmósfera de parte del refrigerante de una instalación frigorífica, contribuyera a la destrucción de la capa de ozono, refrigerantes que en su molécula estuviese presente el átomo de cloro. Los refrigerantes descartados para su uso son los del tipo CFC's y HCFC's.

El parámetro que cuantifica esta contribución es el Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono (PAO). En la actualidad está prohibido el uso de refrigerantes con PAO distinto de cero.

Los refrigerantes que están permitidos son los del tipo HFC's, los refrigerantes del tipo HC's y los de la serie 700, como el R717 (amoníaco).

Las actuales normativas (tanto de ámbito nacional como de ámbito europeo), están regulando la limitación y/o prohibición del uso de refrigerantes que si bien no afectan a la capa de ozono porque su potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO) es cero, si afectan al calentamiento global de la tierra, dado que el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) es alto en la mayoría de los refrigerantes más utilizados, en la actualidad. [14], [15], [16], [17]

Es decir, muchos de los refrigerantes permitidos hoy en día, en un futuro próximo estarán prohibidos. Los refrigerantes permitidos tendrán una clasificación de seguridad más exigente, por su mayor inflamabilidad, que limitará el uso de los mismos.

1.4.2. REFRIGERANTES SECUNDARIOS

Los refrigerantes secundarios se han utilizado habitualmente en instalaciones frigoríficas para distribuir la potencia frigorífica obtenida en el evaporador hasta los diferentes servicios que requerían refrigeración. De esta manera, el refrigerante primario queda confinado en una zona de seguridad.

Algunos de los refrigerantes secundarios más utilizados son el etilenglicol y el propilenglicol que dependiendo de la fracción másica pueden trabajar a temperaturas negativas, en estado líquido.

Ante la problemática de los refrigerantes primarios descrita en el apartado anterior, se hace más necesario aumentar la utilización de circuitos frigoríficos con los refrigerantes primarios permitidos, instalando todos los elementos del circuito frigorífico en salas de máquinas de la seguridad requerida, o directamente en el exterior y utilizando refrigerantes secundarios para la distribución de la potencia frigorífica.

En este trabajo se ha elegido un refrigerante secundario, en concreto, una solución acuosa de cloruro de litio, por su calidad como deshidratante, para aplicarlo en una instalación frigorífica cuyo principal objetivo es deshumidificar el aire.

2 TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR ENTRE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO Y EL AIRE

2 TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR ENTRE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO Y EL AIRE

2.1. SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO

El cloruro de litio es una sal formada por cloro y litio en la proporción 1:1.

Algunas de sus propiedades son: [13]

- Fórmula.....LiCl
- Peso molecular.....42,40 g/mol
- Solubilidad en agua (0°C).....63,7 g/100cc
- Solubilidad en agua (95°C).....130 g/100cc

Destaca su elevada higroscopicidad, por lo que se puede utilizar como deshidratante.

El cloruro de litio disuelto en agua es el fluido secundario elegido como deshidratante líquido en este trabajo.

PRESIÓN DE VAPOR

Cuando se pretende la deshumidificación del aire mediante el uso de un deshidratante líquido en contacto con el aire es necesario que la presión de vapor del deshidratante sea menor que la presión de vapor del aire. La presión de vapor de un deshidratante líquido es directamente proporcional a su temperatura e inversamente proporcional a su fracción másica.

La Fig 2.1 muestra la presión de vapor de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica de cloruro de litio en la solución [8]

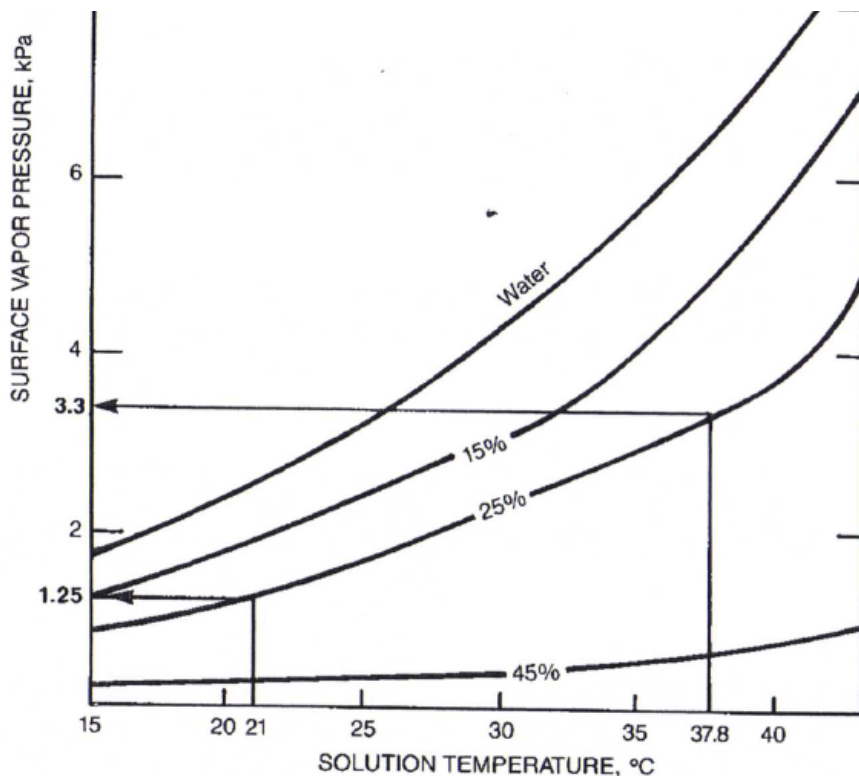


Figura 2.1. Presión de vapor de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica

La presión de vapor de la solución acuosa de cloruro de litio, en función de la temperatura de la solución (T) y la fracción másica del Cloruro de litio (X), se obtiene a partir de la ecuación siguiente: [4]

$$P_v = (a_0 + a_1 T + a_2 T^2) + (b_0 + b_1 T + b_2 T^2) X + (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) X^2$$

donde

$$a_0 = 4,58208 \quad a_1 = -0,159174 \quad a_2 = 0,0072594$$

$$b_0 = -18,3816 \quad b_1 = 0,5661 \quad b_2 = -0,019314$$

$$c_0 = 21,312 \quad c_1 = -0,666 \quad c_2 = 0,01332$$

siendo

$$T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad X \text{ (KgLiCl/Kg solución)} \quad P_v \text{ (Pa)}$$

ENTALPIA

La Fig 2.2 muestra gráficamente la entalpía de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica de cloruro de litio en la solución [2]

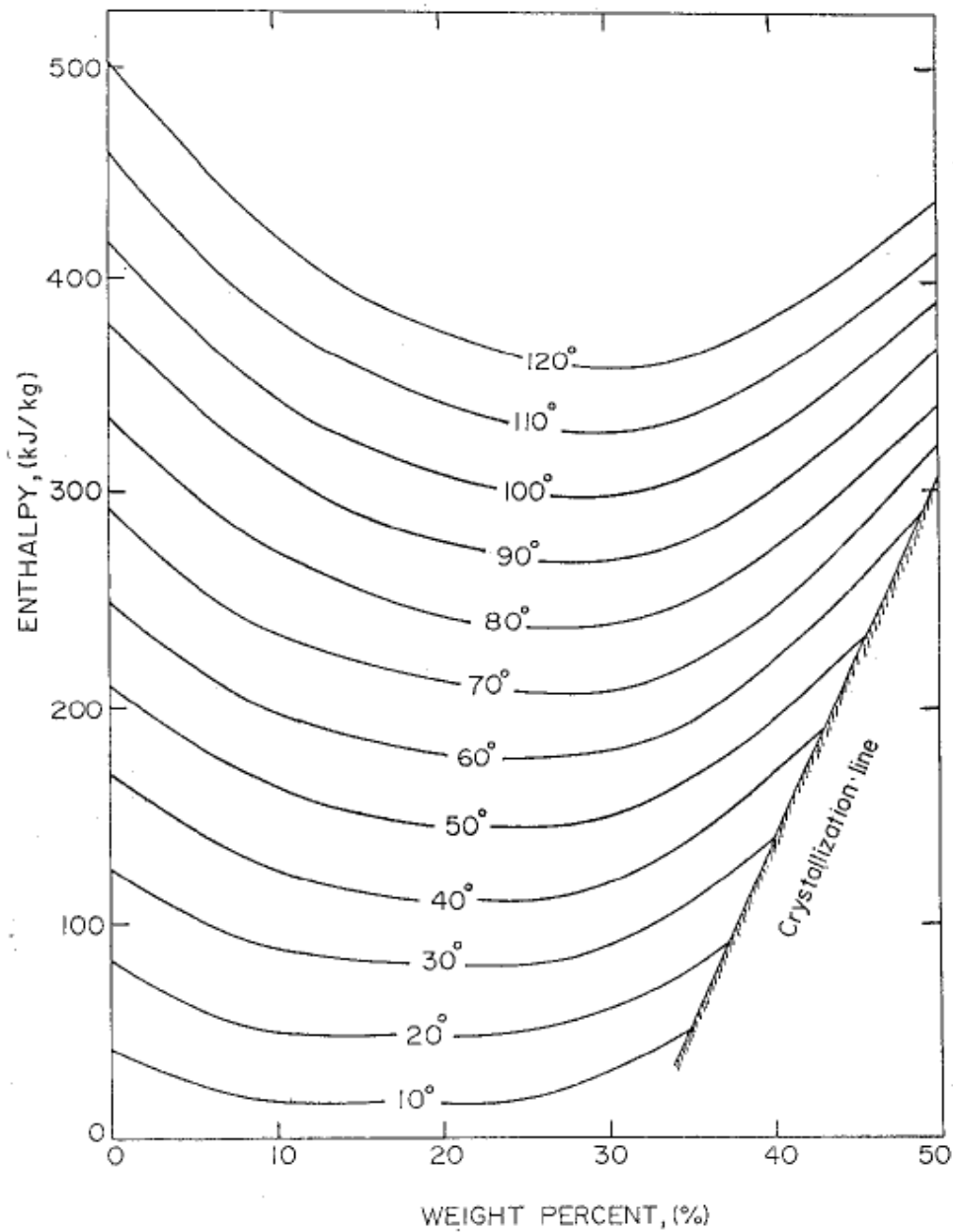


Figura 2.2. Entalpía de la solución acuosa de cloruro de litio en función de la temperatura y la fracción másica

La entalpía de la solución acuosa de cloruro de litio, en función de la temperatura de la solución (T) y la fracción másica del Cloruro de litio (X), se obtiene a partir de la ecuación siguiente: [2]

$$H = A + BT + CT^2$$

donde,

$$A = - 66,2324 + 11,2711 X - 0,79853 X^2 + 2,1534E-02 X^3 - 1,66352E-04 X^4$$

$$B = 4,5751 - 0,146924 X + 6,307226E-03 X^2 - 1,38054E-04 X^3 + 1,06690E-06 X^4$$

$$C = -8,09689E-04 + 2,18145E-04 X - 1,36194E-05 X^2 + 3,20998E-07 X^3 - 2,64266E-09 X^4$$

siendo

$$T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad X \text{ (Kg}_{\text{LiCl}}/\text{Kg}_{\text{solución}}) \quad H \text{ (Kj/Kg}_{\text{ solución}})$$

DEGRADACIÓN

La vida útil de la solución acuosa del Cloruro de litio depende del uso y de la contaminación que presente el aire a tratar. En general, los deshidratantes líquidos son muy sensibles a las reacciones que puede hacer con los contaminantes presentes en el aire, por lo que es aconsejable introducir filtros adecuados en el flujo de aire antes de entrar en contacto con la solución. No obstante se considera que puede estar funcionando en el intervalo de 10.000 a 100.000 horas antes de ser necesario la sustitución. [8]

A continuación se muestra la FICHA DE SEGURIDAD del CLORURO DE LITIO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

CLORURO DE LITIO

ICSC: 0711

 <p style="text-align: center;">CLORURO DE LITIO LiCl Masa molecular: 42.4</p> <p>Nº CAS 7447-41-8 Nº RTECS QJ5950000 Nº ICSC 0711</p>			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSION			
EXPOSICION		¡EVITAR LA DISPERSION DE POLVOS! ¡HIGIENE ESTRICTA! ¡EVITAR LA EXPOSICION DE MUJERES (EMBARAZADAS)!	
• INHALACION	Dolor de garganta, tos, sensación de quemazón.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y someter a atención médica.
• PIEL	Enrojecimiento, dolor.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y solicitar atención médica.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• INGESTION		No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, no dar nada de beber y someter a atención médica.
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente. Eliminar el residuo con agua abundante. (Protección personal adicional: respirador de filtro P2 para partículas nocivas).		Mantener en lugar seco.	
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 0711		Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	

Figura 2.3. Ficha de seguridad química del cloruro de litio

Fichas Internacionales de Seguridad Química

CLORURO DE LITIO

ICSC: 0711

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Cristales higroscópicos y delicuescentes, entre incoloros y blancos o polvo.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS	RIESGO DE INHALACION La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire por dispersión.
	PELIGROS QUIMICOS La solución acuosa es corrosiva para los metales.	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita la piel. En casos graves puede inducir inconsciencia y convulsiones. Se recomienda vigilancia médica.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido.	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede tener efectos sobre el sistema nervioso central y riñones, dando lugar a pequeños temblores de la manos y cambios en la conducta. Puede originar defectos congénitos.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 1360°C Punto de fusión: 614°C Densidad relativa (agua = 1): 2.1	Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 83 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -2.7
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
Los datos de esta ficha se refieren a la sustancia anhidrida (libre de agua). Hay algunos hidratos de este compuesto que tienen datos físicos distintos		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 2-050 CLORURO DE LITIO		
ICSC: 0711		CLORURO DE LITIO
© CCE, IPCS, 1994		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).	

© INSHT

Figura 2.3. Ficha de seguridad química del cloruro de litio. Cont.

2.2. ABSORBEDOR DE VAPOR DE AGUA

En este apartado se estudian las variables que intervienen en el proceso de deshumidificación del aire, mediante una solución acuosa de cloruro de litio, como deshidrantante líquido.

Se pretende que el vapor de agua que inicialmente forma parte del aire se transfiera a la solución, para que el aire a la salida resulte con menor humedad absoluta que a la entrada y la solución con menor fracción másica en cloruro de litio a la salida que a la entrada.

Para ello, en el equipo absorbedor de vapor de agua, el flujo de aire se pondrá en contacto directo con el flujo de la solución, en las condiciones adecuadas para conseguir este efecto.

Las variables que intervienen en los procesos de transferencia de masa y de calor entre los dos fluidos de trabajo: aire y solución acuosa de cloruro de litio se relacionan a continuación.

- \dot{m}_a Caudal de aire seco (kg/s)
- T_a Temperatura del aire (°C)
- W_a Humedad absoluta del aire (kgvapor agua/kgaire seco)
- \dot{m}_s Caudal de la solución (kgsolución /s)
- T_s Temperatura de la solución (°C)
- X Fracción másica LiCl (kgLiCl/kgsolución)
- z Altura absorbedor (m)

Otras variables dependientes de las anteriores que también intervienen son:

- H_a Entalpía del aire húmedo (kJ/kg)
- P_a Presión parcial del vapor de agua en el aire (Pa)
- H_s Entalpía de la solución (kJ/kg)
- P_s Presión de vapor de la solución a T_s y X (Pa)

Como que las variables que intervienen varían en función de la altura del absorbedor, z , es necesario conocer las ecuaciones por las que se rige la evolución de cada variable independiente, en función de la altura, z .

Mediante la aplicación de las ecuaciones del balance de masa y de energía en un diferencial de volumen considerado, se han obtenido las ecuaciones diferenciales, en función de la altura, z , para aquellas variables que se desconoce la ecuación de su evolución.

La resolución del sistema de ecuaciones diferenciales junto con las ecuaciones explícitas de las variables dependientes, permite conocer la evolución y el valor de todas las variables en cualquier punto del absorbedor.

El balance de masa y energía se ha realizado para dos modelos de contacto entre ambos fluidos, en función del tipo de flujo:

- A) Flujo en equicorriente. Misma dirección y sentido de circulación de los dos fluidos
- B) Flujo en contracorriente. Misma dirección y sentido de circulación de los fluidos opuestos

Se presenta a continuación el detalle del estudio realizado para cada caso.

2.2.1. FLUJO EN EQUICORRIENTE.

En la figura 2.4 se representa el esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) con el sentido de los flujos de los dos fluidos que intervienen (equicorriente): aire y solución acuosa de cloruro de litio.

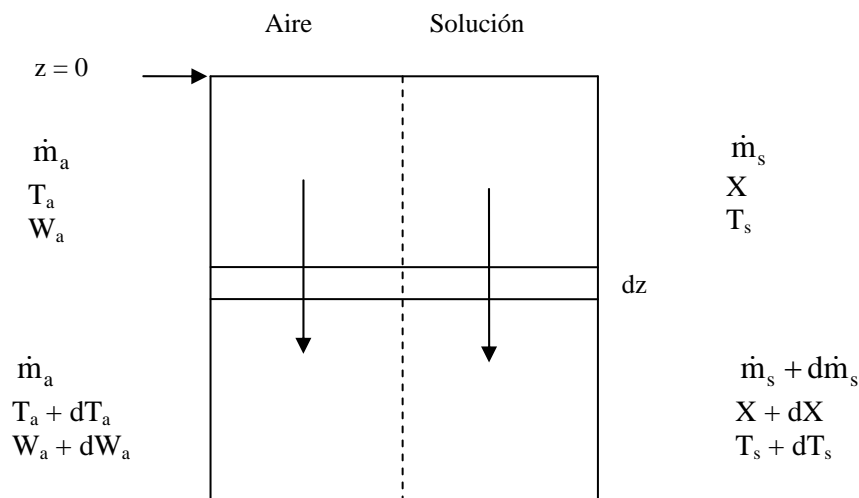


Figura 2.4. Esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) en flujo equicorriente

Se ha considerado un diferencial de volumen en el absorbedor para aplicar las ecuaciones del balance de masa y de energía.

Dado que la sección transversal, S , es constante a lo largo de la altura z , se puede expresar que $dV = Sdz$.

El origen de la variable z se ubica en el extremo superior del absorbedor.

BALANCE DE MASA DEL ABSORBEDOR DE VAPOR DE AGUA
 (DESHUMIDIFICADOR)

El absorbedor realiza una transferencia de masa (vapor de agua) desde el flujo de aire al flujo de solución. Las ecuaciones diferenciales del balance de masa para el caudal de vapor de agua y para el caudal de la solución respecto de la altura corresponden a las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\dot{m}_a \frac{dW_a}{dz} = -K_G a S (P_a - P_s) \quad (2.1)$$

$$\frac{d\dot{m}_s}{dz} = -\dot{m}_a \frac{dW_a}{dz} = K_G a S (P_a - P_s) \quad (2.2)$$

La fracción másica del Cloruro de litio en la solución, X, se expresa en función del caudal de cloruro de litio y del caudal de la solución, ecuación 2.3

$$X = \frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_{LiCl} + \dot{m}_{agua}} = \frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s} \quad (2.3)$$

Como que el caudal de cloruro de litio permanece constante, la derivada de la fracción másica, X, respecto a la altura z, se expresa en la ecuación 2.4

$$\frac{dX}{dz} = \frac{d\left(\frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s}\right)}{dz} = -\frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s^2} \frac{d\dot{m}_s}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} \frac{d\dot{m}_s}{dz} \quad (2.4)$$

Combinando las ecuaciones 2.2 y la 2.4, la ecuación diferencial de la fracción másica, X, respecto a la altura z, se expresa en la ecuación 2.5

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} K_G a S (P_a - P_s) \quad (2.5)$$

BALANCE DE ENERGÍA DEL ABSORBEDOR DE VAPOR DE AGUA
 (DESHUMIDIFICADOR)

La transferencia de calor entre el flujo de aire y el flujo de la solución acuosa de cloruro de litio se expresa en la ecuación 2.6.

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = -\dot{m}_a \frac{dH_a}{dz} \quad (2.6)$$

A continuación se desarrolla cada uno de los términos de la ecuación 2.6, expresando la transferencia de calor para cada flujo.

La ecuación de la entalpía del aire húmedo es la suma de la entalpía del aire seco y la entalpía del vapor de agua que contiene el aire. En función de la temperatura y humedad absoluta, su expresión es: [11]

$$H_a = 1,005T_a + (2500,9 + 1,82T_a)W_a \quad (2.7)$$

como la temperatura del aire y la humedad absoluta varían en función de la altura z , se realiza la derivación parcial, ecuación 2.8

$$\frac{dH_a}{dz} = \frac{\partial H_a}{\partial T_a} \frac{dT_a}{dz} + \frac{\partial H_a}{\partial W_a} \frac{dW_a}{dz} \quad (2.8)$$

y se obtiene la ecuación del diferencial de entalpía del aire húmedo en la ecuación 2.9

$$\frac{dH_a}{dz} = (1,005 + 1,82W_a) \frac{dT_a}{dz} + (2500,9 + 1,82T_a) \frac{dW_a}{dz} \quad (2.9)$$

Por otra parte, la potencia sensible que intercambia el aire se expresa en la ecuación 2.10

$$\dot{m}_a C_{pm} \frac{dT_a}{dz} = -UaS(T_a - T_s) \quad (2.10)$$

como que el calor específico del aire húmedo corresponde a la suma del calor específico del aire seco y del calor específico del vapor de agua que contiene el aire, su expresión es:

$$C_{pm} = 1,005 + 1,82W_a \quad (2.11)$$

por lo que la ecuación 2.10 se puede expresar como sigue

$$\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a) \frac{dT_a}{dz} = -UaS(T_a - T_s) \quad (2.12)$$

combinando la ecuación 2.12 con las ecuaciones 2.9 y 2.1, se obtiene la ecuación 2.13

$$\begin{aligned} \frac{dH_a}{dz} = & -(1,005 + 1,82W_a) \frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a)} \\ & - \frac{K_G aS}{\dot{m}_a} (2500,9 + 1,82T_a)(P_a - P_s) \end{aligned} \quad (2.13)$$

simplificando la ecuación anterior se obtiene la expresión de la ecuación diferencial de la entalpía del aire húmedo, ecuación 2.14

$$\frac{dH_a}{dz} = - \frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a} - \frac{K_G aS}{\dot{m}_a} (2500,9 + 1,82T_a)(P_a - P_s) \quad (2.14)$$

Respecto a la solución, la transferencia de calor que experimenta en el dz, se expresa en la ecuación 2.15

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = H_s \frac{d\dot{m}_s}{dz} + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} \quad (2.15)$$

combinando la ecuación 2.15 con la ecuación 2.2, se obtiene la ecuación 2.16

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = H_s K_G aS(P_a - P_s) + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} \quad (2.16)$$

sustituyendo las ecuaciones 2.16 y 2.14 en la ecuación 2.6

$$\begin{aligned} H_s K_G aS(P_a - P_s) + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} = \\ = UaS(T_a - T_s) + K_G aS(2500,9 + 1,82T_a)(P_a - P_s) \end{aligned} \quad (2.17)$$

agrupando los términos de la ecuación 2.17, se obtiene la ecuación 2.18

$$\dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} = UaS(T_a - T_s) + K_G aS(P_a - P_s)((2500,9 + 1,82T_a) - H_s) \quad (2.18)$$

mediante el calor específico de la solución se relaciona el diferencial de entalpía y el diferencial de temperatura de la solución, se expresa en la ecuación 2.19

$$C_{ps} dT_s = dH_s \quad (2.19)$$

derivando la ecuación 2.19 respecto de la z, se obtiene la ecuación 2.20

$$C_{ps} \frac{dT_s}{dz} = \frac{dH_s}{dz} \quad (2.20)$$

sustituyendo la ecuación 2.20 en la ecuación 2.18 se obtiene la ecuación 2.21, que es la ecuación diferencial de la temperatura de la solución

$$\dot{m}_s C_{ps} \frac{dT_s}{dz} = UaS(T_a - T_s) + K_G aS(P_a - P_s)((2500,9 + 1,82T_a) - H_s) \quad (2.21)$$

Además de las ecuaciones anteriores es necesario conocer las ecuaciones explícitas de la entalpía de la solución, H_s , de la presión parcial del vapor de agua en el aire, P_a y la presión de vapor de la solución, P_s , además de la ecuación de la entalpía del aire húmedo, 2.7.

La ecuación de la entalpía de la solución, H_s , en función de la temperatura (T_s) y de la fracción másica de cloruro de litio (X), [2] corresponde a la siguiente ecuación:

$$H_s = A + BT_s + CT_s^2 \quad (2.22)$$

donde los coeficientes son:

$$A = -66,2324 + 11,2711 X - 0,79853 X^2 + 2,1534E-02 X^3 - 1,66352E-04 X^4$$

$$B = 4,5751 - 0,146924 X + 6,307226E-03 X^2 - 1,38054E-04 X^3 + 1,06690E-06 X^4$$

$$C = -8,09689E-04 + 2,18145E-04 X - 1,36194E-05 X^2 + 3,20998E-07 X^3 \\ - 2,64266E-09 X^4$$

La presión parcial del vapor de agua en el aire, P_a en función de la humedad absoluta del aire, W_a , y de la presión total del aire, P , se expresa en la ecuación 2.23, [11]

$$P_a = \frac{W_a P}{0,622 + W_a} \quad (2.23)$$

La presión de vapor de la solución, P_s , en función de la temperatura (T_s) y de la fracción másica de cloruro de litio (X), [4] corresponde a la ecuación 2.24

$$P_s = (a_0 + a_1 T_s + a_2 T_s^2) + (b_0 + b_1 T_s + b_2 T_s^2) X \\ + (c_0 + c_1 T_s + c_2 T_s^2) X^2 \quad (2.24)$$

donde los coeficientes son:

$$a_0 = 4,58208 \quad a_1 = -0,159174 \quad a_2 = 0,0072594$$

$$b_0 = -18,3816 \quad b_1 = 0,5661 \quad b_2 = -0,019314$$

$$c_0 = 21,312 \quad c_1 = -0,666 \quad c_2 = 0,01332$$

RECOPIACIÓN DE LAS ECUACIONES OBTENIDAS

A continuación se recopilan las ecuaciones obtenidas en este apartado.

Las ecuaciones diferenciales de las variables independientes son:

$$\frac{dW_a}{dz} = -\frac{K_G a S}{\dot{m}_a} (P_a - P_s) \quad (2.1)$$

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} K_G a S (P_a - P_s) \quad (2.5)$$

$$\frac{dT_a}{dz} = -\frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a)} \quad (2.12)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{K_G a S (P_a - P_s) (2500,9 + 1,82T_a - H_s) + UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_s C_{ps}} \quad (2.21)$$

Las ecuaciones explícitas del resto de variables son:

$$H_a = 1,005T_a + (2500,9 + 1,82T_a)W_a \quad (2.7)$$

$$H_s = A + BT_s + CT_s^2 \quad (2.22)$$

donde los coeficientes son:

$$A = -66,2324 + 11,2711 X - 0,79853 X^2 + 2,1534E-02 X^3 - 1,66352E-04 X^4$$

$$B = 4,5751 - 0,146924 X + 6,307226E-03 X^2 - 1,38054E-04 X^3 + 1,06690E-06 X^4$$

$$C = -8,09689E-04 + 2,18145E-04 X - 1,36194E-05 X^2 + 3,20998E-07 X^3$$

$$- 2,64266E-09 X^4$$

$$P_a = \frac{W_a P}{0,622 + W_a} \quad (2.23)$$

$$P_s = (a_0 + a_1 T_s + a_2 T_s^2) + (b_0 + b_1 T_s + b_2 T_s^2) X \\ + (c_0 + c_1 T_s + c_2 T_s^2) X^2 \quad (2.24)$$

donde los coeficientes son:

$$a_0 = 4,58208 \quad a_1 = -0,159174 \quad a_2 = 0,0072594$$

$$b_0 = -18,3816 \quad b_1 = 0,5661 \quad b_2 = -0,019314$$

$$c_0 = 21,312 \quad c_1 = -0,666 \quad c_2 = 0,01332$$

2.2.2. FLUJO EN CONTRACORRIENTE

En la figura 2.5 se representa el esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) con el sentido de los flujos de los dos fluidos que intervienen (contracorriente): aire y solución acuosa de cloruro de litio.

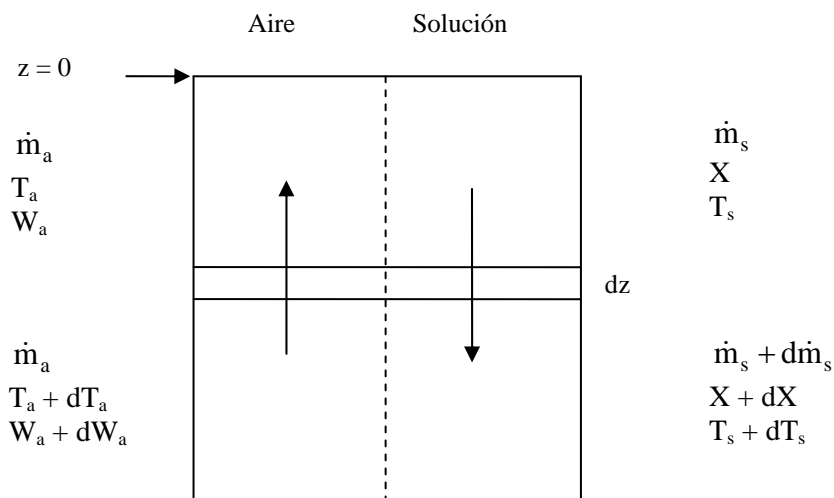


Figura 2.5. Esquema del absorbedor de vapor de agua (deshumidificador) en flujo contracorriente

Se ha considerado un diferencial de volumen en el absorbedor para aplicar las ecuaciones del balance de masa y de energía.

Dado que la sección transversal, S , es constante a lo largo de la altura z , se puede expresar que $dV = Sdz$.

El origen de la variable z se ubica en el extremo superior del absorbedor.

BALANCE DE MASA DEL ABSORBEDOR DE VAPOR (DESHUMIDIFICADOR)

El absorbedor realiza una transferencia de masa (vapor de agua) desde el flujo de aire al flujo de solución. Las ecuaciones diferenciales del balance de masa para el caudal de vapor de agua y para el caudal de la solución respecto de la altura corresponden a las ecuaciones 2.25 y 2.26.

$$\dot{m}_a \frac{dW_a}{dz} = K_G aS(P_a - P_s) \quad (2.25)$$

$$\frac{d\dot{m}_s}{dz} = \dot{m}_a \frac{dW_a}{dz} = K_G aS(P_a - P_s) \quad (2.26)$$

La fracción másica del Cloruro de litio en la solución, X, se expresa en función del caudal de cloruro de litio y del caudal de la solución, ecuación 2.27

$$X = \frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_{LiCl} + \dot{m}_{agua}} = \frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s} \quad (2.27)$$

Como que el caudal de cloruro de litio permanece constante, la derivada de la fracción másica, X, respecto a la altura z, se expresa en la ecuación 2.28

$$\frac{dX}{dz} = \frac{d\left(\frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s}\right)}{dz} = -\frac{\dot{m}_{LiCl}}{\dot{m}_s^2} \frac{d\dot{m}_s}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} \frac{d\dot{m}_s}{dz} \quad (2.28)$$

Combinando las ecuaciones 2.26 y la 2.28, la ecuación diferencial de la fracción másica, X, respecto a la altura z, se expresa en la ecuación 2.29

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} K_G aS(P_a - P_s) \quad (2.29)$$

BALANCE DE ENERGÍA DEL ABSORBEDOR DE VAPOR DE AGUA
 (DESHUMIDIFICADOR)

La transferencia de calor entre el flujo de aire y el flujo de la solución se expresa en la ecuación 2.30.

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = \dot{m}_a \frac{dH_a}{dz} \quad (2.30)$$

A continuación se desarrolla cada uno de los términos de la ecuación 2.30, expresando la transferencia de calor para cada flujo.

La ecuación de la entalpía del aire húmedo es la suma de la entalpía del aire seco y la entalpía del vapor de agua que contiene el aire. En función de la temperatura y humedad absoluta, su expresión es: [11]

$$H_a = 1,005T_a + (2500,9 + 1,82T_a)W_a \quad (2.31)$$

como la temperatura del aire y la humedad absoluta varían en función de la altura z, se realiza la derivación parcial, ecuación 2.32

$$\frac{dH_a}{dz} = \frac{\partial H_a}{\partial T_a} \frac{dT_a}{dz} + \frac{\partial H_a}{\partial W_a} \frac{dW_a}{dz} \quad (2.32)$$

y se obtiene la ecuación del diferencial de entalpía del aire húmedo en la ecuación 2.33

$$\frac{dH_a}{dz} = (1,005 + 1,82W_a) \frac{dT_a}{dz} + (2500,9 + 1,82T_a) \frac{dW_a}{dz} \quad (2.33)$$

Por otra parte, la potencia sensible que intercambia el aire se expresa en la ecuación 2.34

$$\dot{m}_a C_{pm} \frac{dT_a}{dz} = UaS(T_a - T_s) \quad (2.34)$$

como que el calor específico del aire húmedo corresponde a la suma del calor específico del aire seco y del calor específico del vapor de agua que contiene el aire, su expresión es:

$$C_{pm} = 1,005 + 1,82W_a \quad (2.35)$$

por lo que la ecuación 2.34 se puede expresar como sigue

$$\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a) \frac{dT_a}{dz} = UaS(T_a - T_s) \quad (2.36)$$

combinando la ecuación 2.36 con las ecuaciones 2.33 y 2.25, se obtiene la ecuación 2.37

$$\begin{aligned} \frac{dH_a}{dz} = & (1,005 + 1,82W_a) \frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a)} \\ & + \frac{K_G aS}{\dot{m}_a} (2500,9 + 1,82T_a)(P_a - P_s) \end{aligned} \quad (2.37)$$

simplificando la ecuación anterior se obtiene la expresión de la ecuación diferencial de la entalpía del aire húmedo, ecuación 2.38

$$\frac{dH_a}{dz} = \frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a} + \frac{K_G aS}{\dot{m}_a} (2500,9 + 1,82T_a)(P_a - P_s) \quad (2.38)$$

Respecto a la solución, la transferencia de calor que experimenta en el dz, se expresa en la ecuación 2.39

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = H_s \frac{d\dot{m}_s}{dz} + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} \quad (2.39)$$

combinando la ecuación 2.39 con la ecuación 2.26, se obtiene la ecuación 2.40

$$\frac{d(\dot{m}_s H_s)}{dz} = H_s K_G aS(P_a - P_s) + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} \quad (2.40)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.40 y 2.38 en la ecuación 2.30

$$\begin{aligned} H_s K_G a S (P_a - P_s) + \dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} = \\ = U a S (T_a - T_s) + K_G a S (2500,9 + 1,82 T_a) (P_a - P_s) \end{aligned} \quad (2.41)$$

agrupando los términos de la ecuación 2.41, se obtiene la ecuación 2.42

$$\dot{m}_s \frac{dH_s}{dz} = U a S (T_a - T_s) + K_G a S (P_a - P_s) ((2500,9 + 1,82 T_a) - H_s) \quad (2.42)$$

mediante el calor específico de la solución se relaciona el diferencial de entalpía y el diferencial de temperatura de la solución, se expresa en la ecuación 2.43

$$C_{ps} dT_s = dH_s \quad (2.43)$$

derivando la ecuación 2.43 respecto de la z, se obtiene la ecuación 2.44

$$C_{ps} \frac{dT_s}{dz} = \frac{dH_s}{dz} \quad (2.44)$$

sustituyendo la ecuación 2.44 en la ecuación 2.42 se obtiene la ecuación 2.45, que es la ecuación diferencial de la temperatura de la solución

$$\dot{m}_s C_{ps} \frac{dT_s}{dz} = U a S (T_a - T_s) + K_G a S (P_a - P_s) ((2500,9 + 1,82 T_a) - H_s) \quad (2.45)$$

Además de las ecuaciones anteriores es necesario conocer las ecuaciones explícitas de la entalpía de la solución, H_s , de la presión parcial del vapor de agua en el aire, P_a y la presión de vapor de la solución, P_s , además de la ecuación de la entalpía del aire húmedo, 2.31.

La ecuación de la entalpía de la solución, H_s , en función de la temperatura (T_s) y de la fracción másica de cloruro de litio (X), [2] corresponde a la siguiente ecuación:

$$H_s = A + B T_s + C T_s^2 \quad (2.46)$$

donde los coeficientes son:

$$A = -66,2324 + 11,2711 X - 0,79853 X^2 + 2,1534E-02 X^3 - 1,66352E-04 X^4$$

$$B = 4,5751 - 0,146924 X + 6,307226E-03 X^2 - 1,38054E-04 X^3 + 1,06690E-06 X^4$$

$$C = -8,09689E-04 + 2,18145E-04 X - 1,36194E-05 X^2 + 3,20998E-07 X^3$$

$$-2,64266E-09 X^4$$

La presión parcial del vapor de agua en el aire, P_a en función de la humedad absoluta del aire, W_a , y de la presión total del aire, P , se expresa en la ecuación 2.47, [11]

$$P_a = \frac{W_a P}{0,622 + W_a} \quad (2.47)$$

La presión de vapor de la solución, P_s , en función de la temperatura (T_s) y de la fracción másica de cloruro de litio (X), [4] corresponde a la ecuación 2.48

$$P_s = (a_0 + a_1 T_s + a_2 T_s^2) + (b_0 + b_1 T_s + b_2 T_s^2) X + (c_0 + c_1 T_s + c_2 T_s^2) X^2 \quad (2.48)$$

donde los coeficientes son:

$$a_0 = 4,58208 \quad a_1 = -0,159174 \quad a_2 = 0,0072594$$

$$b_0 = -18,3816 \quad b_1 = 0,5661 \quad b_2 = -0,019314$$

$$c_0 = 21,312 \quad c_1 = -0,666 \quad c_2 = 0,01332$$

RECOPIACIÓN DE LAS ECUACIONES OBTENIDAS

A continuación se recopilan las ecuaciones obtenidas en este apartado.

Las ecuaciones diferenciales de las variables independientes son:

$$\frac{dW_a}{dz} = \frac{K_G a S}{\dot{m}_a} (P_a - P_s) \quad (2.25)$$

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{X}{\dot{m}_s} K_G a S (P_a - P_s) \quad (2.29)$$

$$\frac{dT_a}{dz} = \frac{UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_a (1,005 + 1,82W_a)} \quad (2.36)$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{K_G a S (P_a - P_s) (2500,9 + 1,82T_a - H_s) + UaS(T_a - T_s)}{\dot{m}_s C_{ps}} \quad (2.45)$$

Las ecuaciones explícitas del resto de variables son:

$$H_a = 1,005T_a + (2500,9 + 1,82T_a)W_a \quad (2.31)$$

$$H_s = A + BT_s + CT_s^2 \quad (2.46)$$

donde los coeficientes son:

$$A = -66,2324 + 11,2711 X - 0,79853 X^2 + 2,1534E-02 X^3 - 1,66352E-04 X^4$$

$$B = 4,5751 - 0,146924 X + 6,307226E-03 X^2 - 1,38054E-04 X^3 + 1,06690E-06 X^4$$

$$C = -8,09689E-04 + 2,18145E-04 X - 1,36194E-05 X^2 + 3,20998E-07 X^3$$

$$-2,64266E-09 X^4$$

$$P_a = \frac{W_a P}{0,622 + W_a} \quad (2.47)$$

$$P_s = (a_0 + a_1 T_s + a_2 T_s^2) + (b_0 + b_1 T_s + b_2 T_s^2) X \\ + (c_0 + c_1 T_s + c_2 T_s^2) X^2 \quad (2.48)$$

donde los coeficientes son:

$$a_0 = 4,58208 \quad a_1 = -0,159174 \quad a_2 = 0,0072594$$

$$b_0 = -18,3816 \quad b_1 = 0,5661 \quad b_2 = -0,019314$$

$$c_0 = 21,312 \quad c_1 = -0,666 \quad c_2 = 0,01332$$

2.3. CICLO COMPLETO DE LA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO

Estudiada la transferencia de masa y calor entre la solución acuosa de cloruro de litio y el aire en el absorbedor de vapor de agua es necesario estudiar el ciclo completo que precisa la solución acuosa de cloruro de litio para reutilizarla en una instalación en continuo.

En definitiva, se pretende que parte del vapor de agua presente inicialmente en el aire a tratar sea absorbido por la solución acuosa, para después regenerar la solución y así recuperar las condiciones iniciales y volver a circular por el absorbedor para repetir el ciclo de nuevo.

Para el funcionamiento del regenerador se ha utilizado el aire exterior como fluido que absorberá el vapor de agua que cederá la solución acuosa.

Así pues, la instalación requerirá un equipo regenerador, con el funcionamiento inverso al absorbedor, en el que la solución acuosa de cloruro de litio es la que cede el agua que previamente ha absorbido, a un flujo de aire exterior, para ser eliminado.

El absorbedor y el regenerador son dos equipos con funciones contrarias y que han de trabajar en las condiciones que en cada caso sean necesarias para conseguir que en el absorbedor se absorba el vapor de agua del aire (deshumectando el aire a tratar) y en el regenerador se ceda vapor de agua al aire exterior, humectándolo.

El sistema de ecuaciones encontrado en el apartado 2.2 será válido y serán las condiciones de trabajo de cada fluido las que determinarán el sentido de la transferencia de vapor de agua.

Los parámetros de trabajo de la solución acuosa en el absorbedor dependerán de las condiciones iniciales y finales del aire a tratar, según las necesidades de la aplicación que se realice en cada caso.

Los parámetros de trabajo de la solución acuosa en el regenerador dependerán de las condiciones iniciales y finales de la solución en el absorbedor.

Para que la solución ceda el agua al aire exterior en el regenerador se precisa que la presión de vapor de la solución sea mayor que la presión de vapor del aire.

Como la presión de vapor de la solución depende de la temperatura (T_s) y la fracción másica de cloruro de litio en la solución (X) y la fracción másica de cloruro de litio viene impuesta por las condiciones de salida de la solución en el absorbedor, es necesario aportar calor para aumentar la temperatura y así aumentar la presión de vapor de la solución.

De igual manera, a la salida del regenerador, la solución resulta con una temperatura mayor que la necesaria a la entrada del absorbedor, para que la presión de vapor de la solución sea menor que la del aire a tratar y sea el aire el que ceda el vapor de agua a la solución (en el absorbedor) es necesario aportar frío para reducir la temperatura de la solución.

Es decir, es necesario aportar calor a la solución entre la salida del absorbedor y la entrada del regenerador. Y es necesario enfriar la solución entre la salida del regenerador y la entrada del absorbedor.

Será necesario incorporar recuperadores de calor haya donde los parámetros lo permitan, para reducir la demanda de energía total del proceso, e intercambiadores de calor para aportar la potencia frigorífica o la potencia calorífica donde sea necesario.

Para mejorar la eficiencia energética de la instalación y reducir así la demanda de potencia calorífica y potencia frigorífica anteriormente descrita, se utilizará un recuperador de calor entre las dos corrientes de la solución.

La potencia calorífica restante que sea necesario aportar a la solución se realizará mediante un condensador del circuito frigorífico.

La potencia frigorífica restante que sea necesario aportar a la solución se realizará mediante un evaporador del circuito frigorífico.

Por otro lado, el aire exterior que se utilizará para la regeneración de la solución también precisa tratamiento térmico. Será necesario calentarlo para adecuarlo a las condiciones de trabajo de la solución en el regenerador.




Se utilizará un recuperador de calor para enfriar el aire exterior a la salida del regenerador y precalentar el aire antes de entrar al regenerador. Con ello se consigue reducir la demanda de calor. La recuperación de calor que se consiga dependerá de los parámetros de cada aplicación.

La potencia calorífica restante que sea necesario aportar al aire exterior se realizará mediante un condensador del circuito frigorífico.

Finalmente, es importante destacar que se ha de desarrollar adecuadamente el ciclo completo de la solución acuosa para no aumentar el consumo energético de la instalación injustificadamente, sobretodo en la regeneración de la solución.

En la figura 2.6 se muestra un esquema de principio general del ciclo completo de la solución acuosa de cloruro de litio, en flujo en contracorriente tanto en el absorbedor como en el regenerador. Además se muestran las tres corrientes de los fluidos que intervienen en el proceso.

El código de colores utilizado en la figura 2.6 es:

-  Solución acuosa de cloruro de litio
-  Aire a tratar (absorbedor)
-  Aire exterior (regenerador)

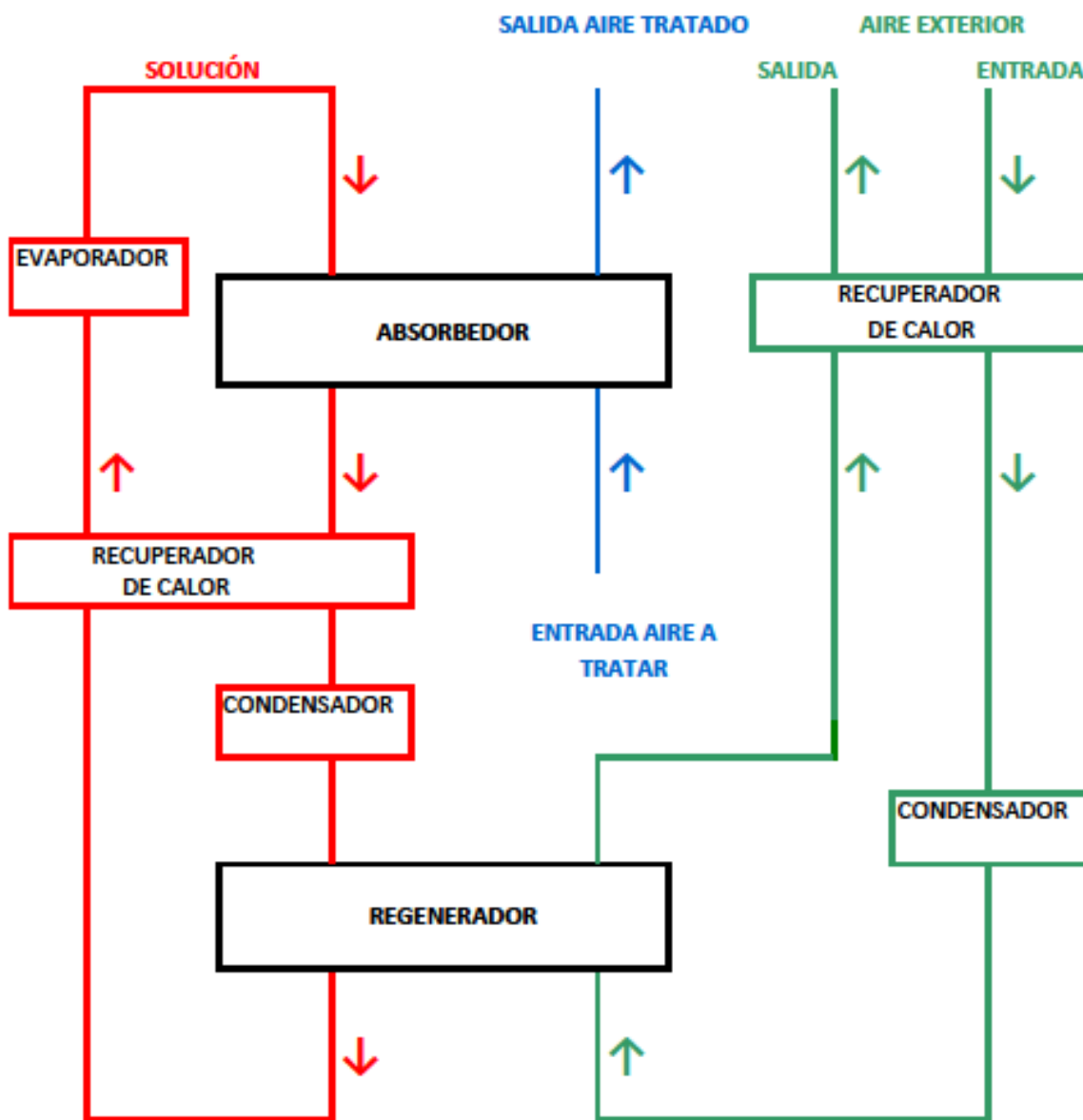


Figura 2.6. Esquema de principio general del ciclo completo de la solución acuosa de cloruro de litio

Dependiendo de las condiciones iniciales del aire a tratar se deberá estudiar qué condiciones de trabajo son necesarias en cada fluido, para conseguir una alternativa a la deshumidificación por circuito frigorífico que solo utiliza un refrigerante primario, que resulte viable energéticamente.

En los siguientes capítulos se ha aplicado, lo aquí explicado, a diferentes procesos de tratamiento del aire para conseguir la deshumectación del mismo, en concreto a dos aplicaciones industriales distintas de temperatura y humedad del aire, que corresponde a dos zonas del diagrama psicrométrico diferentes, para estudiar, analizar y comparar los resultados que se obtienen en cada caso.

Las condiciones iniciales de temperatura y humedad del aire de cada caso han sido seleccionadas, eligiendo algunas de las condiciones de aire habituales en aplicaciones reales.

Los casos estudiados son.

- A. Tratamiento del aire para secaderos industriales de baja temperatura.
- B. Tratamiento del aire para locales con altos aportes de humedad.

En el caso A se han considerado los secaderos industriales de baja temperatura que tienen su amplio campo de utilización en la industria alimentaria en lo relativo a la producción de embutidos: jamón, chorizo, sobrasada, fuet,..., aunque también se aplica en otros sectores como son el de la madera o el de las pieles.

En el caso B se han considerado aquellos locales que tienen altos aportes de humedad por diferentes motivos: locales industriales con maquinaria que desprende humedad, laboratorios en los que la normativa exige la entrada de un alto caudal de aire exterior y/o un nivel de sobrepresión o depresión relativa entre ambientes contiguos, o aquellos ambientes que tienen alta ocupación de personas por la actividad que se desarrolla en su interior.

3 APLICACIÓN A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE EN SECADEROS INDUSTRIALES

3 APLICACIÓN A LA DESHUMECTACIÓN DEL AIRE EN SECADEROS INDUSTRIALES

3.1. INTRODUCCIÓN

Inicialmente, el producto a tratar en un secadero industrial tiene en su composición un porcentaje de agua elevado y el objetivo es reducir ese porcentaje mediante una corriente de aire, convenientemente tratada, que circula entre el producto.

De forma que, el secado del producto se consigue haciendo que parte del agua constitutiva del producto pasa al caudal de aire circulante, consiguiendo secar el producto a la vez que se humecta el aire.

Después, el aire humectado precisa eliminar el agua absorbida para volver a realizar un nuevo ciclo, por lo que el tratamiento del aire en secaderos industriales exige eliminar del aire la humedad absoluta que se desea eliminar en el producto a tratar.

La velocidad de secado dependerá de las características y particularidades del producto, el porcentaje de humedad inicial y humedad final y el tiempo que precisa el agua para pasar del interior a la periferia del producto para finalmente pasar al aire.

Los datos iniciales considerados para realizar los cálculos de un secadero industrial son:

- Producto a tratar (secado) Fuet
- Cantidad inicial de producto 9.406 kg
- Porcentaje de agua a eliminar 25%
- Tiempo de secado 21 días
- Volumen de la cámara 102 m³

- Temperatura interior del secadero 14°C
- Humedad relativa interior del secadero 70°C
- Caudal de aire a tratar (58 recirculaciones/h)..... 5.920 m³/h

De los datos iniciales se desprende que el agua que será necesario eliminar del producto y consecuentemente del aire a tratar, es:

$$\text{Agua a eliminar} = 25\% \times 9.406 \text{ kg} = 2.351,5 \text{ kg de agua}$$

$$\text{Caudal agua a eliminar} = \frac{2.351,5 \text{ kg agua}}{(24 \text{ horas} \times 21 \text{ días})} = 4,6657 \text{ kg/h} = 1,2960 \text{ g/s}$$

Y el caudal másico de aire a tratar, (depende de las recirculaciones que precisa la aplicación para garantizar una correcta distribución por toda la cámara) considerando el volumen específico de 0,822 kg/m³, es:

$$\text{Caudal de aire} = \frac{5.920 \text{ m}^3/\text{h}}{0,822 \text{ kg/m}^3} = 7.200 \text{ kg/h} = 2 \text{ kg/s}$$

Para familiarizar al lector, a continuación se muestran dos imágenes de secaderos de jamón y fuet respectivamente, en las figuras 3.1 y 3.2.



Figura 3.1. Secadero industrial de jamón



Figura 3.2. Secadero industrial de fuet

A continuación se exponen cuatro procesos alternativos distintos para conseguir tratar el caudal de aire necesario para la aplicación elegida (2 kg/s) y eliminar el caudal de agua deseado en el producto (1,2960 g/s), que se encuentra en una cámara a 14°C y 70% de humedad relativa.

3.2. TRATAMIENTO DEL AIRE EN SECADEROS INDUSTRIALES

3.2.1. PROCESO 1 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO

Se trata del primer proceso que se plantea y es el tradicionalmente utilizado en la mayoría de los secaderos industriales a baja temperatura.

El proceso lo forman dos etapas.

- Etapa 1: Deshumectación

Consiste en enfriar el caudal de aire, procedente de la cámara, a través del evaporador de un circuito frigorífico para suministrarle la potencia frigorífica necesaria y conseguir reducir la humedad absoluta a los valores necesarios para eliminar el caudal de agua requerido. (De A a B en figuras 3.3 y 3.4)

- Etapa 2: Calefacción

Consiste en calentar el caudal de aire procedente del evaporador, ya que a la salida del evaporador se encuentra a baja temperatura y baja humedad absoluta, pero muy próximo a la saturación, entorno al 95%, por lo que es necesario suministrarle potencia calorífica para que aumente su temperatura manteniendo la humedad absoluta constante. Lo más eficaz energéticamente es utilizar la potencia del condensador del mismo circuito frigorífico. (De B a C en figuras 3.3 y 3.4)

De esta forma el aire a la salida del condensador frigorífico está en las condiciones adecuadas para volver a realizar un nuevo ciclo. Mediante un ventilador será impulsado hacia la cámara, para absorber de nuevo el agua del producto y volver al evaporador y posteriormente al condensador.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 3.3:

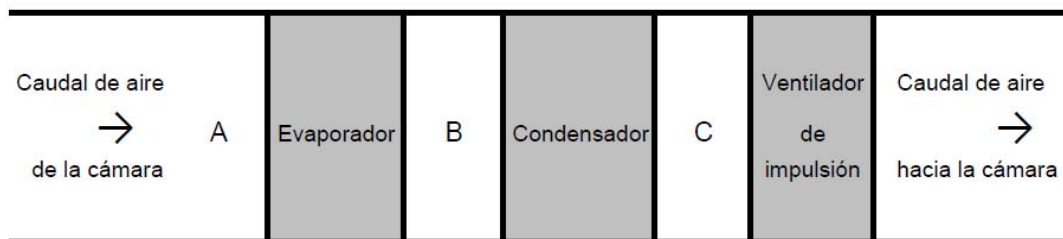


Figura 3.3. Esquema de principio del tratamiento de aire en un secadero industrial convencional. Proceso 1.

La figura 3.4 representa, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, las dos etapas que se desean realizar en el aire.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

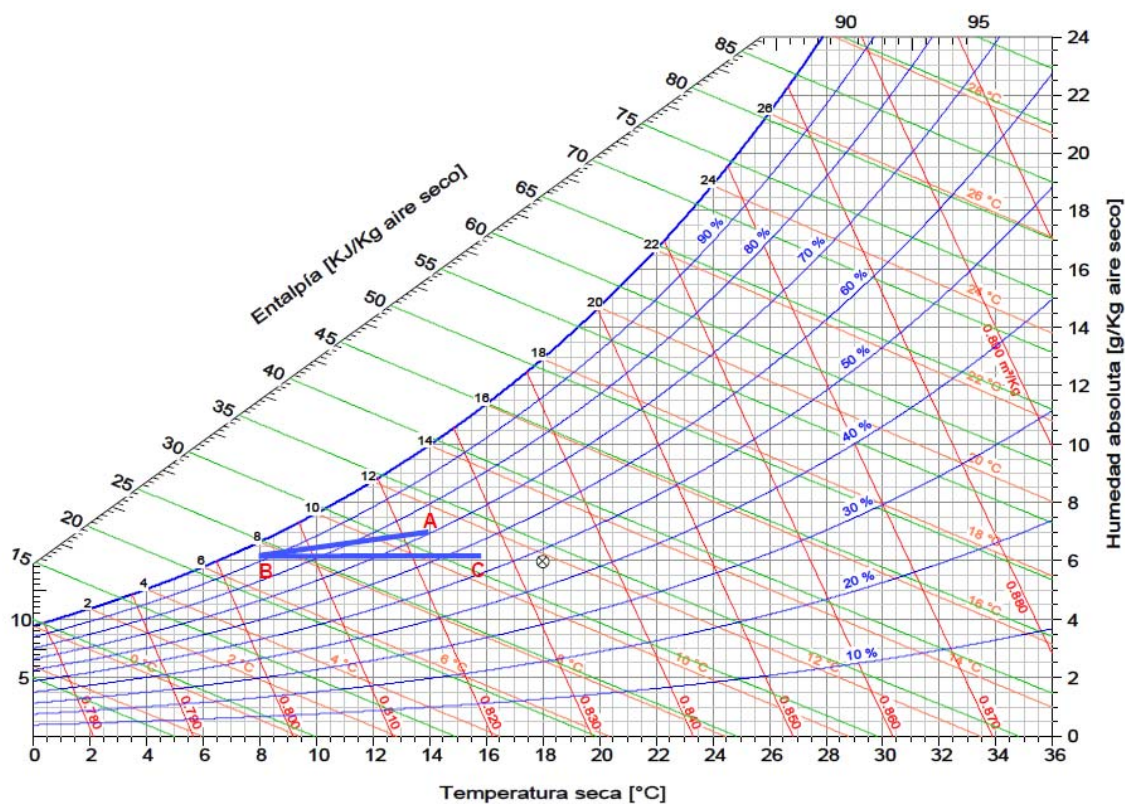


Figura 3.4. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial. Proceso 1

En la tabla 3.1 de detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES				
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C
T _a	°C	14	8	15,613
H _{rel}	%	70	95	57,3
W _a x 1000	g agua/kg aire	6,950	6,302	6,302
H _a	kJ/kg	31,628	23,890	31,628

Tabla 3.1. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 1

La potencia frigorífica que es necesario suministrar al aire en el evaporador se obtiene mediante la expresión:

$$P_F = \dot{m}_a (h_A - h_B) = 2 \text{ kg/s} (31,628 - 23,890) \text{ kJ/kg} = 15,477 \text{ kW}$$

Para suministrar la potencia frigorífica obtenida, es necesario que la temperatura de evaporación del circuito frigorífico sea menor que la temperatura de salida del aire, que es de 8°C.

Cuanto menor sea la temperatura de evaporación, mayor será el incremento medio logarítmico de temperaturas en el evaporador y menor superficie de intercambio será necesaria, pero menor será el CEE y mayor será el consumo eléctrico del circuito.

El incremento térmico que se ha considerado, para todos los procesos, para poder comparar resultados, es de 5°C, que además es el incremento térmico económico, a la práctica muy utilizado, como solución de compromiso entre consumo del circuito frigorífico y el coste de inversión del equipo.

Es este caso la temperatura de evaporación es de $8 - 5 = 3^\circ\text{C}$

La potencia calorífica que precisa el aire en el condensador se obtiene mediante la expresión:

$$P_C = \dot{m}_a (h_C - h_B) = 2 \text{ kg/s} (31,628 - 23,890) \text{ kJ/kg} = 15,477 \text{ kW}$$

Se observa que en esta aplicación la potencia calorífica necesaria coincide con la potencia frigorífica necesaria, cuando es sabido que en cualquier circuito frigorífico la potencia calorífica siempre es superior a la potencia frigorífica.

Como consecuencia, habrá un excedente de calor que se podría utilizar en otras demandas térmicas que pudiesen haber, pero para no depender de ello, se ha considerado que no se utiliza y que será necesario ceder al aire exterior.

Se concluye de lo anterior que el circuito frigorífico simple no se podría utilizar para esta aplicación sino que se ha de modificar para aplicarlo a un secadero industrial.

El circuito frigorífico para secaderos necesita disponer de dos condensadores:

- Condensador interior, encargado de suministrar la potencia calorífica necesaria al aire a tratar, en la segunda etapa del proceso
- Condensador exterior al secadero, encargado de ceder al aire exterior el excedente de calor, para no ceder más calor del deseado en el condensador interior, que provocaría un aumento de la temperatura interior de la cámara que afectaría dañando el producto.

Se ha elegido la temperatura del aire exterior, promedio anual, de 20°C.

Considerando que el salto térmico del aire en los condensadores frigoríficos que se fabrican se encuentra entorno a 10°C, la temperatura del aire a la salida del condensador será de 30°C, por lo que análogamente a lo explicado en el evaporador, la temperatura de condensación ha de ser 5°C mayor, es decir 35°C.

El circuito frigorífico que aportara la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesaria, tendría la temperatura de evaporación de 3°C y la temperatura de condensación de 35°C,

por lo se puede conocer el CEE del compresor del circuito frigorífico, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$CEE = \frac{0,45 (273 + 3)}{(35 - 3)} = 3,881$$

y como es sabido que

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{CEE}$$

aplicándolo en este caso, la potencia absorbida que se obtiene es::

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{15,477}{3,881} = 3,988 \text{ kW}$$

con lo que se puede obtener la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representará el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseada.

En este caso resulta de:

$$3,988 \text{ kW} / 1,2960 \text{ g/s} = 3,077 \text{ kJ/g, que equivale a } 3,077 \text{ kJ/kg agua}$$

En el apartado 3.2.5 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los cuatro procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que es este proceso el que presenta el peor valor obtenido, por ser el consumo más alto de los cuatro procesos.

3.2.2. PROCESO 2 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO MEJORADO

Se trata del segundo proceso que se presenta como alternativa para la deshumidificación del aire en el secadero elegido.

Este proceso es una modificación del proceso anterior para conseguir reducir la potencia frigorífica necesaria y el consumo energético resultante, con lo que la eficiencia energética del compresor frigorífico aumenta.

El proceso lo forman dos etapas.

- Etapa 1: Deshumidificación

Consiste en hacer circular una parte del caudal de aire (solo el caudal de aire necesario), procedente de la cámara, a través del evaporador de un circuito frigorífico para suministrarle la potencia frigorífica necesaria para conseguir reducir la humedad absoluta a los valores necesarios para eliminar el caudal de agua requerido. (De A a B' en figuras 3.5 y 3.6). El resto del caudal de aire que se ha de recircular atravesará una compuerta motorizada instalada en paralelo, que no modifica las propiedades del aire. A la salida del evaporador se produce la mezcla de los dos caudales de aire.

- Etapa 2: Calefacción

Consiste en calentar el caudal de aire resultante de la mezcla, que se encuentra con una humedad relativa alta y precisa que se le suministre potencia calorífica para que aumente su temperatura manteniendo la humedad absoluta constante. Lo más eficaz energéticamente es utilizar la potencia del condensador del mismo circuito frigorífico. (De M a C en figuras 3.5 y 3.6)

A continuación se justifica la base de su funcionamiento.

La potencia frigorífica total que se suministra al aire se divide en dos: potencia frigorífica sensible, destinada al enfriamiento del aire y potencia frigorífica latente, destinada a la deshumectación del aire.

El factor de calor sensible, F_{cs} , relaciona la potencia frigorífica sensible y la potencia frigorífica total (sensible y latente).

Cuando el F_{cs} es alto, próximo a la unidad, indica que la mayor parte de la potencia frigorífica suministrada al aire es sensible, el aire se enfriará mucho pero como la potencia latente será muy pequeña, el aire se deshumectará poco.

En un secadero industrial, el objetivo es potenciar la deshumectación, lo que se desea es aumentar la potencia frigorífica latente y ello se consigue si el F_{cs} del proceso de enfriamiento del aire es pequeño. Cuanto menor sea el F_{cs} del proceso, mayor deshumectación del aire se conseguirá, porque el proceso tendrá más potencia frigorífica latente.

En el diagrama psicrométrico se representa gráficamente el F_{cs} con una pendiente que será paralela a la recta de unión entre el punto de entrada y el punto de salida del aire en el evaporador.

Cuanto mayor pendiente tenga la recta, mayor deshumectación se conseguirá siendo el límite la pendiente que se consigue con la tangente a la curva de saturación del aire que pasa por el punto de entrada al evaporador.

En la unidad de tratamiento de aire se consigue disminuir el F_{cs} reduciendo el caudal de aire que atraviesa el evaporador. Es decir, para aumentar la potencia frigorífica latente, el caudal de aire a tratar se ha de dividir en dos partes: una parte atraviesa el evaporador (de A a B' en figuras 3.5 y 3.6) y el resto de caudal de aire pasará a través de una compuerta motorizada instalada en paralelo al evaporador, sin modificar sus parámetros. El caudal que atraviesa el evaporador será el necesario para conseguir el F_{cs} deseado.

Después de evaporador, se unen las dos corrientes de aire, la que ha sido tratada y deshumidificada y la que solamente ha atravesado la compuerta. La mezcla de los dos caudales de aire es el punto M en las figuras 3.5 y 3.6.

El aire mezclado atravesará el condensador frigorífico para aumentar su temperatura manteniendo la humedad absoluta constante. (De M a C en figuras 3.5 y 3.6)

De esta forma el aire a la salida del condensador frigorífico está en las condiciones adecuadas para volver a realizar un nuevo ciclo: Mediante un ventilador será impulsado hacia la cámara, para absorber de nuevo el agua del producto y volver a hacer el proceso.

Si se aplica esta metodología al caso que se está estudiando, se obtendría una temperatura de salida del aire muy baja que exigiría una temperatura de evaporación inferior a 0°C, provocando la formación de hielo en el evaporador y sería necesario incorporar en la unidad algún sistema de desescarches, que además de encarecer la unidad, obligaría a parar la instalación regularmente mientras se ejecuta la función de desescarhe.

Para evitar estos inconvenientes y dotar de total libertad de funcionamiento a la unidad, se ha elegido la menor temperatura de salida del aire del evaporador que garantice que no se forme hielo, 5°C, y la temperatura de evaporación será de 0°C.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 3.5:

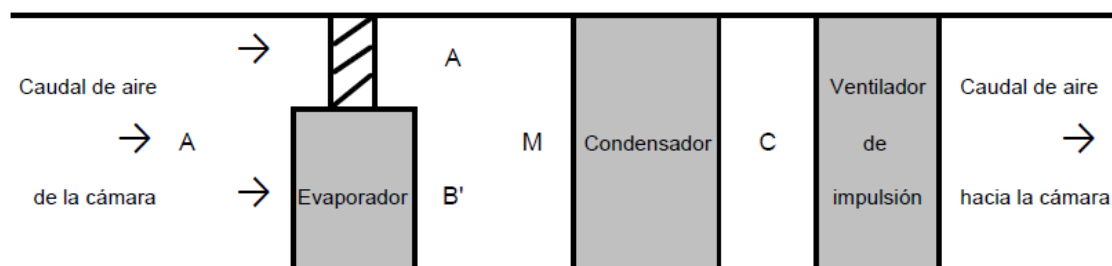


Figura 3.5. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial mejorado. Proceso 2

En la figura 3.6 se representan, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, las dos etapas que se desean realizar en el aire.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

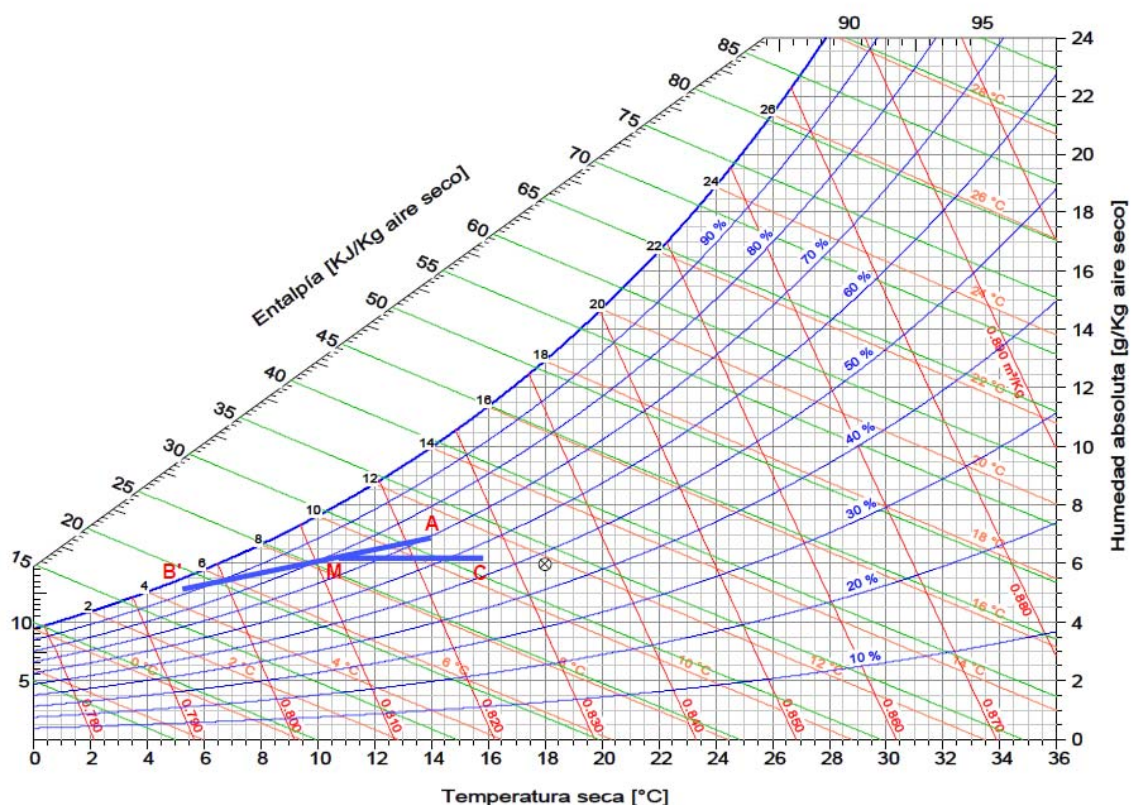


Figura 3.6. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial convencional mejorado. Proceso 2

En la tabla 3.2 se detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES					
VARIABLE	UNIDADES	A	B'	M	C
Ta	°C	14	5	10,80	15,613
Hrel	%	70	95		57,3
Wa x 1000	g agua/kg aire	6,950	5,130	6,302	6,302
Ha	kJ/kg	31,628	17,901	26,734	31,628

Tabla 3.2. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 2

El caudal de aire que es necesario que circule por el evaporador, \dot{m}'_a se obtiene a partir del caudal de agua a eliminar (1,2960 g agua/s) y la variación de humedad absoluta del aire en el evaporador (entre los puntos de entrada y salida del aire).

$$\dot{m}'_a = \frac{1,2960 \text{ g agua/s}}{(6,95 - 5,13) \text{ g agua / kg aire}} = 0,7121 \text{ kg aire/s}$$

La potencia frigorífica que es necesario suministrar al aire en el evaporador se obtiene mediante la expresión:

$$P_F = \dot{m}'_a (h_A - h_{B'}) = 0,7121 \text{ kg aire/s} (31,628 - 17,901) \text{ kJ/kg} = 9,775 \text{ kW}$$

La temperatura de evaporación del circuito frigorífico elegida, como ya se ha explicado, es de 0°C

En cuanto a la temperatura de condensación, análogamente a lo explicado en el proceso 1, se ha elegido de 35°C.

Así pues, el circuito frigorífico que aportara la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesaria, tendría la temperatura de evaporación de 0°C y la temperatura de condensación de 35°C, por lo se puede conocer el CEE del compresor del circuito frigorífico, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$CEE = \frac{0,45 (273 + 0)}{(35 - 0)} = 3,510$$

el valor obtenido es menor que el anterior, (3,881) debido a que la temperatura de evaporación es menor.

Y como es sabido que

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{CEE}$$

aplicándolo en este caso, la potencia absorbida que se obtiene es:

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{9,755}{3,51} = 2,785 \text{ kW}$$

el valor obtenido es menor que el anterior, (3.988 kW).

A pesar de tener este proceso menor eficiencia energética en el consumo del compresor, que el proceso 1, resulta con menor consumo energético para conseguir la misma deshumidificación del aire, debido a que es necesario menos potencia frigorífica total al haber aumentado la parte de la potencia frigorífica latente.

Finalmente, para este proceso, la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representa el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseada. es de:

$$2,785 \text{ kW} / 1,2960 \text{ g/s} = 2,149 \text{ kJ/g, que equivale a } 2.149 \text{ kJ/kg de agua}$$

En el apartado 3.2.5 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los cuatro procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que en este proceso se ha obtenido un consumo energético en el compresor del 69,83% del consumo obtenido en el proceso 1, por lo que energéticamente es mejor el proceso 2 que el proceso 1.

3.2.3. PROCESO 3 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 1

Se trata del tercer proceso que se presenta como alternativa para la deshumidificación del aire en el secadero elegido.

En este caso se pretende el mismo objetivo que en los procesos anteriores, conseguir las mismas condiciones finales del aire a partir de las mismas condiciones iniciales, mediante la utilización de una instalación frigorífica que combina el uso de un refrigerante primario y la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

En la alternativa 1, el proceso que se ha elegido consiste en hacer el tratamiento del aire en un solo paso, utilizando el absorbedor a contracorriente explicado en el apartado 2.2.2. (De A a B en figuras 3.7 y 3.8).

El proceso se realiza en una sola etapa.

- Etapa 1: Deshumidificación

Consiste en hacer circular el caudal de aire a tratar, procedente de la cámara, a través del absorbedor para reducir la humedad absoluta a los valores necesarios para eliminar el caudal de agua requerido. (De A a B en figuras 3.7 y 3.8).

El absorbedor tendrá, en flujo a contracorriente, la solución acuosa de cloruro de litio en los valores adecuados para conseguir los valores finales del aire directamente a la salida del absorbedor.

Será necesario la regeneración de la solución para ceder el agua absorbida al aire exterior.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 3.7:

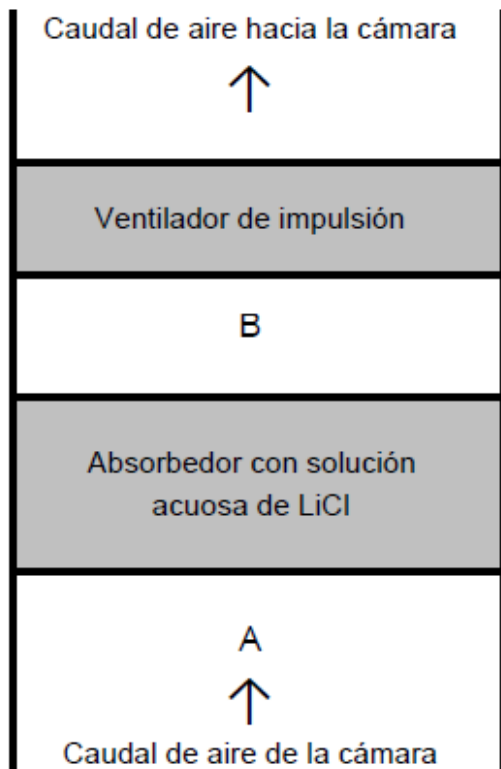


Figura 3.7. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

En la tabla 3.3 se detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES			
VARIABLE	UNIDADES	A	B
Ta	°C	14	15,61
Wa x 1000	g agua/kg aire	6,950	6,302
Ha	kJ/kg	31,628	31,628
Pa	Pa	1104	1002
ma	kg/s	2	2

Tabla 3.3. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 3

En la figura 3.8 se representan, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, el proceso que tiene lugar en aire.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

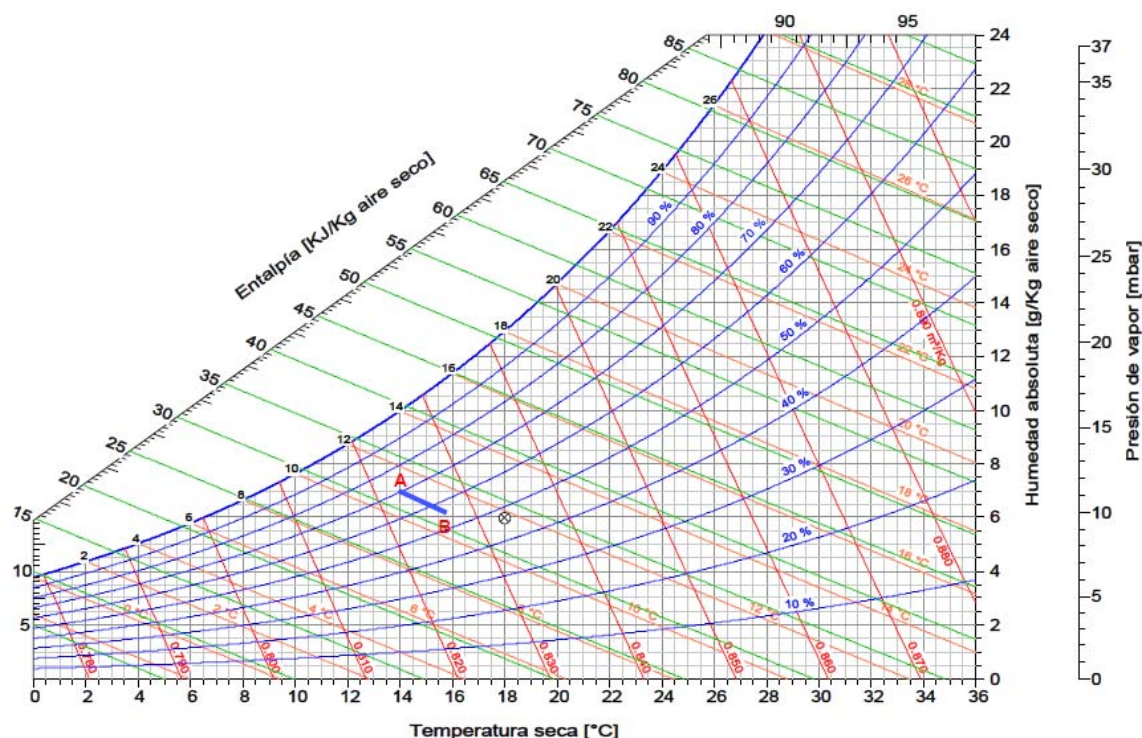


Figura 3.8. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

Para conseguir que el aire a tratar realice este proceso se precisa que todos los valores de las variables de los flujos que intervienen tenga los valores adecuados que lo permitan. Por lo que se hace necesario la definición de todos los flujos y valores de las variables del ciclo completo explicado en el capítulo 2, apartado 2.3.

La figura 3.9 muestra el esquema de principio global del proceso.

El código de colores utilizado en la figura 3.9 es:

- — Solución acuosa de cloruro de litio
- — Aire a tratar (absorbedor)
- — Aire exterior (regenerador)

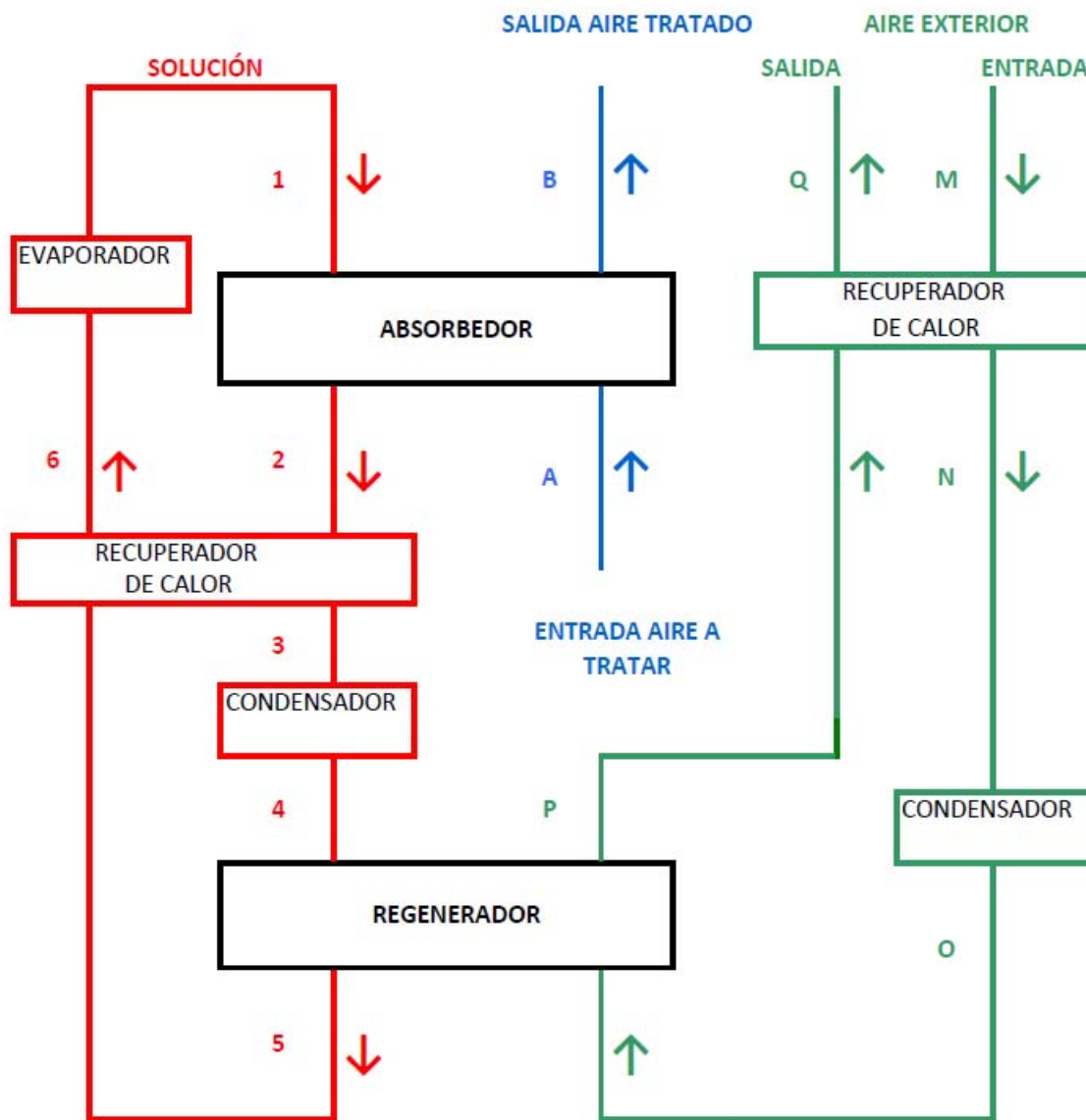


Figura 3.9. Esquema de principio general del proceso 3

Las tablas 3.4 y 3.5 recopilan los valores de las variables del aire y de la solución que intervienen en el proceso.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA EL AIRE								
VARIABLE	UNIDADES	A	B	M	N	O	P	Q
Ta	°C	14	15,61	20	21,185	27,93	26,18	25
Wa x 1000	g agua/kg aire	6,950	6,302	7,26	7,26	7,26	8,556	8,556
Ha	kJ/kg	31,628	31,628	38,540	39,727	46,590	48,120	46,912
Pa	Pa	1104	1002	1152	1152	1152	1355	1355
ma	kg/s	2	2	1	1	1	1	1

Tabla 3.4. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 3

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO							
VARIABLE	UNIDADES	1	2	3	4	5	6
X	% kgLiCl/Kgsolución	31	30,94	30,94	30,94	31,00	31,00
Ts (°C)	g agua/kg aire	17,63	17,60	20,32	26,00	25,32	22,60
Hs	kJ/kg	55,740	55,470	63,495	80,289	78,470	70,433
Ps	Pa	884	886		1422	1361	
ms	kg/s	0,7097	0,7110	0,7110	0,7110	0,7097	0,7097

Tabla 3.5. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

A continuación se explica el desarrollo de este proceso.

ABSORBEDOR

Es el equipo en el que la mezcla acuosa de cloruro de litio deshumidifica el caudal de aire que se ha de tratar, absorbiendo la cantidad de vapor de agua sobrante, presente en el aire inicialmente. En este caso se ha elegido el caudal de aire vertical, ascendente y la solución vertical descendente.

En las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran tres tipos de relleno interno de un absorbedor, que actúan como superficie de intercambio térmico y másico entre el aire y la solución.

Para un buen funcionamiento necesita que se realice la distribución de la solución por toda la superficie frontal del relleno, para asegurar la correcta transmisión de masa y calor.

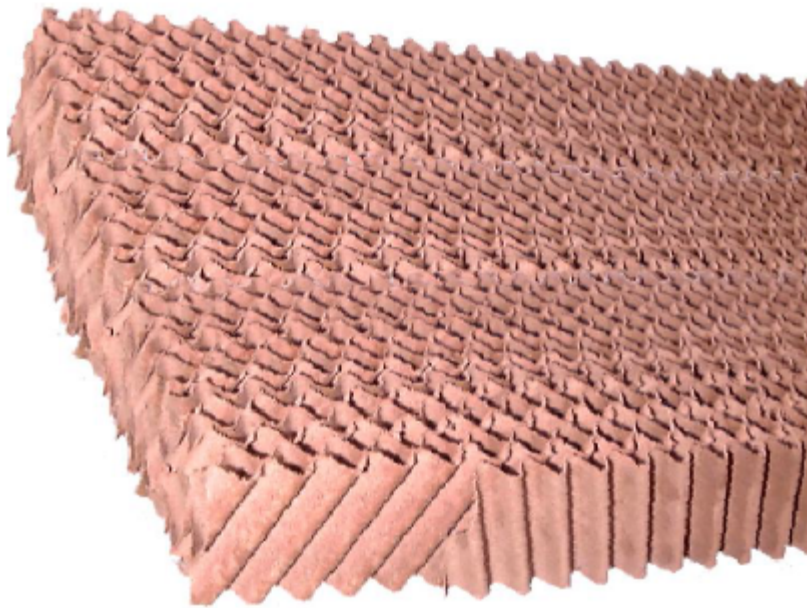


Figura 3.10. Relleno interno de un absorbedor de vapor de agua



Figura 3.11. Relleno interno de un absorbedor de vapor de agua

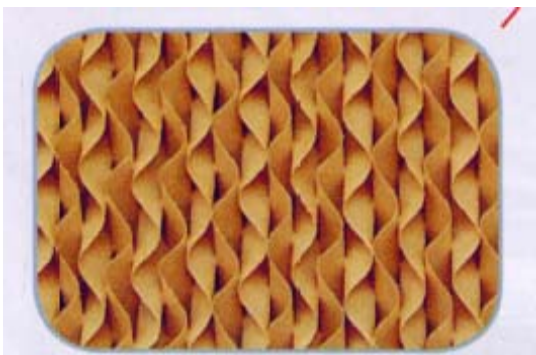


Figura 3.12. Detalle del relleno interno de un absorbedor de vapor de agua

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que el aire realice el proceso descrito (de A a B), se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al absorbedor de la solución acuosa de cloruro de litio, se han obteniendo los valores de la solución acuosa de cloruro de litio a la salida del mismo, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del absorbedor, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 15,61 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,006302 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 31,628 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.002 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 0,7097 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 17,63 \text{ °C}$$

$$X = 31\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 55,74 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 884 \text{ Pa}$$

Para el calor específico de la solución, a partir de las ecuaciones 2.43, y 2.46 se ha utilizado la expresión:

$$C_{ps} = \frac{dH_s}{dT_s} = B + (2CT_s)$$

Para el absorbedor, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 0,7 \text{ m}^2 \text{ (0,7 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Para el coeficiente de transferencia de masa, K_G , se ha utilizado la expresión que iguala la transferencia de masa del vapor de agua en el aire, en función de la diferencia de presiones de vapor entre las condiciones del aire y las condiciones del aire en equilibrio con la solución en aquel punto y en función de la diferencia de humedad absoluta entre las condiciones del aire y las condiciones del aire en equilibrio con la solución en el mismo punto.

$$K_G (P_a - P_s) = K_Y (W_a - W_s)$$

Considerando que para el aire, el coeficiente de transferencia de masa K_Y cumple con la siguiente expresión [11]

$$\frac{U}{K_Y} = 950 \text{ J/KgK}$$

combinando ambas expresiones se obtiene

$$K_G = \frac{U(W_a - W_s)}{950(P_a - P_s)}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el absorbedor, se muestran a continuación.

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0063020	31,00	15,610	17,625	31,628	55,740	1002	884	0,70968
0,0037560	0,0063145	31,00	15,578	17,624	31,627	55,734	1003	884	0,70970
0,0048928	0,0063183	31,00	15,569	17,624	31,627	55,732	1004	884	0,70971
0,0060296	0,0063221	31,00	15,559	17,624	31,627	55,729	1005	884	0,70971
0,0071664	0,0063260	31,00	15,549	17,623	31,627	55,727	1005	884	0,70972
0,0094400	0,0063338	31,00	15,529	17,623	31,626	55,723	1006	884	0,70974
0,0105768	0,0063377	31,00	15,520	17,622	31,626	55,721	1007	884	0,70974
0,0117136	0,0063416	31,00	15,510	17,622	31,626	55,719	1008	884	0,70975
0,0128504	0,0063456	31,00	15,500	17,622	31,626	55,717	1008	884	0,70976
0,0151240	0,0063535	31,00	15,479	17,621	31,625	55,712	1009	884	0,70978
0,0162608	0,0063576	31,00	15,469	17,621	31,625	55,710	1010	884	0,70978
0,0173976	0,0063616	30,99	15,459	17,621	31,625	55,708	1011	884	0,70979
0,0185344	0,0063656	30,99	15,449	17,620	31,625	55,706	1011	884	0,70980
0,0208080	0,0063738	30,99	15,428	17,620	31,625	55,701	1013	884	0,70982
0,0219448	0,0063779	30,99	15,418	17,619	31,625	55,699	1013	884	0,70983
0,0230816	0,0063821	30,99	15,407	17,619	31,624	55,697	1014	884	0,70983
0,0242184	0,0063862	30,99	15,397	17,619	31,624	55,695	1015	884	0,70984
0,0264920	0,0063946	30,99	15,376	17,618	31,624	55,691	1016	884	0,70986
0,0276288	0,0063988	30,99	15,365	17,618	31,624	55,689	1017	884	0,70987
0,0287656	0,0064030	30,99	15,355	17,618	31,624	55,686	1017	884	0,70988
0,0299024	0,0064073	30,99	15,344	17,617	31,624	55,684	1018	884	0,70988
0,0321760	0,0064159	30,99	15,322	17,617	31,623	55,680	1019	884	0,70990
0,0333128	0,0064202	30,99	15,311	17,616	31,623	55,678	1020	884	0,70991
0,0344496	0,0064246	30,99	15,301	17,616	31,623	55,676	1021	884	0,70992
0,0355864	0,0064289	30,99	15,290	17,616	31,623	55,674	1021	884	0,70993
0,0378600	0,0064377	30,99	15,268	17,615	31,623	55,669	1023	884	0,70994
0,0389968	0,0064422	30,99	15,256	17,615	31,623	55,667	1023	884	0,70995
0,0401336	0,0064466	30,99	15,245	17,615	31,623	55,665	1024	885	0,70996
0,0412704	0,0064511	30,99	15,234	17,615	31,623	55,663	1025	885	0,70997
0,0435440	0,0064601	30,99	15,211	17,614	31,622	55,659	1026	885	0,70999
0,0446808	0,0064646	30,99	15,200	17,614	31,622	55,656	1027	885	0,71000
0,0458176	0,0064692	30,99	15,189	17,614	31,622	55,654	1028	885	0,71001
0,0469544	0,0064738	30,99	15,177	17,613	31,622	55,652	1028	885	0,71002
0,0492280	0,0064830	30,98	15,154	17,613	31,622	55,648	1030	885	0,71003
0,0503648	0,0064877	30,98	15,142	17,613	31,622	55,646	1031	885	0,71004

Tabla 3.6 Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,0515016	0,0064924	30,98	15,131	17,612	31,622	55,643	1031	885	0,71005
0,0526384	0,0064971	30,98	15,119	17,612	31,622	55,641	1032	885	0,71006
0,0549120	0,0065066	30,98	15,095	17,612	31,622	55,637	1033	885	0,71008
0,0560488	0,0065113	30,98	15,083	17,611	31,622	55,635	1034	885	0,71009
0,0571856	0,0065161	30,98	15,071	17,611	31,622	55,633	1035	885	0,71010
0,0583224	0,0065209	30,98	15,059	17,611	31,622	55,631	1036	885	0,71011
0,0605960	0,0065307	30,98	15,035	17,611	31,622	55,626	1037	885	0,71013
0,0617328	0,0065355	30,98	15,023	17,610	31,622	55,624	1038	885	0,71014
0,0628696	0,0065405	30,98	15,011	17,610	31,622	55,622	1039	885	0,71015
0,0640064	0,0065454	30,98	14,998	17,610	31,621	55,620	1040	885	0,71016
0,0662800	0,0065554	30,98	14,974	17,609	31,621	55,615	1041	885	0,71018
0,0674168	0,0065604	30,98	14,961	17,609	31,621	55,613	1042	885	0,71019
0,0685536	0,0065654	30,98	14,949	17,609	31,621	55,611	1043	885	0,71020
0,0696904	0,0065705	30,98	14,936	17,609	31,621	55,609	1044	885	0,71021
0,0719640	0,0065807	30,98	14,911	17,608	31,621	55,605	1045	885	0,71023
0,0731008	0,0065858	30,98	14,898	17,608	31,621	55,602	1046	885	0,71024
0,0742376	0,0065910	30,97	14,885	17,608	31,621	55,600	1047	885	0,71025
0,0753744	0,0065962	30,97	14,872	17,608	31,621	55,598	1048	885	0,71026
0,0776480	0,0066066	30,97	14,846	17,607	31,621	55,594	1049	885	0,71028
0,0787848	0,0066119	30,97	14,833	17,607	31,621	55,592	1050	885	0,71029
0,0799216	0,0066172	30,97	14,820	17,607	31,621	55,589	1051	885	0,71030
0,0810584	0,0066225	30,97	14,807	17,607	31,621	55,587	1052	885	0,71031
0,0833320	0,0066332	30,97	14,780	17,607	31,622	55,583	1053	885	0,71033
0,0844688	0,0066386	30,97	14,767	17,606	31,622	55,581	1054	885	0,71035
0,0856056	0,0066440	30,97	14,753	17,606	31,622	55,578	1055	885	0,71036
0,0867424	0,0066495	30,97	14,740	17,606	31,622	55,576	1056	885	0,71037
0,0890160	0,0066604	30,97	14,713	17,606	31,622	55,572	1058	885	0,71039
0,0901528	0,0066660	30,97	14,699	17,606	31,622	55,570	1058	885	0,71040
0,0912896	0,0066715	30,97	14,685	17,605	31,622	55,568	1059	885	0,71041
0,0924264	0,0066771	30,97	14,671	17,605	31,622	55,565	1060	885	0,71042
0,0947000	0,0066884	30,97	14,644	17,605	31,622	55,561	1062	885	0,71044
0,0958368	0,0066940	30,97	14,630	17,605	31,622	55,559	1063	885	0,71046
0,0969736	0,0066997	30,97	14,616	17,605	31,622	55,557	1064	885	0,71047
0,0981104	0,0067055	30,96	14,601	17,604	31,622	55,554	1065	885	0,71048
0,1003840	0,0067170	30,96	14,573	17,604	31,622	55,550	1066	885	0,71050

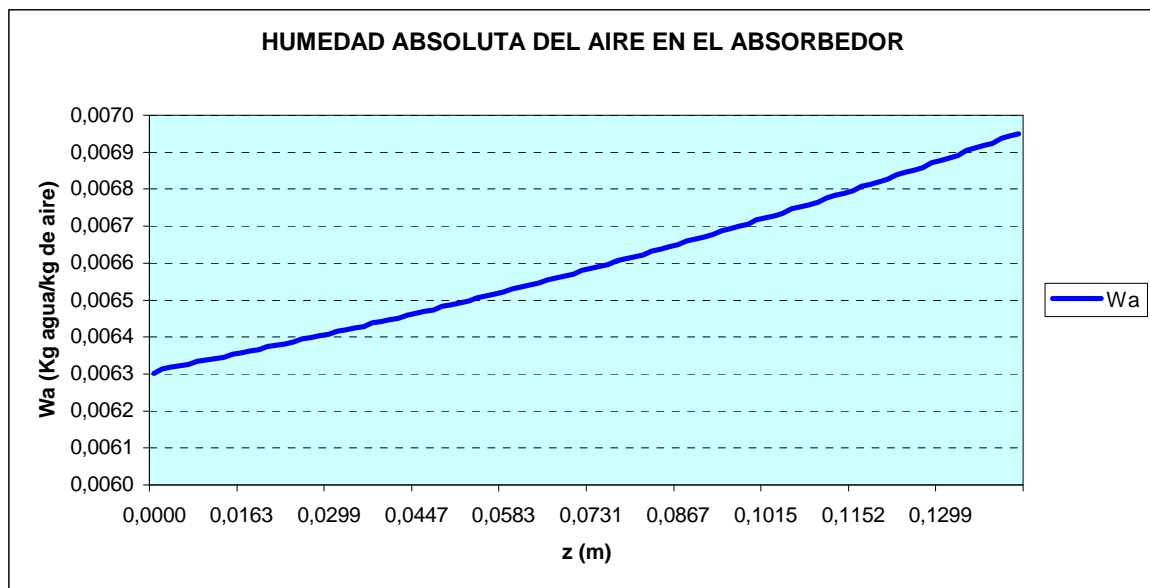
Tabla 3.6. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1015208	0,0067228	30,96	14,559	17,604	31,622	55,548	1067	885	0,71051
0,1026576	0,0067286	30,96	14,544	17,604	31,623	55,546	1068	885	0,71052
0,1037944	0,0067345	30,96	14,530	17,604	31,623	55,543	1069	886	0,71054
0,1060680	0,0067463	30,96	14,500	17,603	31,623	55,539	1071	886	0,71056
0,1072048	0,0067523	30,96	14,486	17,603	31,623	55,537	1072	886	0,71057
0,1083416	0,0067582	30,96	14,471	17,603	31,623	55,534	1073	886	0,71058
0,1094784	0,0067643	30,96	14,456	17,603	31,623	55,532	1074	886	0,71060
0,1117520	0,0067764	30,96	14,426	17,603	31,623	55,528	1076	886	0,71062
0,1128888	0,0067825	30,96	14,411	17,603	31,623	55,526	1077	886	0,71063
0,1140256	0,0067886	30,96	14,396	17,603	31,624	55,523	1078	886	0,71064
0,1151624	0,0067947	30,96	14,381	17,602	31,624	55,521	1079	886	0,71066
0,1174360	0,0068072	30,96	14,350	17,602	31,624	55,517	1081	886	0,71068
0,1185728	0,0068134	30,96	14,335	17,602	31,624	55,514	1082	886	0,71069
0,1197096	0,0068197	30,95	14,320	17,602	31,624	55,512	1083	886	0,71071
0,1208464	0,0068260	30,95	14,304	17,602	31,624	55,510	1084	886	0,71072
0,1231200	0,0068387	30,95	14,273	17,602	31,625	55,505	1086	886	0,71074
0,1242568	0,0068451	30,95	14,257	17,602	31,625	55,503	1087	886	0,71076
0,1253936	0,0068516	30,95	14,241	17,602	31,625	55,501	1088	886	0,71077
0,1265304	0,0068580	30,95	14,225	17,601	31,625	55,499	1089	886	0,71078
0,1288040	0,0068711	30,95	14,193	17,601	31,625	55,494	1091	886	0,71081
0,1299408	0,0068776	30,95	14,177	17,601	31,626	55,492	1092	886	0,71082
0,1310776	0,0068842	30,95	14,161	17,601	31,626	55,490	1093	886	0,71084
0,1322144	0,0068908	30,95	14,145	17,601	31,626	55,487	1094	886	0,71085
0,1344880	0,0069042	30,95	14,112	17,601	31,626	55,483	1096	886	0,71088
0,1356248	0,0069109	30,95	14,095	17,601	31,627	55,480	1097	886	0,71089
0,1367616	0,0069177	30,95	14,079	17,601	31,627	55,478	1098	886	0,71090
0,1378984	0,0069245	30,95	14,062	17,601	31,627	55,476	1099	886	0,71092
0,1401720	0,0069381	30,94	14,029	17,600	31,627	55,471	1101	886	0,71094
0,1413088	0,0069450	30,94	14,012	17,600	31,628	55,469	1102	886	0,71096
0,1421000	0,0069498	30,94	14,000	17,600	31,628	55,466	1104	886	0,71097

Tabla 3.6. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

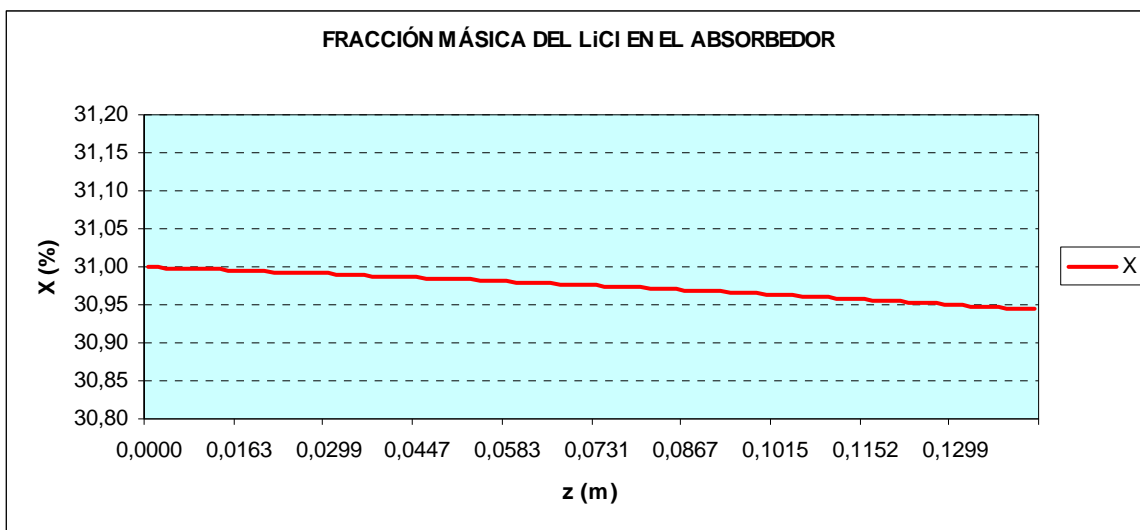
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del absorbedor, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



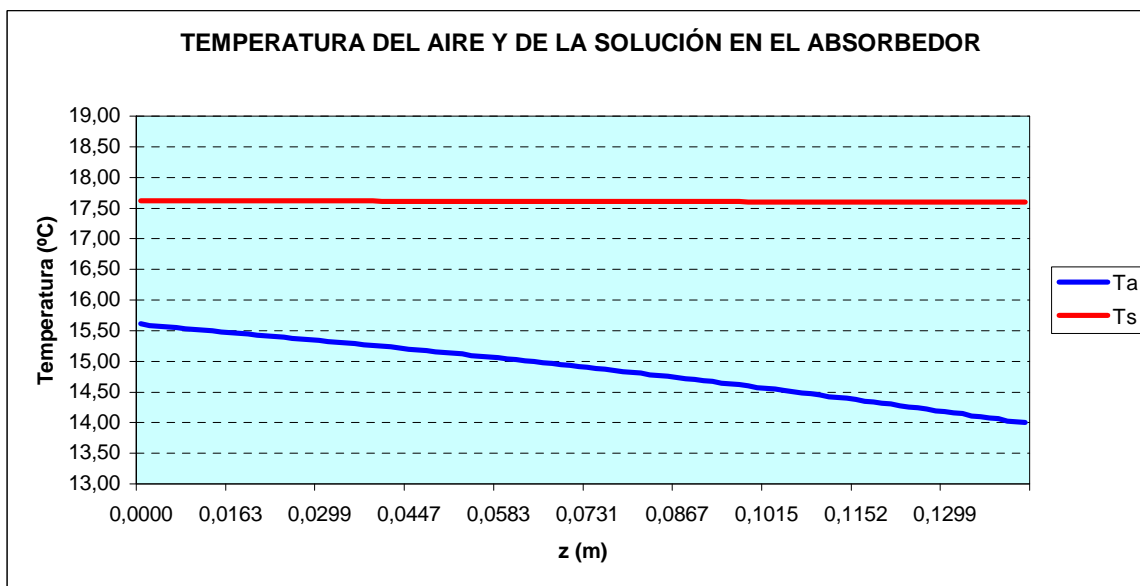
Gráfica 3.1. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.1 como la humedad absoluta del aire va disminuyendo a medida que avanza el aire por el absorbedor



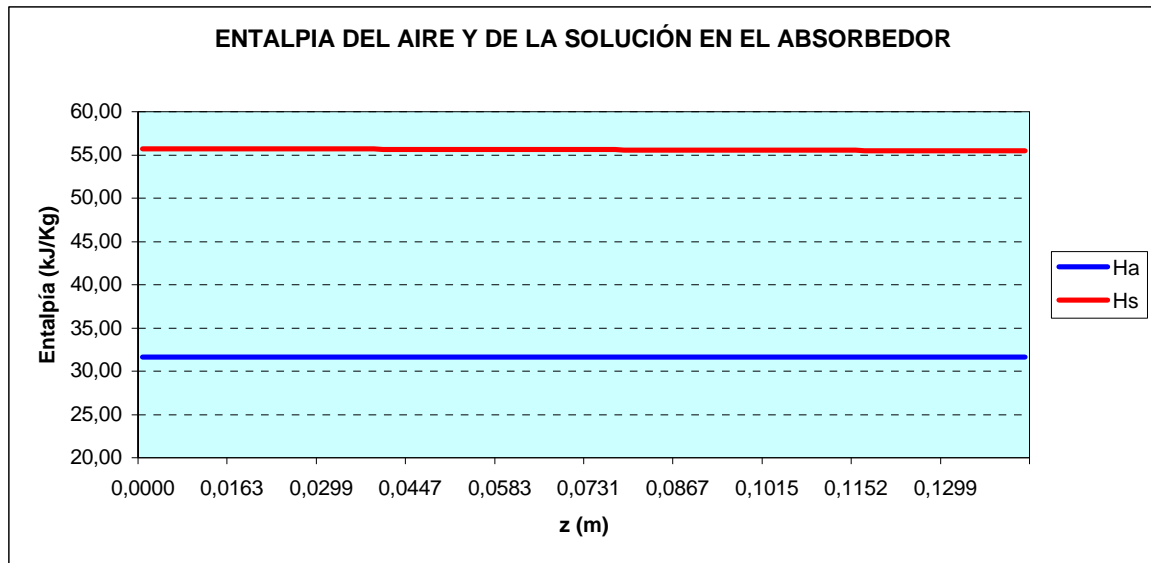
Gráfica 3.2. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.2 como la fracción másica del Cloruro de litio va disminuyendo a medida que avanza la solución por el absorbedor, al ir absorbiendo el vapor de agua del aire.



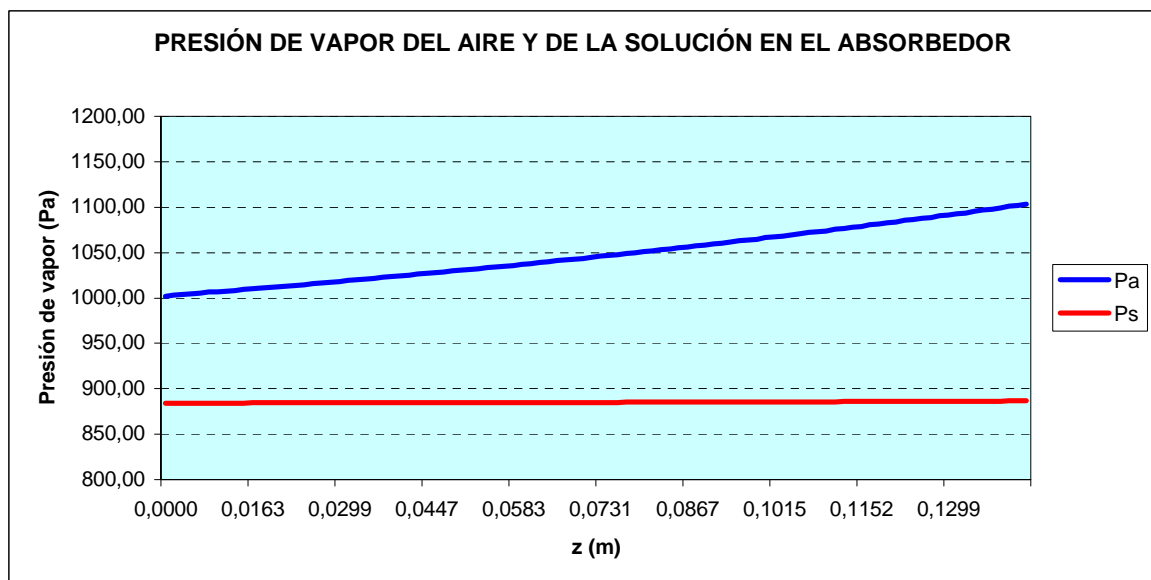
Gráfica 3.3. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.3 como la temperatura de la solución prácticamente es constante mientras la temperatura del aire aumenta, absorbiendo la energía cedida en el proceso de deshumectación.



Gráfica 3.4. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.4 como la entalpía del aire y de la solución permanecen prácticamente constantes



Gráfica 3.5. Evolución de la presión de vapor del aire en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.5 como la presión de vapor del aire disminuye al ir cediendo vapor de agua, sin embargo la presión de vapor de la solución permanece prácticamente constante.

REGENERADOR

Una vez que la solución acuosa de cloruro de litio ha absorbido el vapor de agua que inicialmente estaba en el caudal de aire tratado, es necesario hacerla pasar por el regenerador para que elimine el agua que ha absorbido y recupere sus condiciones iniciales para iniciar un nuevo ciclo. El proceso que tiene lugar en el regenerador es el inverso del que sucede en el absorbedor.

En este caso, la solución ha de tener una presión de vapor mayor que la del aire para que tenga lugar la transferencia de masa y calor requerida, dado que la fracción másica, X , está impuesta (es la de salida del absorbedor), se conseguirá aumentar la presión de vapor de la solución aumentando la temperatura, mediante la aportación de calor a la solución.

Respecto al aire, se utilizará el aire exterior para absorber el agua que ha de ceder la solución acuosa en el regenerador. También se aportará calor al aire exterior.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que la solución ceda el agua que ha absorbido anteriormente al aire exterior, se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al regenerador se han obteniendo los valores de salida de los mismos, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones, en el regenerador se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del regenerador, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 1 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 26,18 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,00856 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 48,12 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.355 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 0,71097 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 26 \text{ °C}$$

$$X = 30,94\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 80,29 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 1.422 \text{ Pa}$$

Para el regenerador, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 0,35 \text{ m}^2 \text{ (0,35 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el regenerador, se muestran en la siguiente tabla:

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0085563	30,94	26,185	26,000	48,122	80,289	1355	1422	0,71097
0,0096518	0,0085378	30,94	26,193	25,982	48,089	80,247	1353	1421	0,71096
0,0127534	0,0085318	30,94	26,196	25,976	48,077	80,231	1352	1420	0,71095
0,0158549	0,0085257	30,94	26,198	25,971	48,064	80,215	1351	1420	0,71095
0,0220580	0,0085135	30,95	26,204	25,959	48,039	80,182	1349	1419	0,71093
0,0251596	0,0085073	30,95	26,208	25,953	48,027	80,166	1348	1418	0,71093
0,0282611	0,0085011	30,95	26,211	25,948	48,014	80,151	1347	1418	0,71092
0,0313627	0,0084949	30,95	26,214	25,942	48,002	80,135	1346	1417	0,71091
0,0375657	0,0084822	30,95	26,222	25,931	47,977	80,103	1344	1416	0,71090
0,0406673	0,0084758	30,95	26,225	25,925	47,965	80,087	1343	1416	0,71090
0,0437688	0,0084694	30,95	26,229	25,919	47,952	80,071	1342	1415	0,71089
0,0468704	0,0084630	30,95	26,233	25,914	47,940	80,055	1341	1415	0,71088
0,0530735	0,0084499	30,95	26,242	25,902	47,915	80,024	1339	1414	0,71087
0,0561750	0,0084433	30,95	26,246	25,897	47,903	80,008	1338	1413	0,71086
0,0592765	0,0084366	30,95	26,251	25,891	47,890	79,993	1337	1413	0,71086
0,0623781	0,0084299	30,95	26,255	25,886	47,878	79,977	1336	1412	0,71085
0,0685812	0,0084164	30,95	26,265	25,874	47,853	79,946	1334	1411	0,71084
0,0716827	0,0084095	30,95	26,270	25,869	47,841	79,930	1333	1411	0,71083
0,0747843	0,0084026	30,95	26,275	25,863	47,829	79,915	1332	1410	0,71082
0,0778858	0,0083957	30,95	26,281	25,858	47,816	79,899	1331	1410	0,71082
0,0840889	0,0083816	30,95	26,292	25,847	47,792	79,868	1328	1409	0,71080
0,0871904	0,0083745	30,95	26,297	25,841	47,780	79,853	1327	1408	0,71080
0,0902920	0,0083674	30,95	26,303	25,835	47,767	79,837	1326	1408	0,71079
0,0933935	0,0083602	30,95	26,309	25,830	47,755	79,822	1325	1407	0,71078
0,0995966	0,0083456	30,95	26,322	25,819	47,731	79,791	1323	1406	0,71077
0,1026982	0,0083382	30,95	26,328	25,813	47,719	79,776	1322	1406	0,71076
0,1057997	0,0083307	30,95	26,335	25,808	47,706	79,761	1320	1405	0,71075
0,1089013	0,0083232	30,95	26,342	25,802	47,694	79,746	1319	1405	0,71074
0,1151043	0,0083080	30,95	26,356	25,791	47,670	79,715	1317	1404	0,71073
0,1182059	0,0083004	30,95	26,363	25,786	47,658	79,700	1316	1403	0,71072
0,1213074	0,0082926	30,95	26,371	25,780	47,646	79,685	1315	1403	0,71071
0,1244090	0,0082848	30,96	26,378	25,775	47,633	79,670	1313	1402	0,71071
0,1306121	0,0082690	30,96	26,394	25,764	47,609	79,640	1311	1401	0,71069
0,1337136	0,0082610	30,96	26,402	25,758	47,597	79,625	1310	1401	0,71068
0,1368151	0,0082529	30,96	26,410	25,753	47,585	79,610	1308	1400	0,71067

Tabla 3.7. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1399167	0,0082447	30,96	26,419	25,747	47,573	79,595	1307	1400	0,71067
0,1461198	0,0082283	30,96	26,436	25,737	47,549	79,565	1305	1399	0,71065
0,1492213	0,0082199	30,96	26,446	25,731	47,537	79,550	1303	1398	0,71064
0,1523229	0,0082115	30,96	26,455	25,726	47,524	79,535	1302	1398	0,71063
0,1554244	0,0082030	30,96	26,464	25,720	47,512	79,520	1301	1397	0,71062
0,1616275	0,0081857	30,96	26,484	25,709	47,488	79,491	1298	1396	0,71061
0,1647290	0,0081770	30,96	26,494	25,704	47,476	79,476	1297	1396	0,71060
0,1678306	0,0081682	30,96	26,504	25,699	47,464	79,461	1295	1395	0,71059
0,1709321	0,0081593	30,96	26,514	25,693	47,452	79,447	1294	1395	0,71058
0,1771352	0,0081413	30,96	26,535	25,682	47,428	79,417	1291	1394	0,71056
0,1802368	0,0081322	30,96	26,546	25,677	47,416	79,403	1290	1394	0,71055
0,1833383	0,0081230	30,96	26,558	25,672	47,404	79,388	1288	1393	0,71054
0,1864399	0,0081137	30,96	26,569	25,666	47,392	79,374	1287	1393	0,71054
0,1926429	0,0080949	30,96	26,593	25,655	47,368	79,344	1284	1392	0,71052
0,1957445	0,0080853	30,96	26,605	25,650	47,356	79,330	1282	1391	0,71051
0,1988460	0,0080757	30,96	26,617	25,645	47,344	79,315	1281	1391	0,71050
0,2019476	0,0080659	30,96	26,630	25,639	47,332	79,301	1279	1390	0,71049
0,2081507	0,0080462	30,97	26,655	25,629	47,308	79,272	1276	1389	0,71047
0,2112522	0,0080362	30,97	26,669	25,623	47,296	79,258	1275	1389	0,71046
0,2143537	0,0080261	30,97	26,682	25,618	47,284	79,243	1273	1388	0,71045
0,2174553	0,0080159	30,97	26,696	25,613	47,272	79,229	1271	1388	0,71044
0,2236584	0,0079952	30,97	26,724	25,602	47,247	79,201	1268	1387	0,71042
0,2267599	0,0079847	30,97	26,738	25,597	47,235	79,186	1267	1386	0,71041
0,2298615	0,0079741	30,97	26,753	25,591	47,223	79,172	1265	1386	0,71040
0,2329630	0,0079633	30,97	26,768	25,586	47,211	79,158	1263	1385	0,71039
0,2391661	0,0079416	30,97	26,799	25,575	47,187	79,129	1260	1384	0,71036
0,2422676	0,0079306	30,97	26,815	25,570	47,175	79,115	1258	1384	0,71035
0,2453692	0,0079194	30,97	26,831	25,565	47,163	79,101	1256	1383	0,71034
0,2484707	0,0079082	30,97	26,847	25,559	47,151	79,087	1255	1383	0,71033
0,2546738	0,0078854	30,97	26,880	25,549	47,127	79,059	1251	1382	0,71031
0,2577754	0,0078738	30,97	26,898	25,543	47,115	79,045	1249	1381	0,71030
0,2608769	0,0078621	30,97	26,915	25,538	47,103	79,031	1247	1381	0,71028
0,2639785	0,0078502	30,97	26,933	25,533	47,091	79,017	1246	1381	0,71027
0,2701815	0,0078262	30,98	26,969	25,522	47,067	78,989	1242	1380	0,71025
0,2732831	0,0078140	30,98	26,988	25,517	47,055	78,975	1240	1379	0,71024

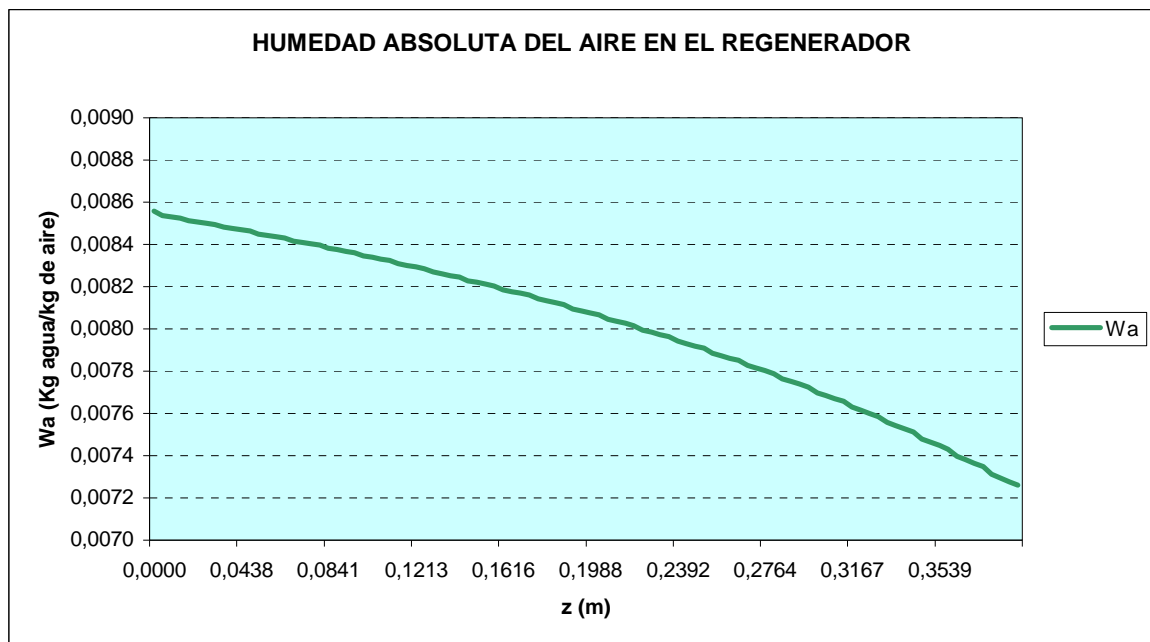
Tabla 3.7. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,2763846	0,0078017	30,98	27,007	25,512	47,043	78,961	1238	1379	0,71022
0,2794862	0,0077892	30,98	27,026	25,506	47,030	78,947	1236	1378	0,71021
0,2856893	0,0077640	30,98	27,065	25,496	47,006	78,920	1232	1377	0,71019
0,2887908	0,0077511	30,98	27,086	25,490	46,994	78,906	1230	1377	0,71017
0,2918923	0,0077381	30,98	27,106	25,485	46,982	78,892	1228	1376	0,71016
0,2949939	0,0077250	30,98	27,127	25,480	46,970	78,878	1226	1376	0,71015
0,3011970	0,0076984	30,98	27,170	25,469	46,945	78,851	1222	1375	0,71012
0,3042985	0,0076849	30,98	27,192	25,464	46,933	78,837	1220	1374	0,71011
0,3074001	0,0076712	30,98	27,214	25,459	46,921	78,823	1218	1374	0,71010
0,3105016	0,0076574	30,98	27,237	25,453	46,909	78,810	1216	1373	0,71008
0,3167047	0,0076293	30,98	27,283	25,443	46,884	78,783	1211	1372	0,71005
0,3198062	0,0076150	30,98	27,307	25,437	46,872	78,769	1209	1372	0,71004
0,3229078	0,0076006	30,99	27,331	25,432	46,860	78,755	1207	1371	0,71002
0,3260093	0,0075860	30,99	27,355	25,427	46,848	78,742	1204	1371	0,71001
0,3322124	0,0075564	30,99	27,405	25,416	46,823	78,715	1200	1370	0,70998
0,3353140	0,0075413	30,99	27,431	25,411	46,811	78,701	1197	1369	0,70997
0,3384155	0,0075261	30,99	27,457	25,406	46,799	78,688	1195	1369	0,70995
0,3415171	0,0075107	30,99	27,484	25,400	46,786	78,674	1193	1368	0,70994
0,3477201	0,0074794	30,99	27,538	25,390	46,762	78,648	1188	1367	0,70990
0,3508217	0,0074635	30,99	27,565	25,384	46,749	78,634	1185	1367	0,70989
0,3539232	0,0074474	30,99	27,593	25,379	46,737	78,621	1183	1366	0,70987
0,3570248	0,0074312	30,99	27,622	25,374	46,724	78,608	1180	1366	0,70986
0,3632279	0,0073981	30,99	27,680	25,363	46,700	78,581	1175	1365	0,70982
0,3663294	0,0073813	30,99	27,710	25,358	46,687	78,568	1173	1364	0,70981
0,3694309	0,0073643	31,00	27,741	25,352	46,675	78,554	1170	1364	0,70979
0,3725325	0,0073471	31,00	27,771	25,347	46,662	78,541	1167	1363	0,70977
0,3787356	0,0073121	31,00	27,834	25,336	46,637	78,515	1162	1362	0,70974
0,3818371	0,0072944	31,00	27,866	25,331	46,624	78,502	1159	1362	0,70972
0,3849387	0,0072764	31,00	27,899	25,326	46,612	78,488	1156	1361	0,70970
0,3876930	0,0072602	31,00	27,929	25,321	46,594	78,470	1152	1361	0,70968

Tabla 3.7. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3

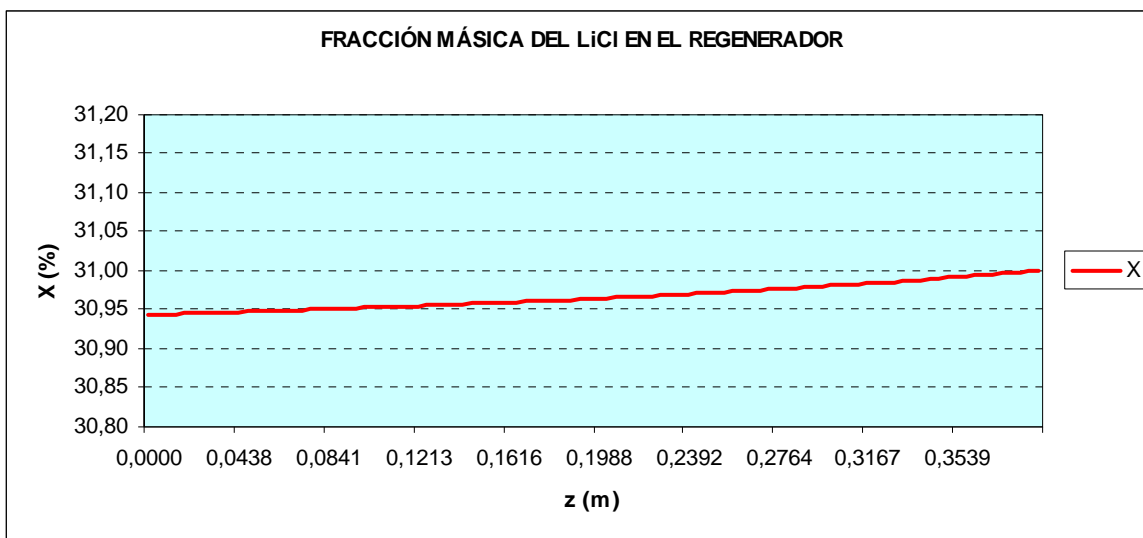
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del regenerador, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



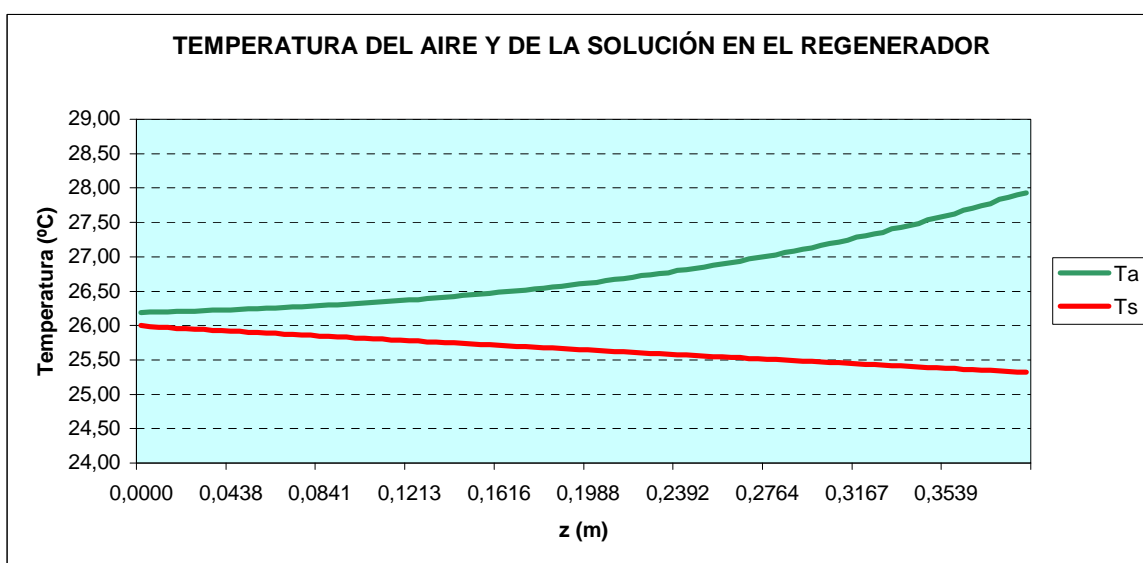
Gráfica 3.6. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.6 como la humedad absoluta del aire va aumentando a medida que avanza el aire por el regenerador



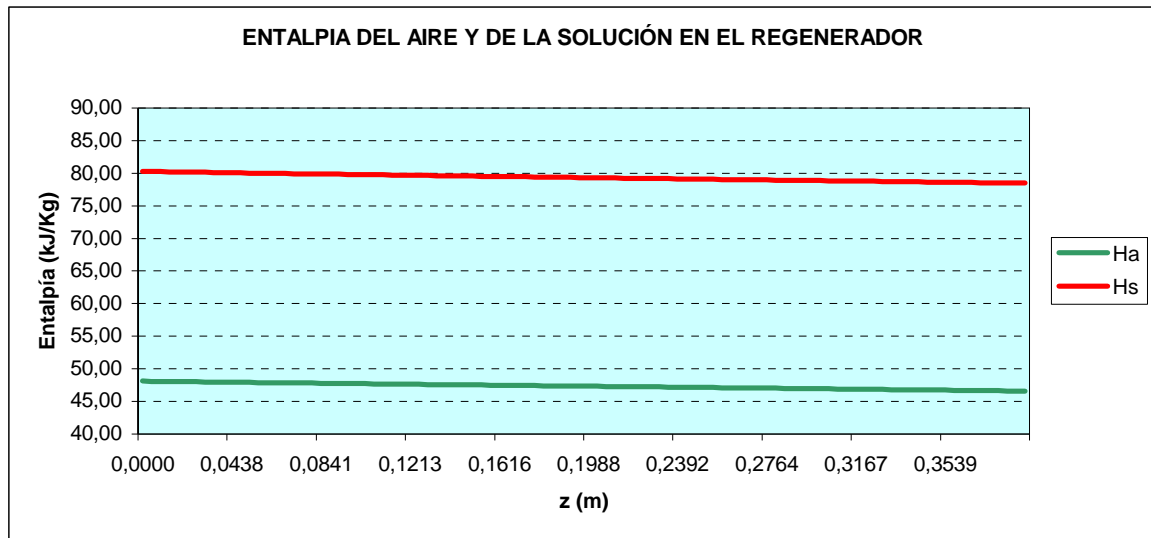
Gráfica 3.7. Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.7 como la fracción másica del cloruro de litio va aumentando a medida que avanza la solución por el regenerador, al ir cediendo el agua al aire.



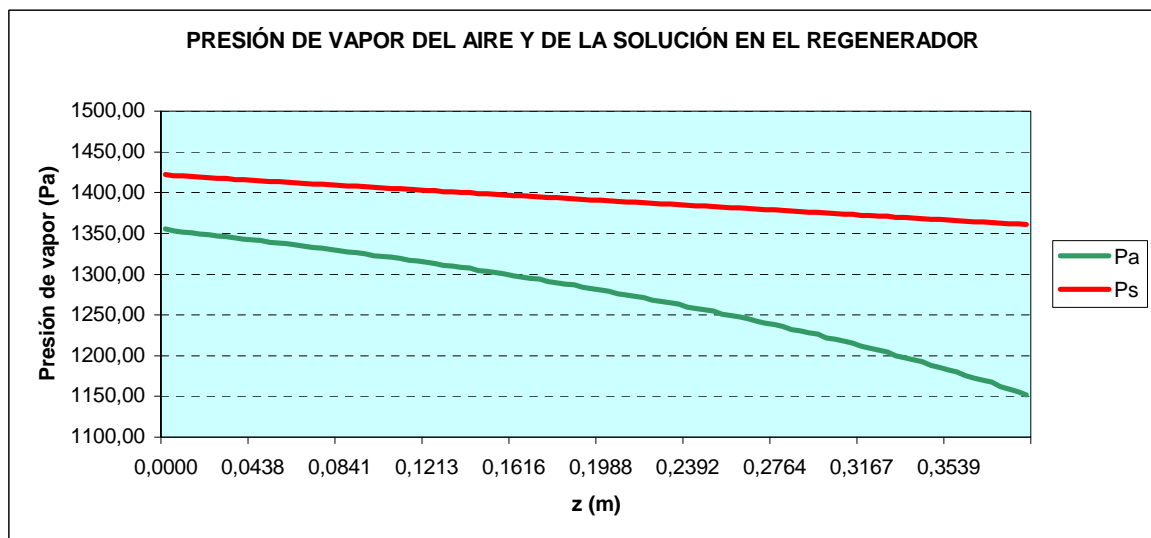
Gráfica 3.8. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.8 como la temperatura de la solución y del aire disminuye.



Gráfica 3.9. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.9 como la entalpía del aire aumenta ligeramente y la entalpía de la solución disminuye, también ligeramente



Gráfica 3.10. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 3.10 como la presión de vapor del aire aumenta al ir absorbiendo el vapor de agua, y como la presión de vapor de la solución disminuye al ir cediendo el agua al aire.

Respecto al aire exterior utilizado en el regenerador, en la figura 3.13 se representan, el diagrama psicrométrico del ciclo que realiza.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

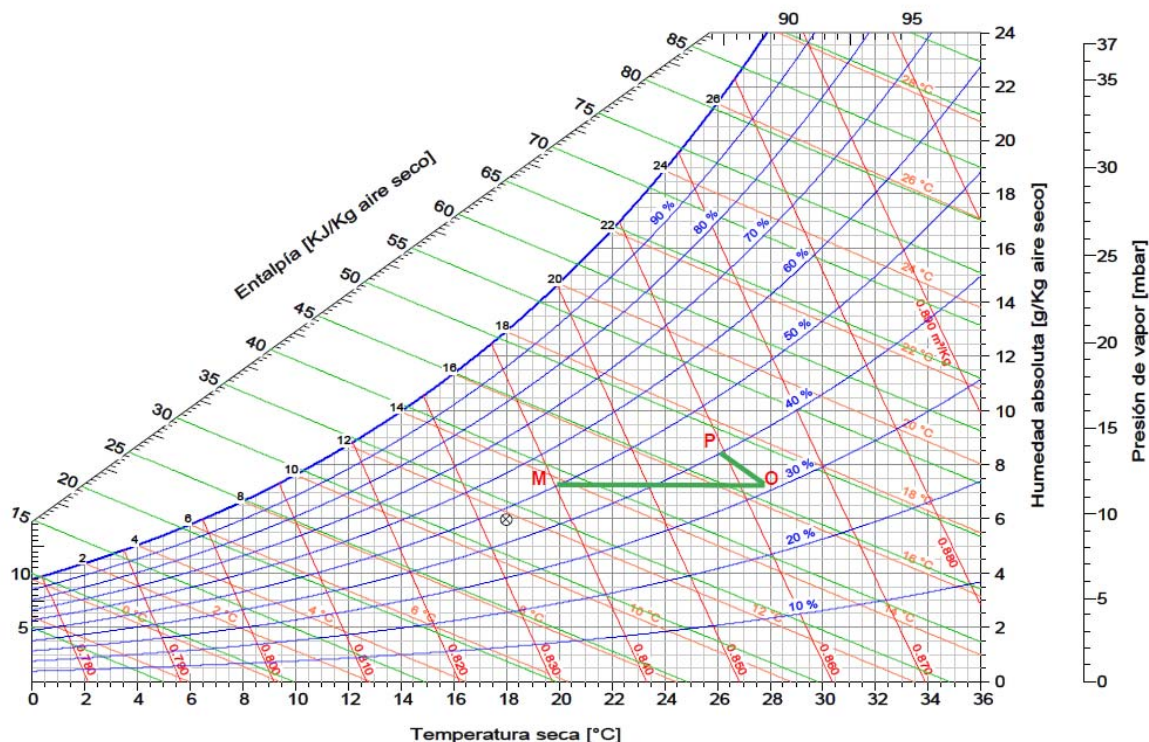


Figura 3.13. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

Como se observa, se ha elegido como punto inicial del aire exterior las condiciones medias de 20°C y 50% de humedad relativa. Es necesario aportar calor para que alcance la temperatura para ser capaz de conseguir la absorción del agua que ha de ceder la solución en el regenerador.

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DE LA SOLUCIÓN

La solución necesita aporte de calor a la salida del absorbedor para aumentar la presión de vapor y necesita aporte de frío a la salida del regenerador para disminuir la presión de vapor. (Ver figura 3.9)

Para mejorar el coste energético de este proceso, se utilizará un recuperador de calor de la solución para conseguir el intercambio térmico, parcial, sin coste energético adicional, los valores de las temperaturas de la solución permiten utilizar un recuperador de calor que recuperaría calor de la solución a la salida del regenerador y lo cedería a la solución a la salida del absorbedor precalentándola.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - solución procedente del regenerador: 25,32°C a 22,60°C
 - solución procedente del absorbedor: 17,60°C a 20,32°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 5,7 \text{ kW}$

La potencia calorífica restante que necesita la solución se aportará mediante un condensador frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 20,32°C a 26°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 11,94 \text{ kW}$

La potencia frigorífica restante necesaria se aportará mediante un evaporador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia frigorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 22,60°C a 17,62°C
 - $P_{\text{Frigorífica}} = 10,43 \text{ kW}$

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DEL AIRE EXTERIOR

A la salida del regenerador, el aire exterior está a una temperatura que permite mediante un recuperador de calor enfriar el aire de la salida, precalentando el aire de la entrada.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - aire procedente del regenerador: 26,19°C a 25°C
 - aire procedente del exterior: 20°C a 21,18°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 1,2 \text{ kW}$

El resto de potencia calorífica que se precisa en el aire exterior, antes de entrar al regenerador se aportará mediante un condensador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 21,18°C a 27,93°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 6,87 \text{ kW}$

A partir de los resultados obtenidos se concluye que las potencias totales que precisa este proceso son:

- Potencia frigorífica: 10,43 kW
- Potencia calorífica: $11,94 + 6,87 = 18,81 \text{ kW}$

CIRCUITO FRIGORÍFICO

Para el circuito frigorífico que suministrará la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesarias se ha de elegir la temperatura de evaporación mayor posible y la temperatura de condensación menor posible, para conseguir obtener tener mejor CEE.

Igual que en los casos anteriores, se ha considerado un incremento de temperatura de 5°C entre el refrigerante y el fluido externo, tanto en el condensador como en el evaporador.

La temperatura de evaporación será:

$$T^{\text{a}} \text{ evap} = 17,62 - 5 = 12,62^{\circ}\text{C}$$

La temperatura de condensación será:

$$T^{\text{a}} \text{ cond} = 27,93 + 5 = 32,93^{\circ}\text{C}$$

El CEE del compresor del circuito frigorífico que se obtiene es:

$$\text{CEE} = \frac{0,45 (273 + 12,62)}{(32,93 - 12,62)} = 6,328$$

Este valor es mucho más alto que los obtenidos en el proceso 1 y 2, dado que la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación son más próximas.

Como la potencia calorífica necesaria es bastante mayor que la potencia frigorífica necesaria, el valor más exigente para el circuito frigorífico es la potencia calorífica.

Es decir, se obtendrá la potencia frigorífica que necesita el circuito frigorífico (superior a la que necesita el proceso, en este caso la solución) para conseguir obtener la potencia calorífica total necesaria en el proceso.

Considerando que la potencia calorífica es la suma de la potencia frigorífica y la potencia absorbida por el compresor.

Potencia calorífica = potencia frigorífica + potencia absorbida

A partir de la potencia frigorífica, la potencia absorbida que se obtiene es:

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{\text{CEE}} = \frac{16,25}{6,328} = 2,568 \text{ kW}$$

El valor de la potencia absorbida es menor que en los dos procesos anteriores.

y la potencia calorífica que se obtiene es:

$$\text{Potencia calorífica} = 16,25 + 2,57 = 18,82 \text{ kW}$$

valor que iguala la potencia calorífica necesaria en el proceso.

Con ello quedaría cubierta la demanda de potencia frigorífica y potencia calorífica calculada para este proceso.

Finalmente, para este proceso, la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representa el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseado es de:

$$2,568 \text{ kW} / 1,2960 \text{ g/s} = 1,981 \text{ kJ/g, que equivale a } 1.981 \text{ kJ/kg de agua}$$

En el apartado 3.2.5 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los cuatro procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que en este proceso se ha obtenido un consumo energético en el compresor del 64,38% del consumo obtenido en el proceso 1, por lo que energéticamente el proceso 3 es mejor proceso que el proceso 1 y el 2.

3.2.4. PROCESO 4 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 2

Se trata del cuarto proceso que se presenta como alternativa para la deshumidificación del aire en el secadero elegido.

En este caso se pretende el mismo objetivo que en los procesos anteriores, conseguir las mismas condiciones finales del aire a partir de las mismas condiciones iniciales, mediante la utilización de una instalación frigorífica que combina el uso de un refrigerante primario y la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

En la alternativa 2, el proceso que se ha elegido consiste en hacer el tratamiento del aire en un dos etapas:

- Etapa 1. Deshumidificación

Consiste en hacer circular el caudal de aire a tratar, procedente de la cámara, a través del absorbedor para reducir la humedad absoluta a los valores necesarios para eliminar el caudal de agua requerido. (De A a B en figuras 3.14 y 3.15).

El absorbedor tendrá, en flujo a contracorriente, la solución acuosa de cloruro de litio en los valores adecuados para conseguir los valores finales del aire directamente a la salida del absorbedor.

Será necesario la regeneración de la solución para ceder el agua absorbida al aire exterior.

- Etapa 2. Calefacción

Consiste en calentar el aire procedente del absorbedor, manteniendo la humedad absoluta, se aporta calor para aumentar la temperatura del aire hasta la temperatura final deseada (De B a C en figuras 3.14 y 3.15).

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 3.14:

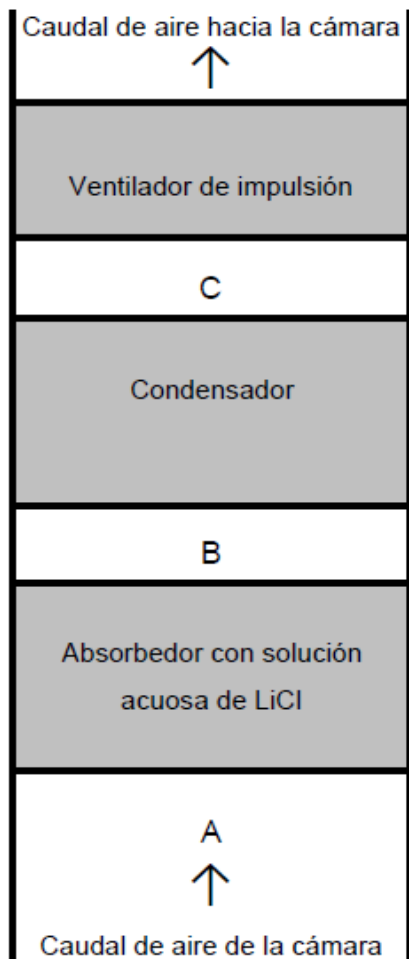


Figura 3.14. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire en un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4

En la tabla 3.8 se detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES				
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C
Ta	°C	14	14,43	15,61
Wa x 1000	g agua/kg aire	6,950	6,302	6,302
Ha	kJ/kg	31,628	30,424	31,628
Pa	Pa	1104	1002	1002
ma	kg/s	2	2	2

Tabla 3.8. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 4

En la figura 3.15 se representan las transformaciones del aire en el diagrama psicrométrico.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

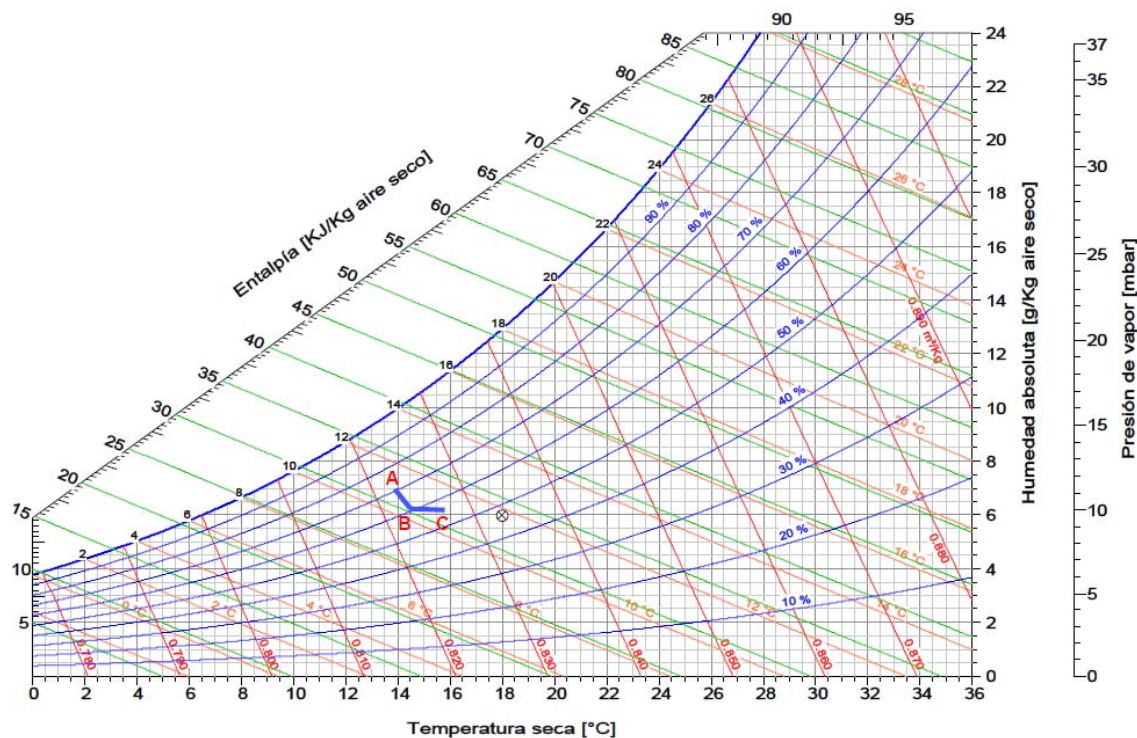


Figura 3.15. Diagrama psicrométrico de un secadero industrial con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4

Para conseguir que el aire a tratar realice este proceso se precisa que todos los valores de las variables de los flujos que intervienen tenga los valores adecuados que lo permitan. Por lo que se hace necesario la definición de todos los flujos y valores de las variables del ciclo completo explicado en el capítulo 2, apartado 2.3.

La figura 3.16 muestra el esquema de principio global del proceso.

El código de colores utilizado en la figura 3.16 es:

- — Solución acuosa de cloruro de litio
- — Aire a tratar (absorbedor)
- — Aire exterior (regenerador)

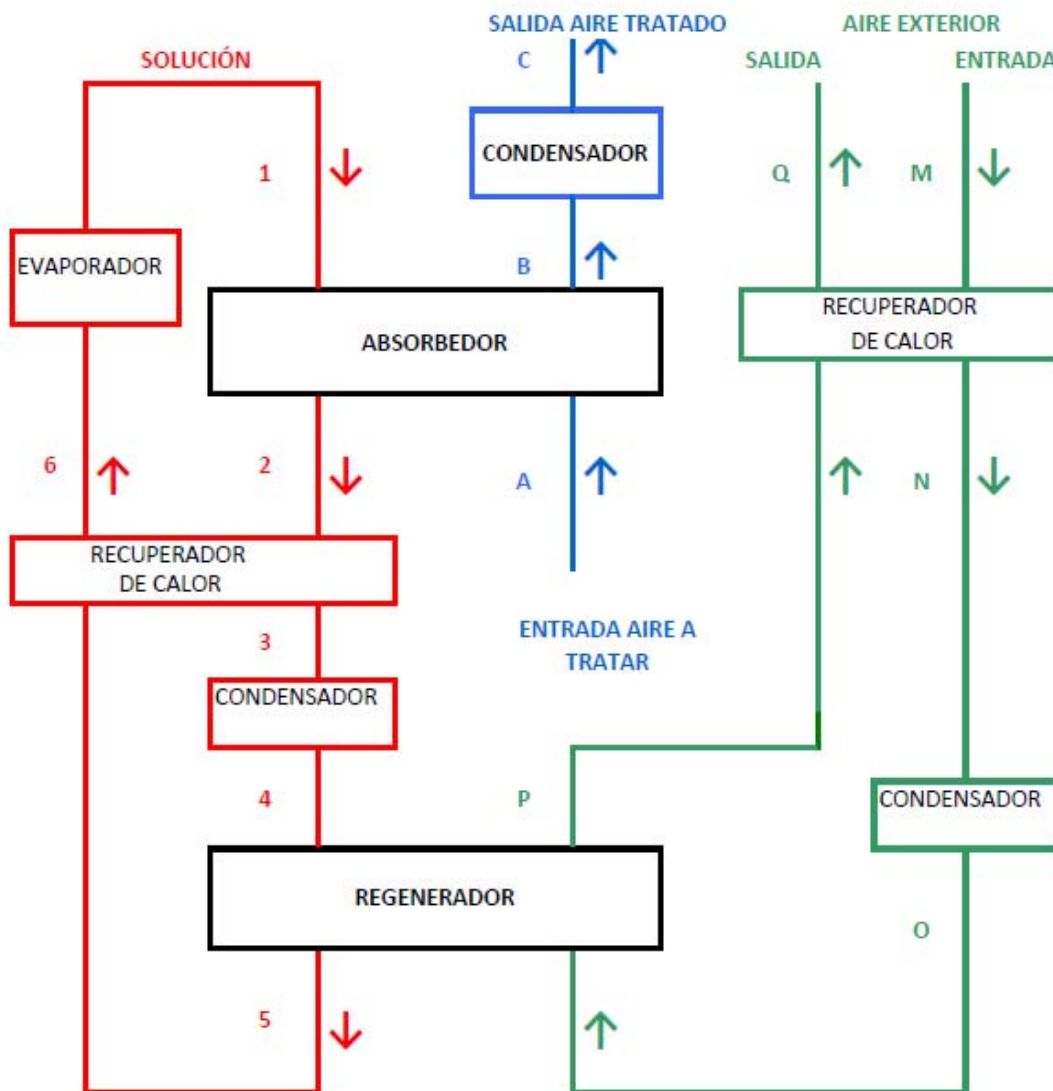


Figura 3.16. Esquema de principio general del proceso 4

Las tablas 3.9 y 3.10 recopilan los valores de las variables del aire y de la solución que intervienen en el proceso.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA EL AIRE									
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C	M	N	O	P	Q
Ta	°C	14	14,43	15,61	20	20	24,13	24	24
Wa x 1000	g agua/kg aire	6,950	6,302	6,302	7,26	7,26	7,26	7,91	7,91
Ha	kJ/kg	31,628	30,424	31,628	38,540	38,540	42,728	44,243	44,243
Pa	Pa	1104	1002	1002	1152	1152	1152	1254	1254
ma	kg/s	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla 3.9. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 4

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO							
VARIABLE	UNIDADES	1	2	3	4	5	6
X	% kgLiCl/Kgsolución	29,50	29,45	29,45	29,45	29,50	29,50
Ts (°C)	g agua/kg aire	14,50	15,56	18,18	24,50	23,18	20,56
Hs	kJ/kg	41,598	44,610	52,472	71,403	67,599	59,728
Ps	Pa	859	896		1423	1314	
ms	kg/s	0,7458	0,7471	0,7471	0,7471	0,7458	0,7458

Tabla 3.10. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 4

A continuación se explica el desarrollo de este proceso.

ETAPA 1. DESHUMIDIFICACIÓN EN EL ABSORBEDOR

La mezcla acuosa de cloruro de litio será la encargada de deshumidificar el caudal de aire que se ha de tratar, absorbiendo la cantidad de vapor de agua sobrante, presente en el aire inicialmente.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que el aire realice el proceso descrito desde A a B, se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al absorbedor de la solución acuosa de cloruro de litio, se han obteniendo los valores de la

solución acuosa de cloruro de litio a la salida del mismo, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del absorbedor, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 14,43 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,006302 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 30,424 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.002 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 0,7458 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 14,50 \text{ °C}$$

$$X = 29,50\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 41,60 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 859 \text{ Pa}$$

Para el absorbedor, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 0,7 \text{ m}^2 \text{ (0,7 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el absorbedor, se muestran en la siguiente tabla:

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0063020	29,50	14,426	14,500	30,424	41,598	1002	859	0,74576
0,0035680	0,0063163	29,50	14,425	14,531	30,454	41,673	1004	860	0,74579
0,0046420	0,0063207	29,50	14,424	14,540	30,464	41,700	1004	860	0,74580
0,0057160	0,0063250	29,50	14,424	14,549	30,475	41,726	1005	861	0,74580
0,0067900	0,0063294	29,50	14,423	14,558	30,485	41,753	1006	861	0,74581
0,0089380	0,0063381	29,50	14,422	14,577	30,506	41,806	1007	862	0,74583
0,0100120	0,0063425	29,50	14,421	14,586	30,516	41,832	1008	862	0,74584
0,0110860	0,0063469	29,50	14,420	14,595	30,527	41,858	1008	862	0,74585
0,0121600	0,0063513	29,50	14,419	14,604	30,537	41,885	1009	862	0,74586
0,0143080	0,0063602	29,50	14,418	14,622	30,558	41,937	1010	863	0,74587
0,0153820	0,0063647	29,50	14,417	14,631	30,568	41,963	1011	863	0,74588
0,0164560	0,0063691	29,49	14,416	14,640	30,578	41,989	1012	864	0,74589
0,0175300	0,0063736	29,49	14,415	14,649	30,589	42,015	1013	864	0,74590
0,0196780	0,0063826	29,49	14,413	14,667	30,609	42,067	1014	864	0,74592
0,0207520	0,0063871	29,49	14,411	14,676	30,620	42,093	1015	865	0,74593
0,0218260	0,0063917	29,49	14,410	14,685	30,630	42,119	1015	865	0,74594
0,0229000	0,0063962	29,49	14,409	14,694	30,640	42,145	1016	865	0,74595
0,0250480	0,0064054	29,49	14,406	14,712	30,660	42,197	1018	866	0,74596
0,0261220	0,0064099	29,49	14,405	14,721	30,671	42,223	1018	866	0,74597
0,0271960	0,0064145	29,49	14,404	14,730	30,681	42,248	1019	866	0,74598
0,0282700	0,0064191	29,49	14,402	14,739	30,691	42,274	1020	867	0,74599
0,0304180	0,0064284	29,49	14,399	14,757	30,711	42,325	1021	867	0,74601
0,0314920	0,0064331	29,49	14,397	14,766	30,721	42,351	1022	868	0,74602
0,0325660	0,0064377	29,49	14,396	14,775	30,731	42,376	1023	868	0,74603
0,0336400	0,0064424	29,49	14,394	14,783	30,741	42,402	1023	868	0,74604
0,0357880	0,0064518	29,49	14,390	14,801	30,762	42,452	1025	869	0,74606
0,0368620	0,0064565	29,49	14,389	14,810	30,772	42,478	1026	869	0,74607
0,0379360	0,0064612	29,49	14,387	14,819	30,782	42,503	1026	869	0,74608
0,0390100	0,0064660	29,49	14,385	14,828	30,792	42,528	1027	870	0,74609
0,0411580	0,0064755	29,49	14,381	14,845	30,812	42,579	1029	870	0,74611
0,0422320	0,0064803	29,49	14,379	14,854	30,822	42,604	1029	871	0,74611
0,0433060	0,0064851	29,49	14,376	14,863	30,832	42,629	1030	871	0,74612
0,0443800	0,0064899	29,49	14,374	14,871	30,842	42,654	1031	871	0,74613
0,0465280	0,0064996	29,48	14,370	14,889	30,861	42,704	1032	872	0,74615
0,0476020	0,0065045	29,48	14,367	14,897	30,871	42,729	1033	872	0,74616

Tabla 3.11. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 4

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,0486760	0,0065093	29,48	14,365	14,906	30,881	42,754	1034	872	0,74617
0,0497500	0,0065142	29,48	14,363	14,915	30,891	42,779	1035	873	0,74618
0,0518980	0,0065240	29,48	14,357	14,932	30,911	42,828	1036	873	0,74620
0,0529720	0,0065290	29,48	14,355	14,941	30,921	42,853	1037	873	0,74621
0,0540460	0,0065339	29,48	14,352	14,949	30,930	42,877	1038	874	0,74622
0,0551200	0,0065389	29,48	14,350	14,958	30,940	42,902	1039	874	0,74623
0,0572680	0,0065489	29,48	14,344	14,975	30,960	42,951	1040	875	0,74625
0,0583420	0,0065539	29,48	14,341	14,984	30,970	42,976	1041	875	0,74626
0,0594160	0,0065589	29,48	14,338	14,992	30,979	43,000	1042	875	0,74627
0,0604900	0,0065639	29,48	14,335	15,001	30,989	43,025	1042	875	0,74628
0,0626380	0,0065740	29,48	14,329	15,018	31,009	43,073	1044	876	0,74630
0,0637120	0,0065791	29,48	14,326	15,026	31,018	43,098	1045	876	0,74631
0,0647860	0,0065842	29,48	14,323	15,035	31,028	43,122	1046	877	0,74632
0,0658600	0,0065893	29,48	14,320	15,043	31,038	43,146	1046	877	0,74633
0,0680080	0,0065996	29,48	14,313	15,060	31,057	43,194	1048	878	0,74635
0,0690820	0,0066047	29,48	14,310	15,068	31,067	43,218	1049	878	0,74636
0,0701560	0,0066099	29,48	14,307	15,077	31,076	43,242	1050	878	0,74637
0,0712300	0,0066151	29,48	14,303	15,085	31,086	43,266	1051	878	0,74638
0,0733780	0,0066255	29,47	14,296	15,102	31,105	43,314	1052	879	0,74640
0,0744520	0,0066308	29,47	14,292	15,110	31,114	43,338	1053	879	0,74642
0,0755260	0,0066360	29,47	14,289	15,119	31,124	43,362	1054	880	0,74643
0,0766000	0,0066413	29,47	14,285	15,127	31,134	43,386	1055	880	0,74644
0,0787480	0,0066519	29,47	14,277	15,144	31,153	43,433	1056	880	0,74646
0,0798220	0,0066572	29,47	14,273	15,152	31,162	43,457	1057	881	0,74647
0,0808960	0,0066625	29,47	14,270	15,160	31,172	43,480	1058	881	0,74648
0,0819700	0,0066679	29,47	14,266	15,169	31,181	43,504	1059	881	0,74649
0,0841180	0,0066787	29,47	14,257	15,185	31,200	43,551	1060	882	0,74651
0,0851920	0,0066841	29,47	14,253	15,193	31,209	43,574	1061	882	0,74652
0,0862660	0,0066895	29,47	14,249	15,202	31,219	43,598	1062	882	0,74653
0,0873400	0,0066949	29,47	14,245	15,210	31,228	43,621	1063	883	0,74654
0,0894880	0,0067058	29,47	14,236	15,226	31,247	43,668	1065	883	0,74656
0,0905620	0,0067113	29,47	14,231	15,234	31,256	43,691	1066	884	0,74658
0,0916360	0,0067168	29,47	14,227	15,242	31,265	43,714	1066	884	0,74659
0,0927100	0,0067223	29,47	14,222	15,251	31,275	43,737	1067	884	0,74660
0,0948580	0,0067334	29,47	14,213	15,267	31,293	43,784	1069	885	0,74662

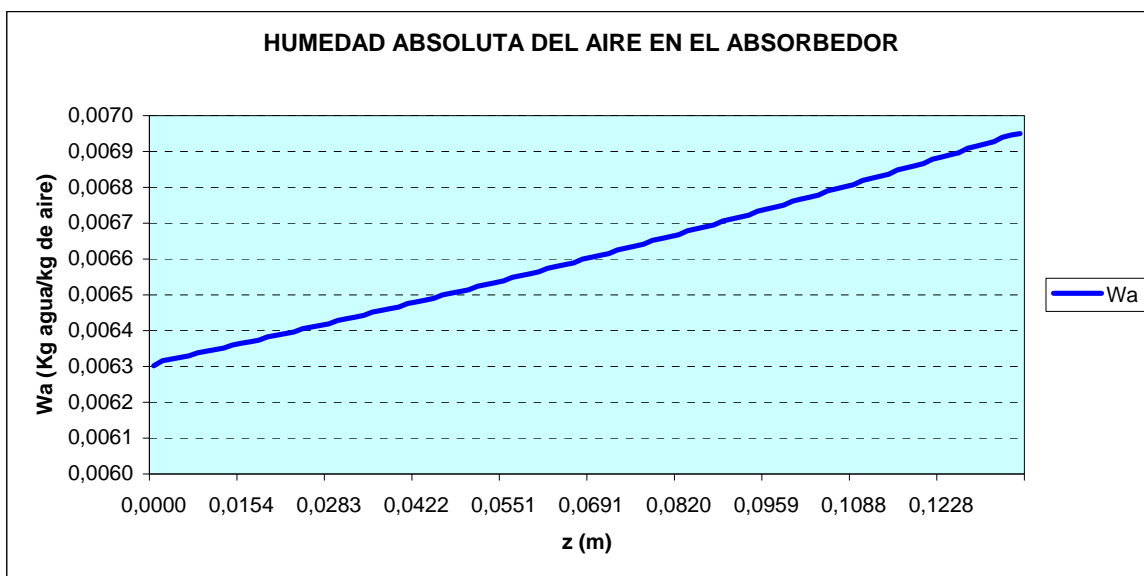
Tabla 3.11. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 4

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,0959320	0,0067390	29,47	14,208	15,275	31,303	43,807	1070	885	0,74663
0,0970060	0,0067446	29,47	14,204	15,283	31,312	43,830	1071	885	0,74664
0,0980800	0,0067502	29,46	14,199	15,291	31,321	43,853	1072	886	0,74665
0,1002280	0,0067615	29,46	14,189	15,307	31,340	43,898	1073	886	0,74668
0,1013020	0,0067672	29,46	14,184	15,315	31,349	43,921	1074	887	0,74669
0,1023760	0,0067728	29,46	14,179	15,323	31,358	43,944	1075	887	0,74670
0,1034500	0,0067785	29,46	14,174	15,331	31,367	43,967	1076	887	0,74671
0,1055980	0,0067900	29,46	14,163	15,347	31,386	44,012	1078	888	0,74673
0,1066720	0,0067958	29,46	14,158	15,355	31,395	44,034	1079	888	0,74674
0,1077460	0,0068015	29,46	14,153	15,363	31,404	44,057	1080	888	0,74676
0,1088200	0,0068073	29,46	14,147	15,371	31,413	44,080	1081	889	0,74677
0,1109680	0,0068190	29,46	14,136	15,387	31,431	44,124	1083	889	0,74679
0,1120420	0,0068248	29,46	14,130	15,395	31,440	44,147	1083	890	0,74680
0,1131160	0,0068307	29,46	14,125	15,403	31,449	44,169	1084	890	0,74681
0,1141900	0,0068366	29,46	14,119	15,411	31,458	44,191	1085	890	0,74683
0,1163380	0,0068484	29,46	14,107	15,426	31,476	44,236	1087	891	0,74685
0,1174120	0,0068543	29,46	14,102	15,434	31,485	44,258	1088	891	0,74686
0,1184860	0,0068603	29,46	14,096	15,442	31,494	44,280	1089	891	0,74687
0,1195600	0,0068663	29,46	14,090	15,450	31,503	44,302	1090	892	0,74689
0,1217080	0,0068783	29,45	14,077	15,466	31,521	44,346	1092	892	0,74691
0,1227820	0,0068844	29,45	14,071	15,473	31,530	44,368	1093	892	0,74692
0,1238560	0,0068904	29,45	14,065	15,481	31,539	44,390	1094	893	0,74693
0,1249300	0,0068965	29,45	14,058	15,489	31,548	44,412	1095	893	0,74695
0,1270780	0,0069087	29,45	14,046	15,504	31,566	44,456	1097	894	0,74697
0,1281520	0,0069149	29,45	14,039	15,512	31,575	44,478	1098	894	0,74698
0,1292260	0,0069210	29,45	14,032	15,520	31,584	44,499	1099	894	0,74699
0,1303000	0,0069272	29,45	14,026	15,527	31,593	44,521	1099	895	0,74701
0,1324480	0,0069396	29,45	14,012	15,543	31,610	44,564	1101	895	0,74703
0,1335220	0,0069459	29,45	14,005	15,550	31,619	44,586	1102	895	0,74704
0,1342500	0,0069501	29,45	14,001	15,556	31,629	44,611	1104	896	0,74706

Tabla 3.11. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 4

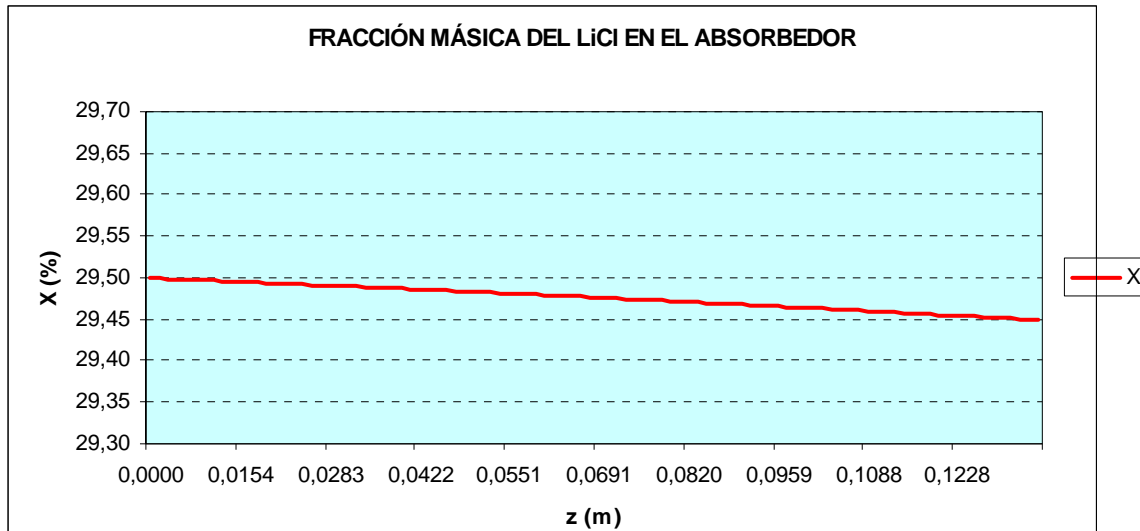
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del absorbedor, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



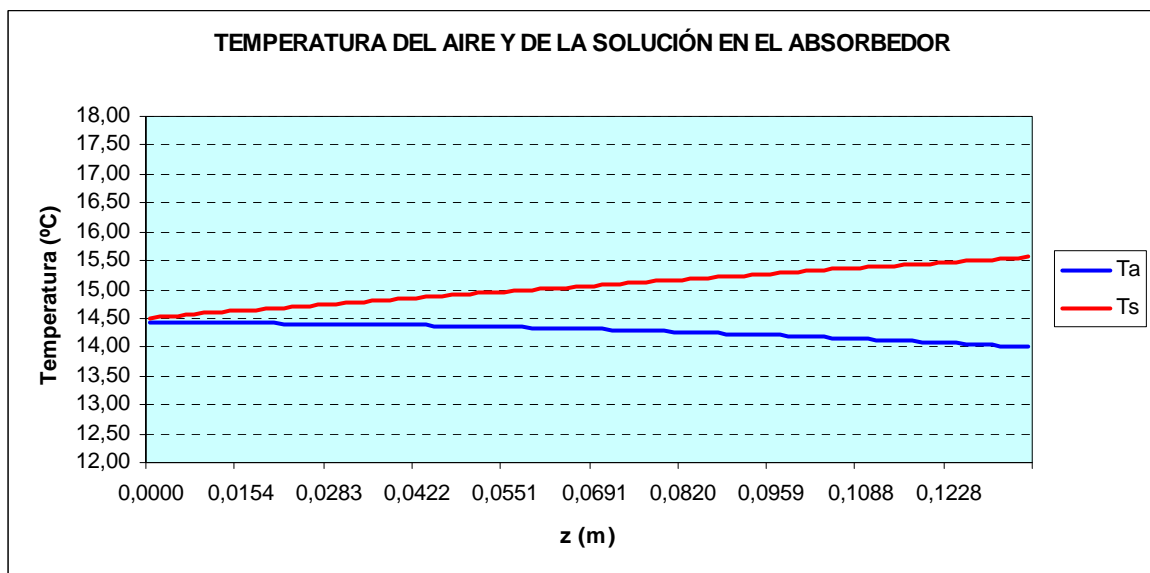
Gráfica 3.11. Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.11 como la humedad absoluta del aire va disminuyendo a medida que avanza el aire por el absorbedor



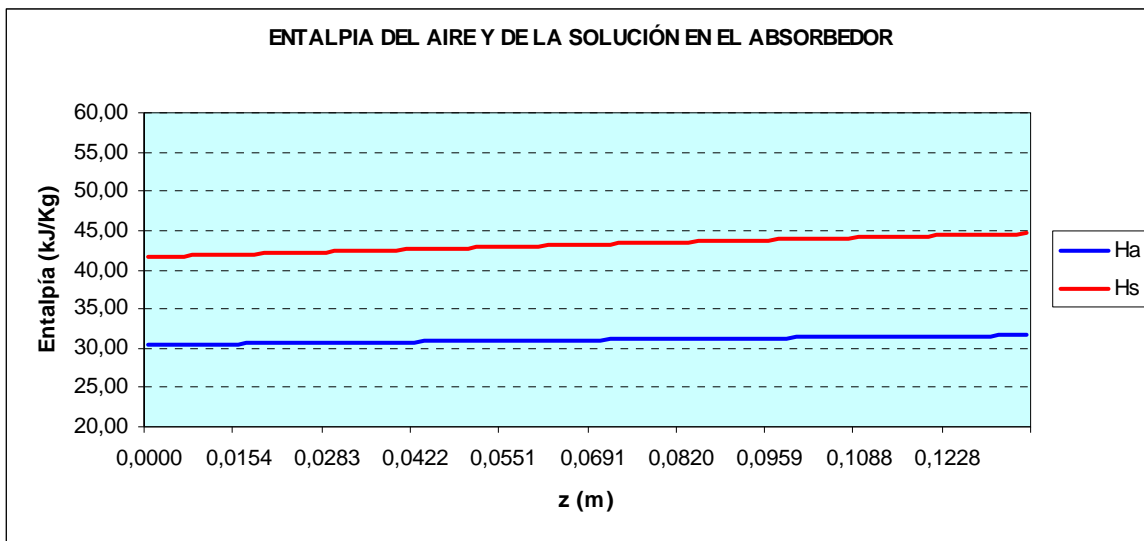
Gráfica 3.12. Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.12 como la fracción másica del cloruro de litio va disminuyendo a medida que avanza la solución por el absorbedor, al ir absorbiendo el vapor de agua del aire.



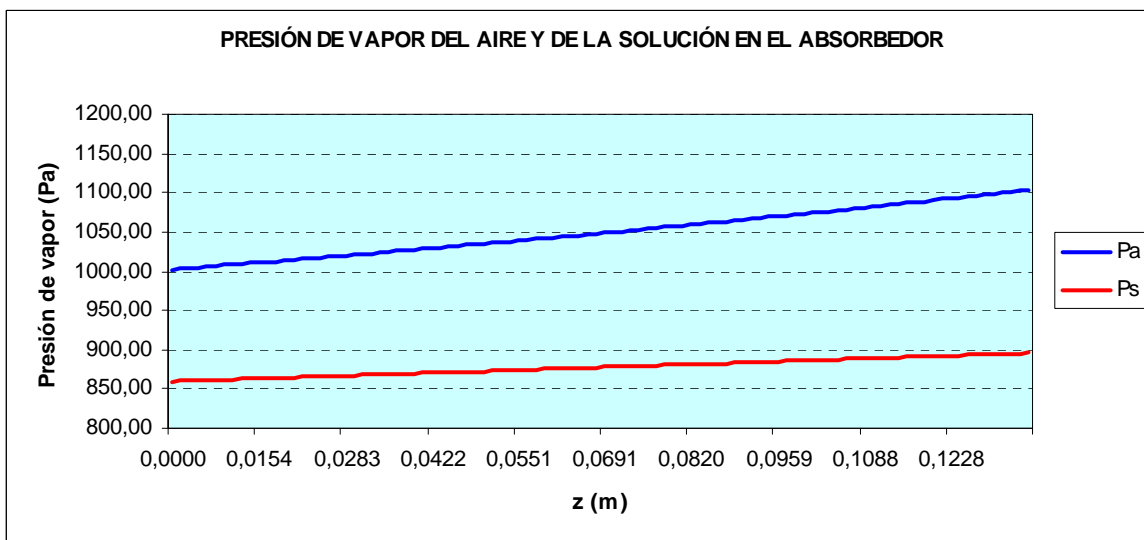
Gráfica 3.13. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.13 como aumentan tanto la temperatura de la solución como la temperatura del aire, al ir absorbiendo la energía cedida en el proceso de deshumectación.



Gráfica 3.14. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.14 como la entalpía del aire disminuye ligeramente y la entalpía de la solución aumenta también ligeramente



Gráfica 3.15. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.15 como la presión de vapor del aire disminuye al ir cediendo vapor de agua, sin embargo la presión de vapor de la solución aumenta muy ligeramente.

ETAPA 2. CALEFACCIÓN

El aire tratado después del pasar a través del absorbedor necesita aumentar la temperatura hasta el valor final deseado.

La potencia calorífica que se precisa se aportará mediante un condensador del circuito frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 14,43°C a 15,61°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 2,41 \text{ kW}$

REGENERADOR

Una vez que la solución acuosa de cloruro de litio ha absorbido el vapor de agua que inicialmente estaba en el caudal de aire tratado, es necesario hacerla pasar por el regenerador para que elimine el agua que ha absorbido y recupere sus condiciones iniciales para iniciar un nuevo ciclo. El proceso que tiene lugar en el regenerador es el inverso del que sucede en el absorbedor.

En este caso, la solución ha de tener una presión de vapor mayor que la del aire para que tenga lugar la transferencia de masa y calor requerida, dado que la fracción másica, X, está impuesta (es la de salida del absorbedor), se conseguirá aumentar la presión de vapor de la solución aumentando la temperatura, mediante la aportación de calor a la solución.

Respecto al aire, se utilizará el aire exterior para absorber el agua que ha de ceder la solución acuosa en el regenerador. También se aportará calor al aire exterior.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que la solución ceda el agua que ha absorbido anteriormente al aire exterior, se ha aplicado el

sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al regenerador se han obteniendo los valores de salida de los mismos, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada

Para la resolución del sistema de ecuaciones, en el regenerador se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del regenerador, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 2 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 24 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,007908 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 44,24 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.254 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 0,7471 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 24,5 \text{ °C}$$

$$X = 29,45\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 71,40 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 1.423 \text{ Pa}$$

Para el regenerador, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 0,70 \text{ m}^2 \text{ (0,70 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el regenerador, se muestran en la siguiente tabla:

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0079080	29,45	24,000	24,500	44,243	71,403	1254	1423	0,74706
0,0037880	0,0078899	29,45	23,992	24,453	44,197	71,287	1251	1420	0,74703
0,0049349	0,0078844	29,45	23,990	24,439	44,181	71,246	1250	1419	0,74702
0,0060819	0,0078790	29,45	23,988	24,425	44,165	71,205	1250	1418	0,74701
0,0072288	0,0078735	29,45	23,986	24,411	44,149	71,164	1249	1416	0,74700
0,0095228	0,0078627	29,45	23,982	24,384	44,117	71,084	1247	1414	0,74697
0,0106697	0,0078573	29,45	23,980	24,370	44,101	71,044	1246	1413	0,74696
0,0118167	0,0078519	29,45	23,978	24,356	44,086	71,004	1245	1412	0,74695
0,0129636	0,0078465	29,45	23,977	24,343	44,070	70,965	1245	1411	0,74694
0,0152576	0,0078357	29,45	23,973	24,316	44,039	70,887	1243	1408	0,74692
0,0164045	0,0078304	29,45	23,972	24,303	44,024	70,848	1242	1407	0,74691
0,0175515	0,0078250	29,46	23,970	24,290	44,009	70,809	1241	1406	0,74690
0,0186984	0,0078197	29,46	23,969	24,276	43,993	70,771	1240	1405	0,74689
0,0209924	0,0078090	29,46	23,966	24,250	43,963	70,695	1239	1403	0,74687
0,0221393	0,0078037	29,46	23,965	24,237	43,949	70,657	1238	1402	0,74686
0,0232863	0,0077984	29,46	23,963	24,224	43,934	70,619	1237	1401	0,74685
0,0244332	0,0077931	29,46	23,962	24,212	43,919	70,582	1236	1399	0,74683
0,0267272	0,0077826	29,46	23,960	24,186	43,890	70,508	1235	1397	0,74681
0,0278741	0,0077773	29,46	23,959	24,174	43,875	70,471	1234	1396	0,74680
0,0290211	0,0077720	29,46	23,958	24,161	43,861	70,434	1233	1395	0,74679
0,0301680	0,0077668	29,46	23,957	24,149	43,846	70,398	1232	1394	0,74678
0,0324620	0,0077563	29,46	23,955	24,124	43,818	70,326	1230	1392	0,74676
0,0336089	0,0077510	29,46	23,954	24,112	43,804	70,290	1230	1391	0,74675
0,0347559	0,0077458	29,46	23,954	24,099	43,790	70,254	1229	1390	0,74674
0,0359028	0,0077406	29,46	23,953	24,087	43,776	70,219	1228	1389	0,74673
0,0381968	0,0077302	29,46	23,952	24,063	43,748	70,149	1226	1387	0,74671
0,0393437	0,0077250	29,46	23,951	24,051	43,734	70,114	1226	1386	0,74670
0,0404907	0,0077198	29,46	23,951	24,039	43,720	70,079	1225	1385	0,74669
0,0416376	0,0077146	29,46	23,950	24,027	43,707	70,045	1224	1384	0,74668
0,0439316	0,0077042	29,46	23,950	24,004	43,680	69,976	1222	1382	0,74666
0,0450785	0,0076991	29,47	23,950	23,992	43,666	69,942	1221	1381	0,74665
0,0462255	0,0076939	29,47	23,949	23,981	43,653	69,909	1221	1380	0,74664
0,0473724	0,0076887	29,47	23,949	23,969	43,640	69,875	1220	1379	0,74663
0,0496664	0,0076784	29,47	23,949	23,946	43,613	69,809	1218	1377	0,74661
0,0508133	0,0076733	29,47	23,949	23,935	43,600	69,776	1217	1376	0,74659

Tabla 3.12. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 4

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,0519603	0,0076681	29,47	23,949	23,924	43,587	69,743	1217	1375	0,74658
0,0531072	0,0076630	29,47	23,949	23,912	43,574	69,710	1216	1374	0,74657
0,0554012	0,0076527	29,47	23,950	23,890	43,548	69,645	1214	1372	0,74655
0,0565481	0,0076476	29,47	23,950	23,879	43,536	69,613	1213	1372	0,74654
0,0576951	0,0076425	29,47	23,951	23,868	43,523	69,581	1213	1371	0,74653
0,0588420	0,0076374	29,47	23,951	23,857	43,510	69,549	1212	1370	0,74652
0,0611360	0,0076271	29,47	23,952	23,835	43,485	69,486	1210	1368	0,74650
0,0622829	0,0076220	29,47	23,953	23,824	43,473	69,455	1209	1367	0,74649
0,0634299	0,0076169	29,47	23,953	23,814	43,460	69,424	1209	1366	0,74648
0,0645768	0,0076118	29,47	23,954	23,803	43,448	69,393	1208	1365	0,74647
0,0668708	0,0076016	29,47	23,955	23,782	43,424	69,331	1206	1363	0,74645
0,0680177	0,0075965	29,47	23,956	23,771	43,412	69,301	1205	1363	0,74644
0,0691647	0,0075914	29,47	23,957	23,761	43,399	69,270	1205	1362	0,74643
0,0703116	0,0075863	29,47	23,958	23,751	43,387	69,240	1204	1361	0,74642
0,0726056	0,0075761	29,48	23,960	23,730	43,364	69,180	1202	1359	0,74640
0,0737525	0,0075711	29,48	23,961	23,720	43,352	69,151	1201	1358	0,74639
0,0748995	0,0075660	29,48	23,963	23,709	43,340	69,121	1201	1357	0,74638
0,0760464	0,0075609	29,48	23,964	23,699	43,328	69,092	1200	1357	0,74637
0,0783404	0,0075507	29,48	23,966	23,679	43,305	69,033	1198	1355	0,74635
0,0794873	0,0075457	29,48	23,968	23,669	43,294	69,005	1197	1354	0,74634
0,0806343	0,0075406	29,48	23,969	23,659	43,282	68,976	1197	1353	0,74633
0,0817812	0,0075355	29,48	23,971	23,649	43,271	68,947	1196	1353	0,74632
0,0840752	0,0075253	29,48	23,974	23,630	43,248	68,890	1194	1351	0,74630
0,0852221	0,0075203	29,48	23,976	23,620	43,237	68,862	1193	1350	0,74629
0,0863691	0,0075152	29,48	23,977	23,610	43,226	68,834	1193	1349	0,74628
0,0875160	0,0075101	29,48	23,979	23,601	43,214	68,806	1192	1349	0,74627
0,0898100	0,0074999	29,48	23,983	23,581	43,192	68,751	1190	1347	0,74625
0,0909569	0,0074949	29,48	23,985	23,572	43,181	68,723	1189	1346	0,74624
0,0921039	0,0074898	29,48	23,987	23,563	43,170	68,696	1189	1345	0,74623
0,0932508	0,0074847	29,48	23,989	23,553	43,159	68,669	1188	1345	0,74622
0,0955448	0,0074745	29,48	23,993	23,534	43,138	68,615	1186	1343	0,74620
0,0966917	0,0074695	29,48	23,995	23,525	43,127	68,588	1185	1342	0,74619
0,0978387	0,0074644	29,48	23,998	23,516	43,117	68,562	1185	1342	0,74618
0,0989856	0,0074593	29,48	24,000	23,507	43,106	68,535	1184	1341	0,74617
0,1012796	0,0074491	29,49	24,005	23,489	43,085	68,483	1182	1339	0,74615

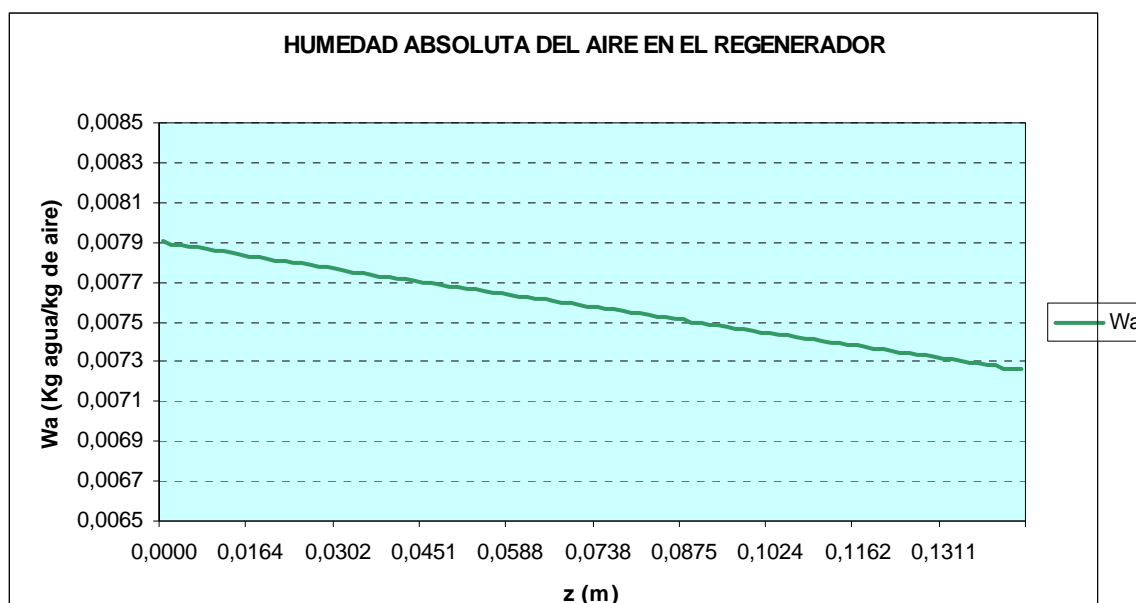
Tabla 3.12. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 4

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1024265	0,0074440	29,49	24,007	23,480	43,074	68,457	1181	1339	0,74614
0,1035735	0,0074389	29,49	24,010	23,471	43,064	68,431	1181	1338	0,74613
0,1047204	0,0074338	29,49	24,012	23,462	43,054	68,405	1180	1337	0,74612
0,1070144	0,0074236	29,49	24,018	23,444	43,033	68,354	1178	1336	0,74610
0,1081613	0,0074185	29,49	24,020	23,435	43,023	68,329	1177	1335	0,74609
0,1093083	0,0074134	29,49	24,023	23,426	43,013	68,303	1177	1334	0,74608
0,1104552	0,0074083	29,49	24,026	23,418	43,003	68,278	1176	1334	0,74606
0,1127492	0,0073981	29,49	24,032	23,400	42,983	68,228	1174	1332	0,74604
0,1138961	0,0073930	29,49	24,035	23,392	42,973	68,204	1173	1331	0,74603
0,1150431	0,0073878	29,49	24,038	23,383	42,963	68,179	1173	1331	0,74602
0,1161900	0,0073827	29,49	24,041	23,375	42,953	68,155	1172	1330	0,74601
0,1184840	0,0073725	29,49	24,048	23,358	42,933	68,106	1170	1329	0,74599
0,1196309	0,0073673	29,49	24,051	23,349	42,924	68,082	1169	1328	0,74598
0,1207779	0,0073622	29,49	24,054	23,341	42,914	68,058	1169	1327	0,74597
0,1219248	0,0073570	29,49	24,058	23,333	42,904	68,034	1168	1327	0,74596
0,1242188	0,0073467	29,49	24,065	23,316	42,885	67,987	1166	1325	0,74594
0,1253657	0,0073416	29,49	24,068	23,308	42,876	67,963	1165	1325	0,74593
0,1265127	0,0073364	29,49	24,072	23,300	42,866	67,940	1165	1324	0,74592
0,1276596	0,0073312	29,49	24,076	23,292	42,857	67,917	1164	1323	0,74591
0,1299536	0,0073209	29,50	24,083	23,276	42,838	67,871	1162	1322	0,74589
0,1311005	0,0073157	29,50	24,087	23,268	42,829	67,848	1161	1321	0,74588
0,1322475	0,0073105	29,50	24,091	23,260	42,820	67,825	1161	1321	0,74587
0,1333944	0,0073053	29,50	24,095	23,252	42,810	67,802	1160	1320	0,74586
0,1356884	0,0072949	29,50	24,103	23,236	42,792	67,757	1158	1319	0,74584
0,1368353	0,0072897	29,50	24,108	23,228	42,783	67,735	1157	1318	0,74583
0,1379823	0,0072845	29,50	24,112	23,220	42,774	67,713	1156	1318	0,74582
0,1391292	0,0072792	29,50	24,116	23,213	42,765	67,691	1156	1317	0,74581
0,1414232	0,0072688	29,50	24,125	23,197	42,747	67,647	1154	1316	0,74579
0,1425701	0,0072635	29,50	24,129	23,190	42,739	67,625	1153	1315	0,74578
0,1433700	0,0072599	29,50	24,132	23,185	42,728	67,599	1152	1314	0,74576

Tabla 3.12. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 4

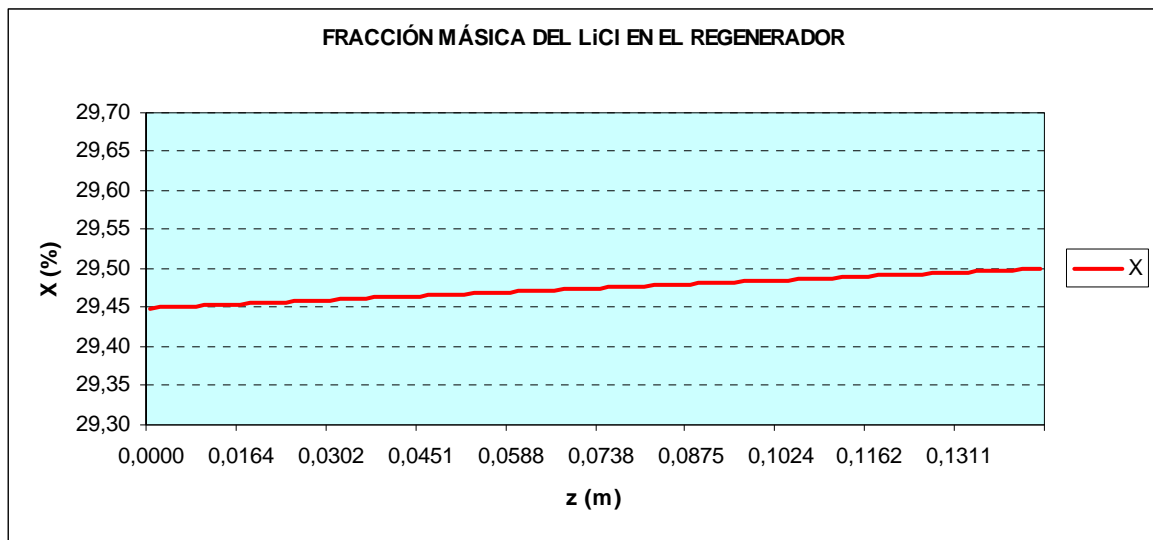
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del regenerador, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



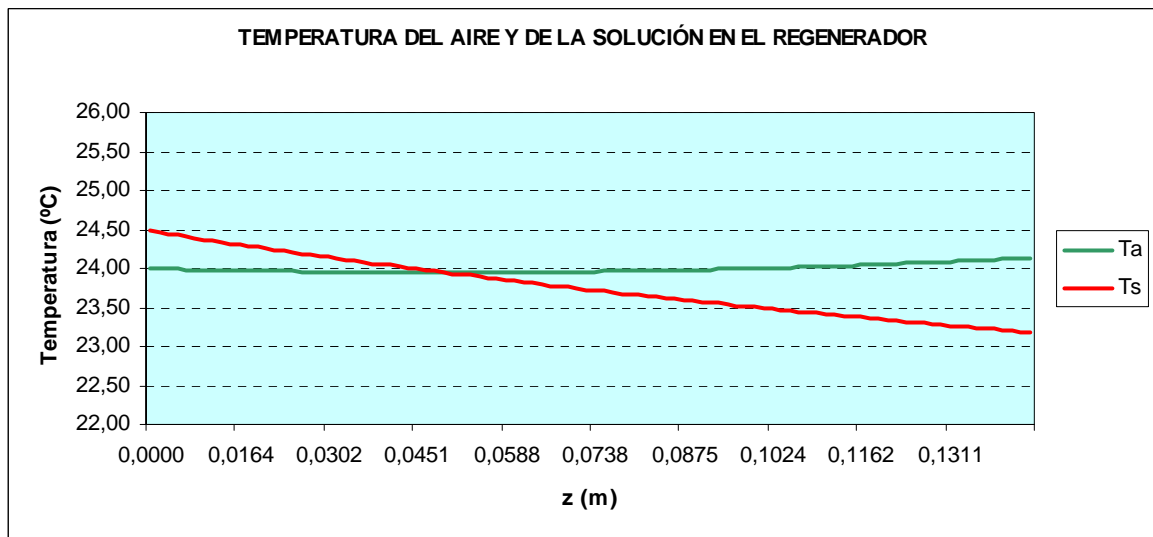
Gráfica 3.16. Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.16 como la humedad absoluta del aire va aumentando a medida que avanza el aire por el regenerador



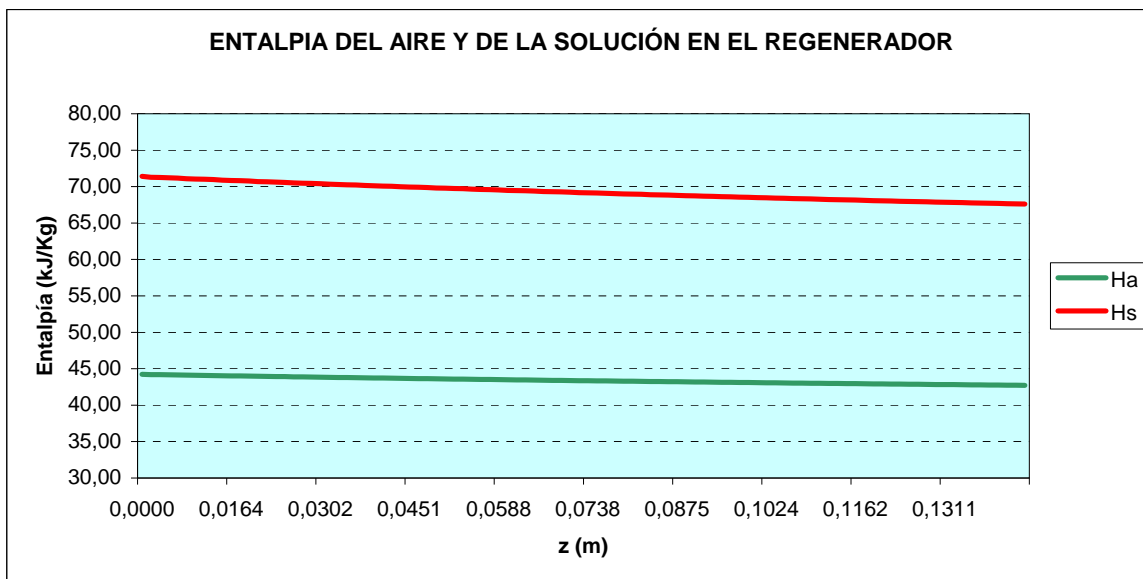
Gráfica 3.17. Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.17 como la fracción másica del cloruro de litio va aumentando a medida que avanza la solución por el regenerador, al ir cediendo el agua al aire.



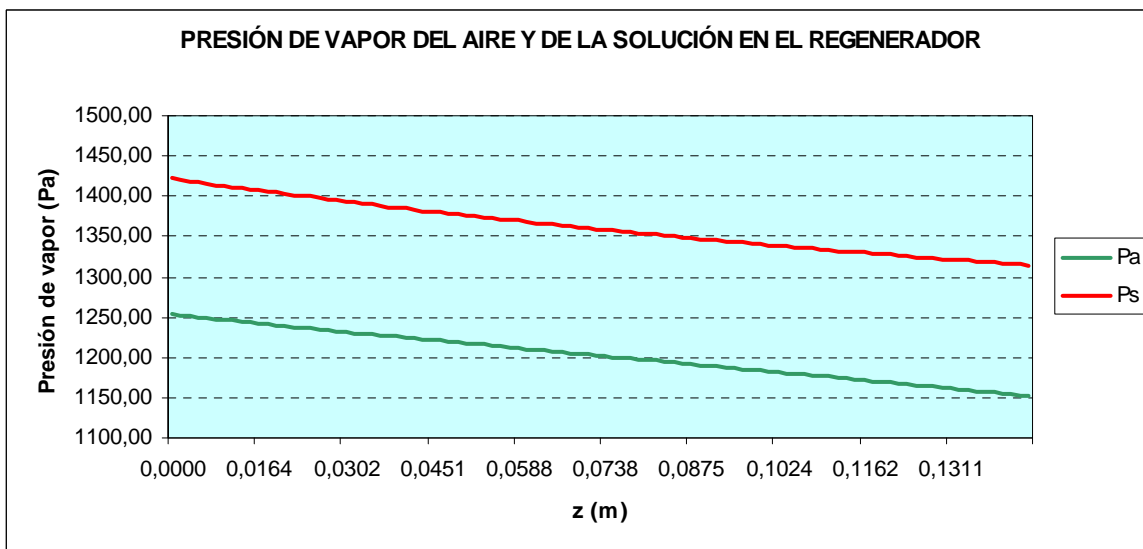
Gráfica 3.18. Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.18 como la temperatura de la solución desciende y la temperatura del aire disminuye muy ligeramente. Al estar las temperaturas de los dos fluidos tan próximas, llegan a cruzarse.



Gráfica 3.19. Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.19 como la entalpía del aire aumenta ligeramente y la entalpía de la solución disminuye, también ligeramente.



Gráfica 3.20. Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 4

Se observa en la gráfica 3.20 como la presión de vapor del aire aumenta al ir absorbiendo el vapor de agua, y como la presión de vapor de la solución disminuye al ir cediendo el agua al aire.

Respecto al aire exterior utilizado en el regenerador, en la figura 3.17 se representan, el diagrama psicrométrico del ciclo que realiza.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

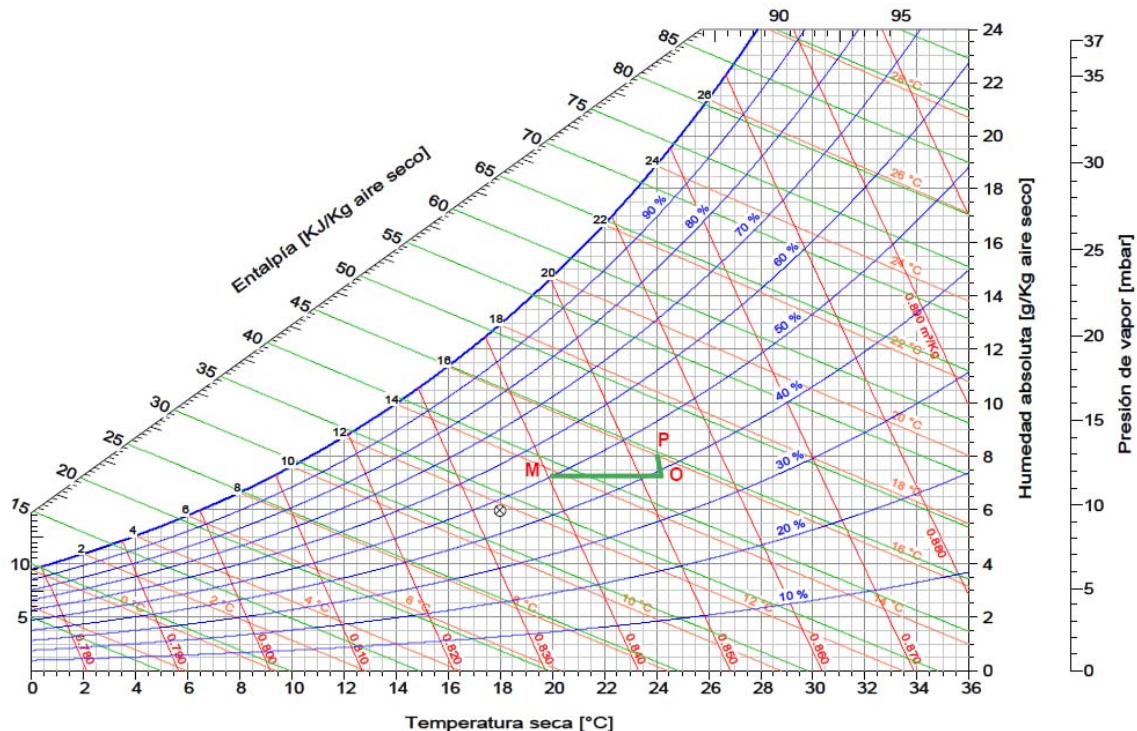


Figura 3.17. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa del cloruro de litio. Proceso 4

Como se observa, se ha elegido como punto inicial del aire exterior las condiciones medias de 20°C y 50% de humedad relativa. Es necesario aportar calor para que alcance la temperatura para ser capaz de conseguir la absorción del agua que ha de ceder la solución en el regenerador.

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DE LA SOLUCIÓN

La solución necesita aporte de calor a la salida del absorbedor para aumentar la presión de vapor y necesita aporte de frío a la salida del regenerador para disminuir la presión de vapor. (Ver figura 3.16)

Para mejorar el coste energético de este proceso, se utilizará un recuperador de calor de la solución para conseguir el intercambio térmico, parcial, sin coste energético adicional, los valores de las temperaturas de la solución permiten utilizar un recuperador de calor que recuperaría calor de la solución a la salida del regenerador y lo cedería a la solución a la salida del absorbedor precalentándola.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - solución procedente del regenerador: 15,56°C a 18,18°C
 - solución procedente del absorbedor: 23,18°C a 20,56°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 5,87 \text{ kW}$

La potencia calorífica restante que necesita la solución se aportará mediante un condensador frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 18,18°C a 24,5°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 14,14 \text{ kW}$

La potencia frigorífica restante necesaria se aportará mediante un evaporador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia frigorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 20,56°C a 14,5°C
 - $P_{\text{Frigorífica}} = 13,52 \text{ kW}$

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DEL AIRE EXTERIOR

En este caso a la salida del regenerador, el aire exterior está a una temperatura que no permite utilizar un recuperador de calor para enfriar el aire, precalentando el aire de la entrada, por lo que toda la potencia calorífica que se precisa en el aire exterior, antes de entrar al regenerador se aportará mediante un condensador frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 20°C a 24,13°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 8,41 \text{ kW}$

A partir de los resultados obtenidos se concluye que las potencias totales que precisa este proceso son:

- Potencia frigorífica: 13,52 kW
- Potencia calorífica: $2,41 + 14,14 + 8,41 = 24,96 \text{ kW}$

CIRCUITO FRIGORÍFICO

Para el circuito frigorífico que suministrará la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesarias se ha de elegir la temperatura de evaporación mayor posible y la temperatura de condensación menor posible, para conseguir obtener tener mejor CEE.

Igual que en los casos anteriores, se ha considerado un incremento de temperatura de 5°C entre el refrigerante y el fluido externo, tanto en el condensador como en el evaporador.

La temperatura de evaporación será:

$$T^{\text{a}} \text{ evap} = 14,5 - 5 = 9,5^{\circ}\text{C}$$

La temperatura de condensación será:

$$T^{\text{a}} \text{ cond} = 24,5 + 5 = 29,5^{\circ}\text{C}$$

El CEE del compresor del circuito frigorífico que se obtiene es:

$$\text{CEE} = \frac{0,45 (273 + 9,5)}{(29,5 - 9,5)} = 6,356$$

Este valor es el valor mayor de los cuatro procesos presentados, este proceso es el que tiene mas próximas la temperatura de condensación y la temperatura de evaporación.

Como la potencia calorífica necesaria es bastante mayor que la potencia frigorífica necesaria, el valor más exigente para el circuito frigorífico es la potencia calorífica.

Es decir, se obtendrá la potencia frigorífica que necesita el circuito frigorífico (superior a la que necesita el proceso, en este caso la solución) para conseguir obtener la potencia calorífica total necesaria en el proceso.

Considerando que la potencia calorífica es la suma de la potencia frigorífica y la potencia absorbida por el compresor.

Potencia calorífica = potencia frigorífica + potencia absorbida

A partir de la potencia frigorífica, la potencia absorbida que se obtiene es:

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{\text{CEE}} = \frac{21,6}{6,356} = 3,398 \text{ kW}$$

y la potencia calorífica que se obtiene es:

$$\text{Potencia calorífica} = 21,6 + 3,398 = 25 \text{ kW}$$

valor que iguala la potencia calorífica necesaria en el proceso

Con ello quedaría cubierta la demanda de potencia frigorífica y potencia calorífica calculada para este proceso.

Finalmente, para este proceso, la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representa el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseado es de:

$$3,398 \text{ kW} / 1,2960 \text{ g/s} = 2,622 \text{ kJ/g}, \text{ que equivale a } 2.622 \text{ kJ/kg de agua}$$

En el apartado 3.2.5 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los cuatro procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que en este proceso se ha obtenido un consumo energético en el compresor del 85,52% del consumo obtenido en el proceso 1, por lo que energéticamente supera el proceso 1 pero no los procesos 2 y 3.

3.2.5. RESULTADOS. COMPARATIVA

Se han presentado 4 procesos diferentes para el tratamiento del aire en secaderos industriales. Dado que las necesidades de cada producto a tratar, en un secadero, son diferentes y consecuentemente los resultados pueden ser diferentes, se ha elegido un producto en concreto y los parámetros de trabajo habituales para ese producto.

Se han aplicado los cuatro procesos para atender las mismas necesidades del secadero industrial.

El primer y segundo proceso utilizan un circuito frigorífico con un refrigerante primario.

El tercero y el cuarto utilizan una instalación frigorífica que mezcla el uso de un refrigerante primario y un refrigerante secundario, con propiedades deshidratantes, en concreto la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

Se ha realizado la comparativa de los cuatro procesos según detalle:

- A) Según las temperaturas de evaporación y de condensación del refrigerante primario
- B) Según el CEE del compresor del circuito frigorífico
- C) Según la potencia frigorífica total necesaria en el proceso
- D) Según el ratio del consumo energético respecto al agua eliminada

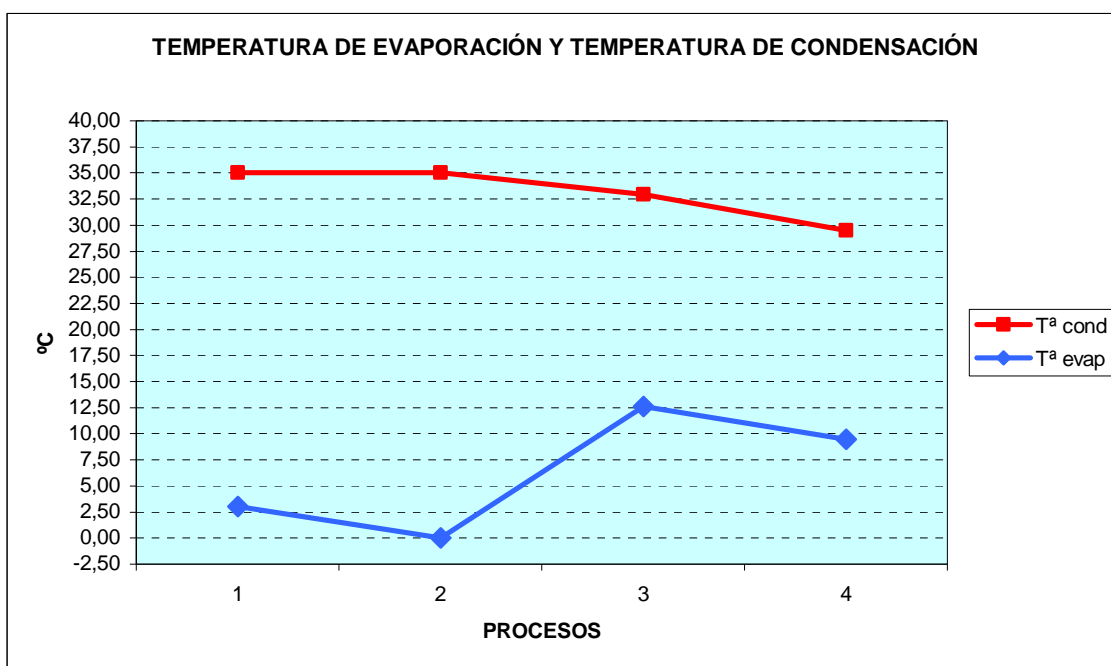
A continuación se presentan la recopilación de los resultados obtenidos

A) Comparativa de los cuatro procesos según las temperaturas de evaporación y de condensación del refrigerante primario

La tabla 3.13 y la gráfica 3.21 muestran la comparativa de la temperatura de condensación y la temperatura de evaporación de los cuatro procesos estudiados.

Proceso	T ^a evap (°C)	T ^a cond (°C)
1	3	35
2	0	35
3	12,62	32,93
4	9,50	29,50

Tabla 3.13. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados



Gráfica 3.21 Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados

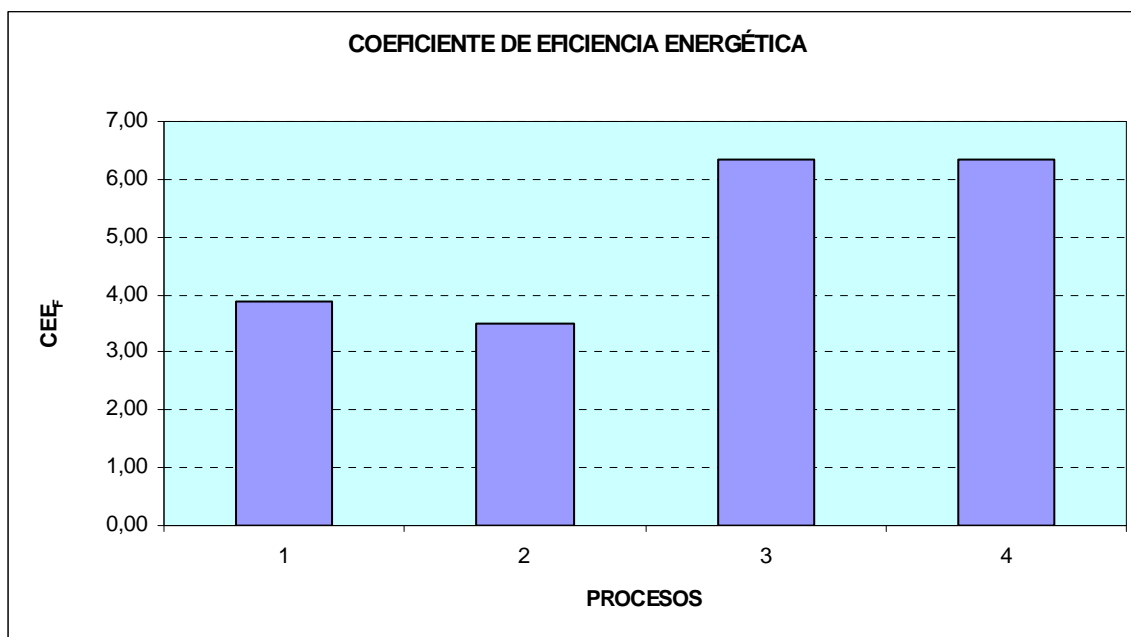
Se observa como las temperaturas más altas de evaporación y las temperaturas más bajas de condensación se dan en los procesos que mezclan el uso de refrigerantes primarios y refrigerantes secundarios, proceso 3 y proceso 4.

B) Comparativa de los cuatro procesos según el CEE del compresor del circuito frigorífico

La tabla 3.14 y la gráfica 3.22 muestran la comparativa de los Coeficientes de Eficiencia Energética de los cuatro procesos estudiados.

Proceso	CEE _F
1	3,88
2	3,51
3	6,33
4	6,36

Tabla 3.14. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados



Gráfica 3.22 Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados

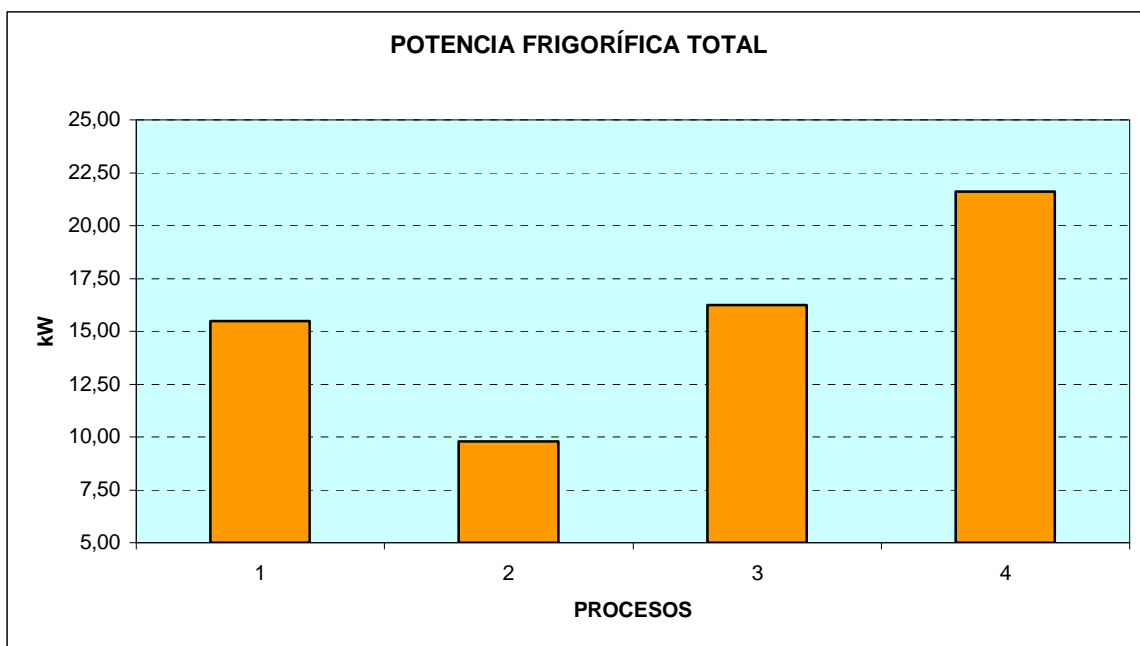
Se observa como las mayores eficiencias energéticas se obtienen en los procesos que mezclan el uso de refrigerantes primarios y refrigerantes secundarios, proceso 3 y proceso 4, como consecuencia de tener la temperaturas más altas de evaporación y más bajas de condensación, según la comparativa anterior.

C) Comparativa de los cuatro procesos según la potencia frigorífica total necesaria en el proceso

La tabla 3.15 y la gráfica 3.23 muestran la comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en los cuatro procesos estudiados.

Proceso	P _F (kW)
1	15,477
2	9,775
3	16,250
4	21,600

Tabla 3.15. Comparativa de la potencia frigorífica necesaria en el circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados



Gráfica 3.23 Comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en el circuito frigorífico de los cuatro procesos presentados

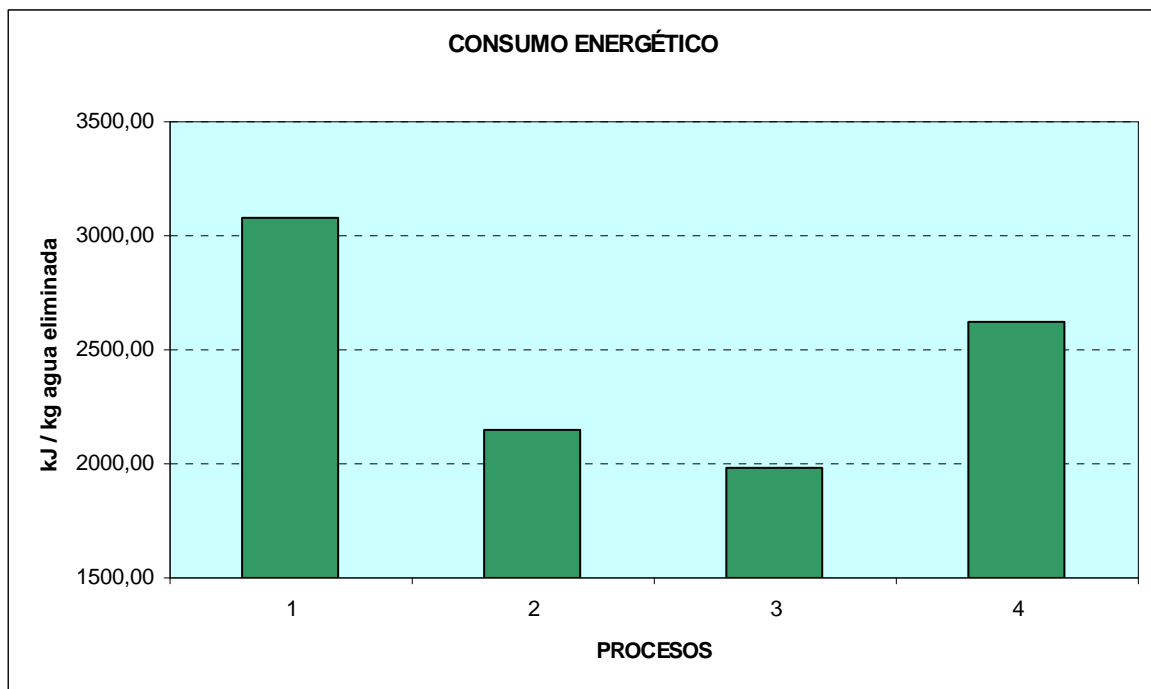
Se observa como la menor potencia frigorífica necesaria es la del proceso 2 (circuito frigorífico mejorado), sin embargo los proceso 3 y proceso 4 son mayores. Hay que recordar que en esos circuitos la pot. frigorífica es mayor de la necesaria para poder obtener la potencia calorífica necesaria en el proceso.

D) Comparativa de los cuatro procesos según el ratio del consumo energético respecto al agua eliminada

La tabla 3.16 y la figura 3.24 muestran la comparativa que se obtiene en los cuatro procesos estudiados

Proceso	Consumo kJ/kg agua
1	3.077
2	2.149
3	1.981
4	2.622

Tabla 3.16 Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los cuatro procesos presentados



Gráfica 3.24 Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los cuatro procesos presentados

Se observa como el mayor consumo energético por kg de agua eliminada se obtiene en el proceso 1, circuito frigorífico convencional y el menor en el proceso 3, que mezcla refrigerantes primarios y secundarios.

De todo lo anterior se desprende que el proceso 1, que representa el proceso más utilizado habitualmente en los secaderos, ha sido superado por otros procesos energéticamente más eficaces.

En la comparativa realizada se observa que el proceso 1 es el que ha resultado con el consumo por kg de agua eliminada es el más alto de los cuatro procesos presentados, cualquiera de los otros tres procesos tiene un ratio inferior.

El proceso 2 es el que menor potencia frigorífica requiere pero como la eficiencia energética es la más baja, el consumo energético por kg de agua eliminada es mayor que el proceso 3.

El proceso 3 requiere más potencia frigorífica que el proceso 1 y 2 pero al tener mayor la eficiencia energética, resulta que el consumo energético por kg de agua eliminada es menor.

Entre el proceso 3 y 4, que tienen similar la eficiencia energética, al ser menor la potencia frigorífica requerida en 3, el consumo energético por kg de agua eliminado es menor.

El proceso 4 es el que mejor coeficiente de eficiencia energética tiene, sin embargo al necesitar más potencia frigorífica resulta con más consumo energético por kg de agua eliminada que el proceso 3.

El mezclar en una instalación frigorífica un refrigerante primario y como refrigerante secundario una solución acuosa de cloruro de litio no garantiza mejores resultados energéticos, véase que el proceso 2 presenta un consumo menor que el proceso 4, pero dependiendo de los parámetros de trabajo de la solución, tanto en el absorbedor como en el regenerador, se pueden encontrar procesos con menor consumo energético, como el proceso 3 presentado.

En resumen, el consumo energético depende de la potencia frigorífica total o de la potencia calorífica total necesaria en el proceso y de la eficiencia del circuito frigorífico, que a la vez depende de la temperatura de evaporación y de la temperatura de condensación del refrigerante primario del circuito frigorífico.

Para la aplicación en secaderos industriales, se ha encontrado una alternativa más eficaz energéticamente para la deshumidificación con un circuito frigorífico que combina el uso de un refrigerante primario y una mezcla acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario, actuando como deshidrantante y realizando la regeneración de la solución mediante el mismo circuito frigorífico e incorporando recuperadores de calor donde los parámetros lo permiten para mejora la eficiencia del proceso.

4 APLICACIÓN A LA DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD

4 APLICACIÓN A LA DESHUMECTACIÓN DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD

4.1. INTRODUCCIÓN

Se trata de locales que reciben altos aportes de humedad absoluta por diferentes motivos, como pueden ser:

- locales industriales con maquinaria que en su funcionamiento desprende vapor de agua
- laboratorios en los que la normativa exige la entrada de un alto caudal de aire exterior y/o un nivel de sobrepresión o depresión relativa entre ambientes contiguos y es el aire exterior el que introduce en el ambiente, valores importantes de vapor de agua
- locales de alta ocupación de personas por la actividad que se desarrolla en su interior y son las personas las que desprenden vapor de agua al ambiente

En este tipo de locales, en verano, es necesario que el tratamiento del aire elimine potencia sensible y potencia latente del aire interior para mantener la temperatura y la humedad del aire interior dentro del rango deseado.

Los datos iniciales considerados para realizar los cálculos de esta aplicación son:

- Temperatura media exterior..... 26°C
- Humedad relativa media exterior 60%
- Temperatura interior deseada 25°C

- Humedad relativa interior deseada 50%
- Caudal de aire exterior exigido por normativa..... 4.320 m³/h
- Potencia frigorífica sensible interior 29.716 W
- Potencia frigorífica latente interior..... 28.305 W
- Potencia frigorífica interior total 58.020 W
- Factor de calor sensible interior 0,51

A continuación se exponen tres procesos alternativos distintos para conseguir tratar el caudal de aire necesario para neutralizar los aportes de potencia frigorífica sensible y potencia frigorífica latente y conseguir las condiciones interiores deseadas.

4.2. TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD

4.2.1. PROCESO 1 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO

Se trata del primer proceso que se plantea para resolver el tratamiento del aire de esta aplicación. Es el proceso tradicionalmente utilizado.

En general, el tratamiento del aire de un local en el ciclo de verano consiste en enfriar el aire hasta las condiciones de impulsión necesarias para conseguir el equilibrio en las condiciones interiores deseadas. Esto se realiza a partir del factor de calor sensible interior del local.

El problema reside, en este caso, en el bajo factor de calor sensible interior, 0,51, no es posible eliminar el aporte de potencia frigorífica sensible y potencia frigorífica latente requerido, en un solo paso. No hay evaporador alguno que pueda realizar el tratamiento requerido,

Por ello, en este primer proceso, se plantea hacer un tratamiento en dos etapas:

- Etapa 1: Enfriamiento y deshumectación

Consiste en enfriar el caudal de aire, resultante de la mezcla del aire exterior y del aire procedente del local, a través del evaporador de un circuito frigorífico, para suministrarle la potencia frigorífica necesaria para reducir la temperatura y la humedad absoluta hasta la temperatura de rocío de las condiciones de impulsión del aire. (De A a B en figuras 4.1 y 4.2)

- Etapa 2: Calefacción

Consiste en calentar el caudal de aire procedente del evaporador hasta la temperatura de impulsión necesaria, manteniendo la humedad absoluta constante.

Lo más eficaz energéticamente es utilizar la potencia del condensador del mismo circuito frigorífico. (De B a C en figuras 4.1 y 4.2)

De esta forma el aire a la salida del condensador frigorífico está en las condiciones adecuadas para ser impulsado al ambiente mediante un ventilador y volver a realizar un nuevo ciclo.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 4.1:

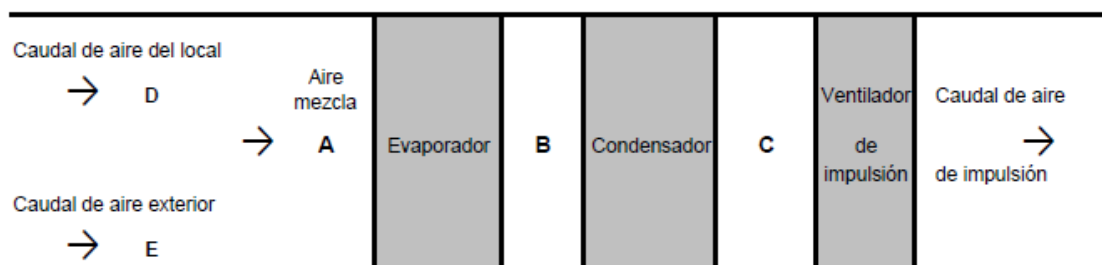


Figura 4.1. Esquema de principio del tratamiento de aire en dos etapas. Proceso 1

En la tabla 4.1 de detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES						
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C	D	E
Ta	°C	25,26	12	19,54	25	26
Hrel	%		90		50	60
Wa x 1000	g agua/kg aire	10,680	7,850	7,850	9,800	12,600
Ha	kJ/kg	52,590	31,860	39,550	50,450	58,500

Tabla 4.1. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 1

La figura 4.2 representa, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, las dos etapas que se desean realizar en el aire.

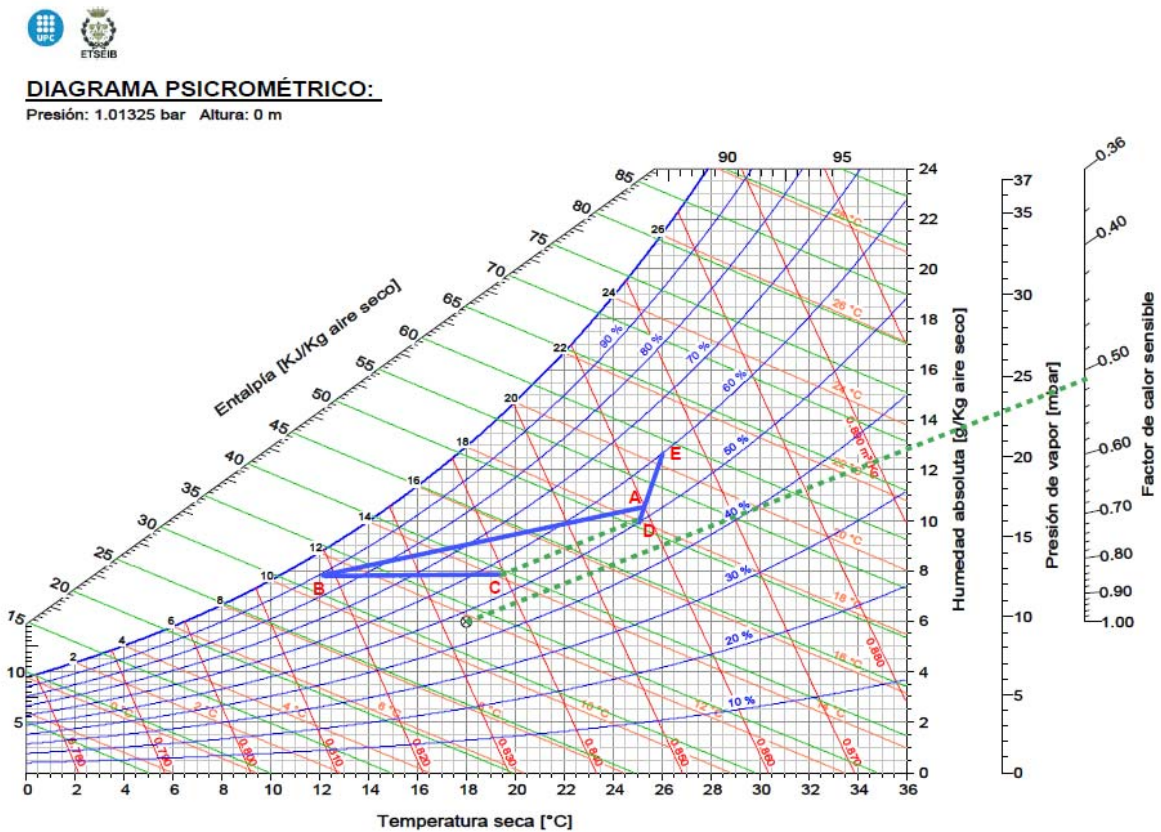


Figura 4.2. Diagrama psicrométrico del tratamiento del aire en dos etapas. Proceso 1

La evolución del aire en el interior del local, de C a D, se muestra en la línea discontinua de color verde de la figura 4.2

El caudal de aire necesario a tratar se obtiene mediante la ecuación:

$$P_F = \dot{m}_a (h_D - h_C)$$

en este caso

$$58,02 \text{ kW} = \dot{m}_a \text{ kg/s} (50,45 - 39,55) \text{ kJ/kg}$$

resultando $\dot{m}_a = 5,3229 \text{ kg/s}$

La potencia frigorífica que es necesario suministrar al aire en el evaporador se obtiene mediante la expresión:

$$P_F = \dot{m}_a (h_A - h_B) = 5,3229 \text{ kg/s} (52,590 - 31,860) \text{ kJ/kg} = 110,34 \text{ kW}$$

Para suministrar la potencia frigorífica obtenida, es necesario que la temperatura de evaporación del circuito frigorífico sea menor que la temperatura de salida del aire, que es de 12°C.

Cuanto menor sea la temperatura de evaporación, mayor será el incremento medio logarítmico de temperaturas en el evaporador y menor superficie de intercambio será necesaria, pero menor será el CEE y mayor será el consumo eléctrico del circuito.

El incremento térmico que se ha considerado, para todos los procesos, para poder comparar resultados, es de 5°C, que además es el incremento térmico económico, a la práctica muy utilizado, como solución de compromiso entre consumo del circuito frigorífico y el coste de inversión del equipo.

Es este caso la temperatura de evaporación es de $12 - 5 = 7^\circ\text{C}$

El caudal de agua eliminado se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Caudal agua eliminada} &= \dot{m}_a (W_A - W_B) = \\ &= 5,3229 \text{ kg/s} (10,680 - 7,850) \text{ g agua/kg aire} = 15,0639 \text{ g agua/s} \end{aligned}$$

La potencia calorífica que precisa el aire en el condensador se obtiene mediante la expresión:

$$P_C = \dot{m}_a (h_C - h_B) = 5,3229 \text{ kg/s} (39,550 - 31,860) \text{ kJ/kg} = 40,93 \text{ kW}$$

Se observa que en esta aplicación la potencia calorífica necesaria es menor que la potencia frigorífica necesaria, cuando es sabido que en cualquier circuito frigorífico la potencia calorífica siempre es superior a la potencia frigorífica.

Como consecuencia, habrá un excedente de calor que se podría utilizar en otras demandas térmicas que pudiesen haber, pero para no depender de ello, se ha considerado que no se utiliza y que será necesario ceder al aire exterior.

Se concluye de lo anterior que el circuito frigorífico simple no se podría utilizar para esta aplicación sino que se ha de modificar para esta aplicación.

El circuito frigorífico para esta aplicación necesita disponer de dos condensadores:

- Condensador interior, encargado de suministrar la potencia calorífica necesaria al aire a tratar, en la segunda etapa del proceso
- Condensador exterior, encargado de ceder al aire exterior el excedente de calor, para no ceder más calor del deseado en el condensador interior, que provocaría un aumento de la temperatura interior no deseado.

Como la temperatura del aire exterior elegida, promedio del verano, es de 26°C, considerando que el salto térmico del aire en los condensadores frigoríficos que se fabrican se encuentra entorno a 10°C, la temperatura del aire a la salida del condensador será de 36°C, por lo que análogamente a lo explicado en el evaporador, la temperatura de condensación ha de ser 5°C mayor, es decir 41°C.

El circuito frigorífico que aportara la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesaria, tendría la temperatura de evaporación de 7°C y la temperatura de condensación de 41°C, por lo se puede conocer el CEE del compresor del circuito frigorífico, que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$CEE = \frac{0,45 (273 + 7)}{(41 - 7)} = 3,706$$

y como es sabido que

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{\text{CEE}}$$

aplicándolo en este caso, la potencia absorbida que se obtiene es::

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{110,34}{3,706} = 29,774 \text{ kW}$$

con lo que se puede obtener la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representará el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseada.

En este caso resulta de:

$$29,774 \text{ kW} / 15,0639 \text{ g/s} = 1,977 \text{ kJ/g, que equivale a } 1.977 \text{ kJ/kg agua}$$

En el apartado 4.2.4 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los tres procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que es este proceso el que presenta el peor valor obtenido, por ser el consumo más alto de los tres procesos.

4.2.2. PROCESO 2 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 1

Se trata del segundo proceso que se presenta como alternativa para la deshumidificación del aire en locales con altos aportes de humedad.

En este caso se pretende el mismo objetivo que en los procesos anteriores, conseguir las mismas condiciones finales del aire a partir de las mismas condiciones iniciales, mediante la utilización de una instalación frigorífica que combina el uso de un refrigerante primario y la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

En la alternativa 1, el proceso que se ha elegido consiste en hacer el tratamiento del aire en un solo paso, utilizando el absorbedor a contracorriente explicado en el apartado 2.2.2 (De A a B en figuras 4.3 y 4.4).

El proceso se realiza en una sola etapa.

- Etapa 1: Deshumidificación

Consiste en hacer circular el caudal de aire a tratar, procedente de la mezcla del aire exterior exigido por la normativa y del aire del local, a través del absorbedor para reducir la temperatura y la humedad absoluta a los valores de las condiciones de impulsión necesarias para neutralizar la potencia frigorífica sensible interior y la potencia frigorífica latente interior del local. (De A a B en figuras 4.3 y 4.4).

El absorbedor tendrá, en flujo a contracorriente, la solución acuosa de cloruro de litio en los valores adecuados para conseguir los valores finales del aire directamente a la salida del absorbedor.

Será necesario la regeneración de la solución para ceder el agua absorbida al aire exterior.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 4.3:

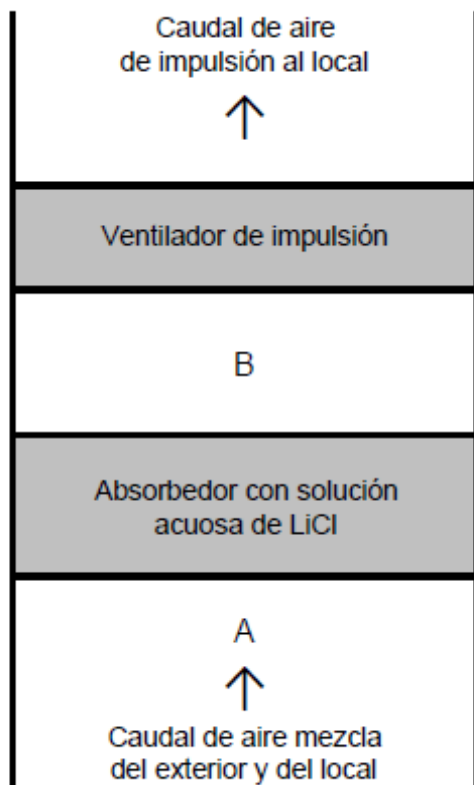


Figura 4.3. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2

En la tabla 4.2 de detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES			
VARIABLE	UNIDADES	A	B
Ta	°C	25,26	19,54
Wa x 1000	g agua/kg aire	10,680	7,850
Ha	kJ/kg	52,588	39,550
Pa	Pa	1686	1245
Ma	kg/s	5,3229	5,3229

Tabla 4.2. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 2

En la figura 4.4 se representan, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, el proceso que tiene lugar en aire.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

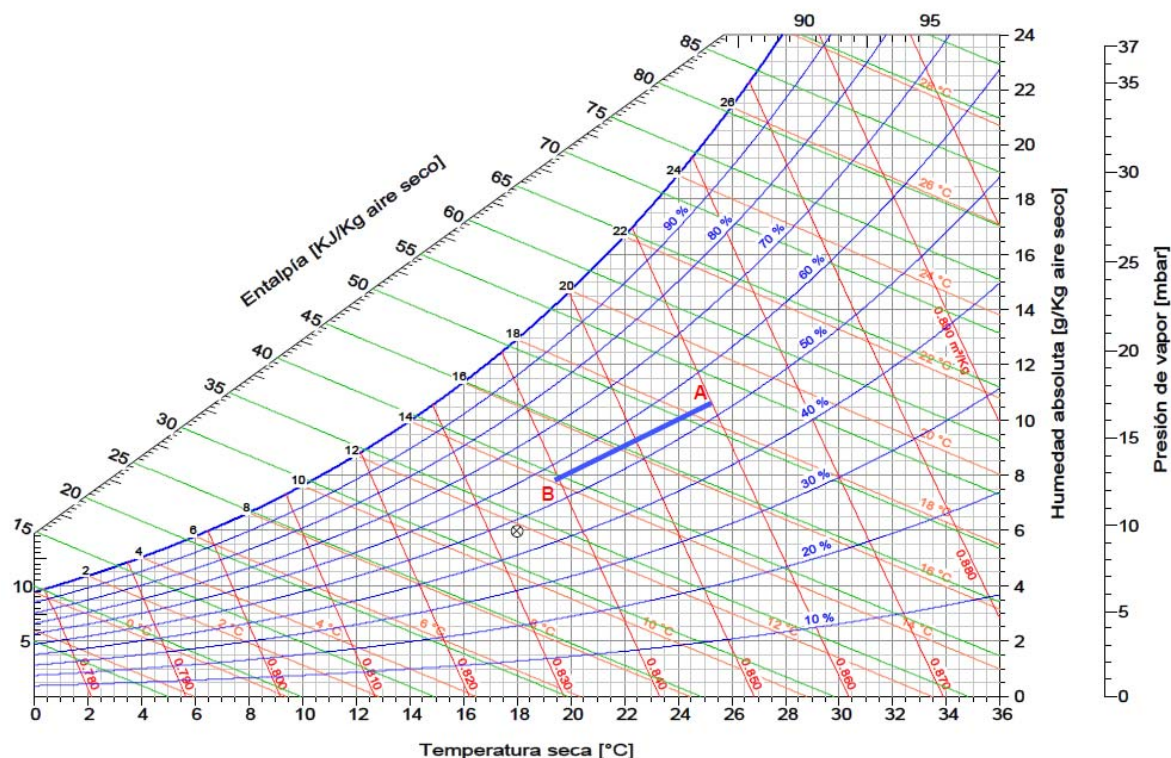


Figura 4.4. Diagrama psicrométrico del tratamiento del aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2

Para conseguir que el aire a tratar realice este proceso se precisa que todos los valores de las variables de los flujos que intervienen tenga los valores adecuados que lo permitan. Por lo que se hace necesario la definición de todos los flujos y valores de las variables del ciclo completo explicado en el capítulo 2, apartado 2.3.

La figura 4.5 muestra el esquema de principio global del proceso.

El código de colores utilizado en la figura 4.5 es:

- — Solución acuosa de cloruro de litio
- — Aire a tratar (absorbedor)
- — Aire exterior (regenerador)

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA EL AIRE								
VARIABLE	UNIDADES	A	B	M	N	O	P	Q
Ta	°C	25,26	19,54	26	27	33,09	32	31
Wa x 1000	g agua/kg aire	10,680	7,850	12,700	12,700	12,700	13,955	13,955
Ha	Kj/kg	52,588	39,550	58,490	59,521	65,780	67,870	66,842
Pa	Pa	1686	1245	1998	1998	1998	2191	2191
Ma	kg/s	5,3229	5,3229	12	12	12	12	12

Tabla 4.3. Tabla de valores de las variables del aire. Proceso 2

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO							
VARIABLE	UNIDADES	1	2	3	4	5	6
X	% kgLiCl/Kgsolución	28,00	27,80	27,80	27,80	28,00	28,00
Ts (°C)	g agua/kg aire	12,53	22,99	25,31	34,00	30,33	27,99
Hs	kJ/kg	31,770	63,116	70,152	96,560	85,750	78,669
Ps	Pa	898	1437		2682	2166	
Ms	kg/s	2,1429	2,1579	2,1579	2,1579	2,1429	2,1429

Tabla 4.4. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2

A continuación se explica el desarrollo de este proceso.

ABSORBEDOR

Es el equipo en el que la mezcla acuosa de cloruro de litio deshumidifica el caudal de aire que se ha de tratar, absorbiendo la cantidad de vapor de agua sobrante, presente en el aire inicialmente. En este caso se ha elegido el caudal de aire vertical, ascendente y la solución vertical descendente.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que el aire realice el proceso descrito (de A a B), se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al absorbedor de la solución acuosa de cloruro de litio, se han obteniendo los valores de la solución acuosa de cloruro de litio a la salida del mismo, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del absorbedor, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 5,3229 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 19,54 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,00785 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 39,550 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.245 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 2,1429 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 12,53 \text{ °C}$$

$$X = 28\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 31,770 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 898 \text{ Pa}$$

Para el calor específico de la solución, a partir de las ecuaciones 2.43, y 2.46 se ha utilizado la expresión:

$$C_{ps} = \frac{dH_s}{dT_s} = B + (2CT_s)$$

Para el absorbedor, los parámetros considerados son:

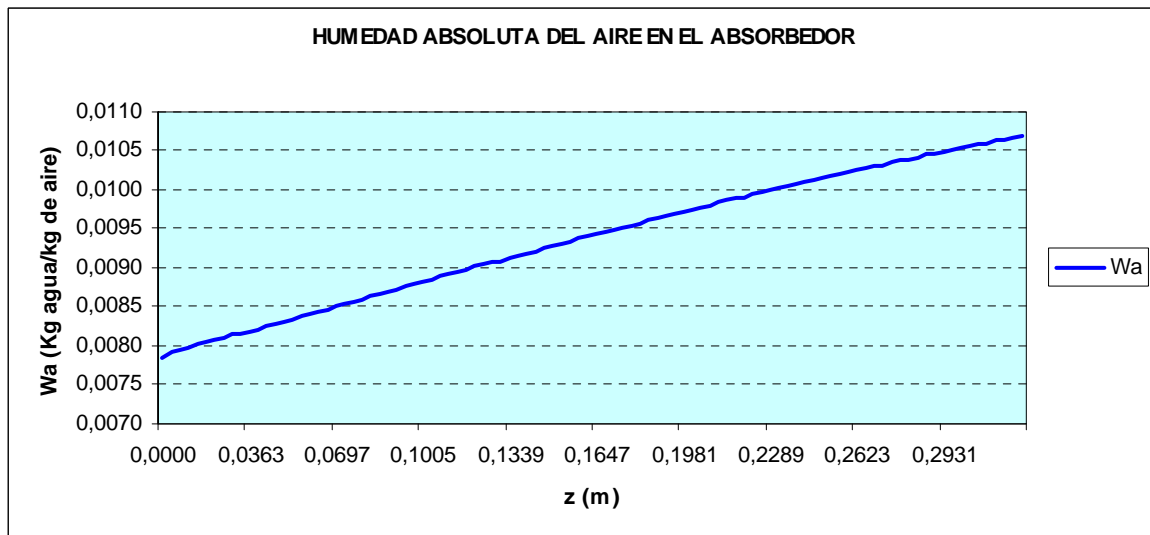
$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 1,75 \text{ m}^2 \text{ (1,75 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW}/\text{m}^2\text{°C}$$

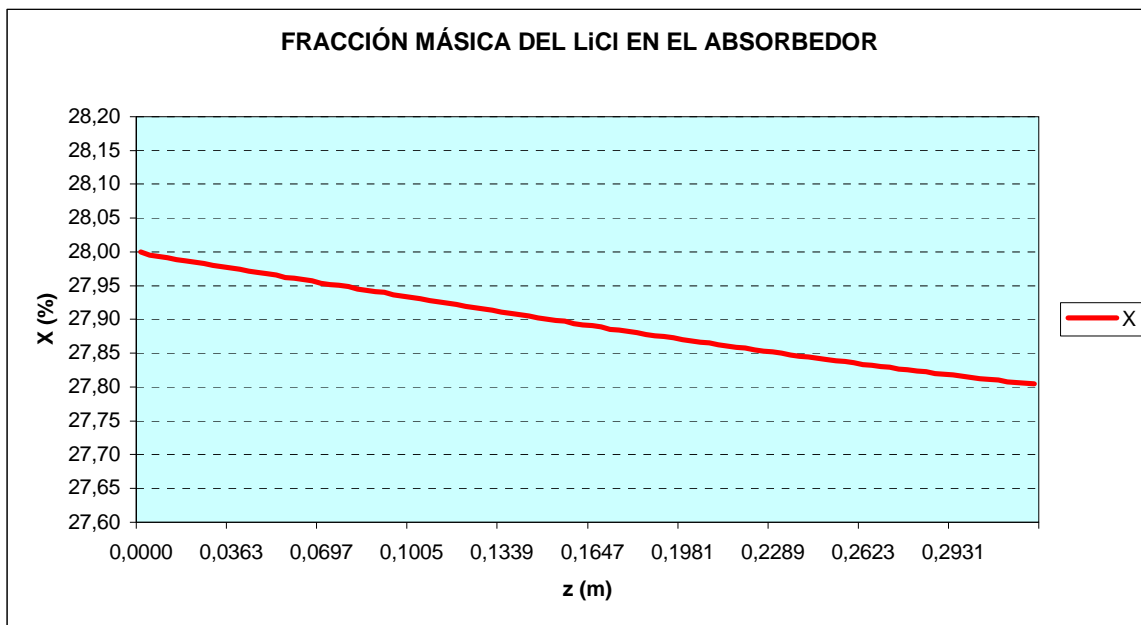
Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z, para el absorbedor, se muestran en al Anexo A.

Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del absorbedor, se ha realizado la representación gráfica. Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



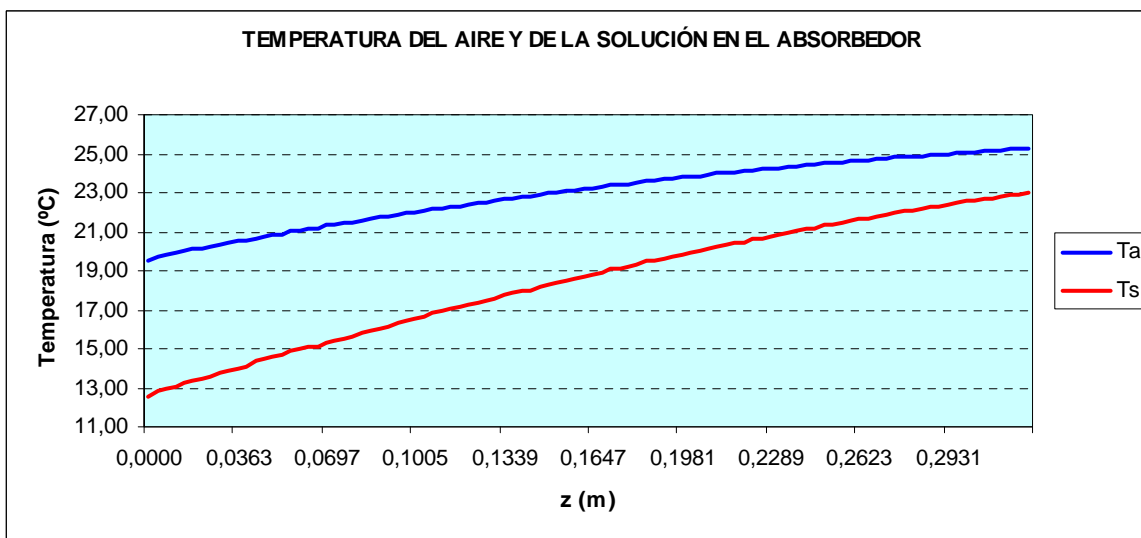
Gráfica 4.1 Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.1 como la humedad absoluta del aire va disminuyendo a medida que avanza el aire por el absorbedor



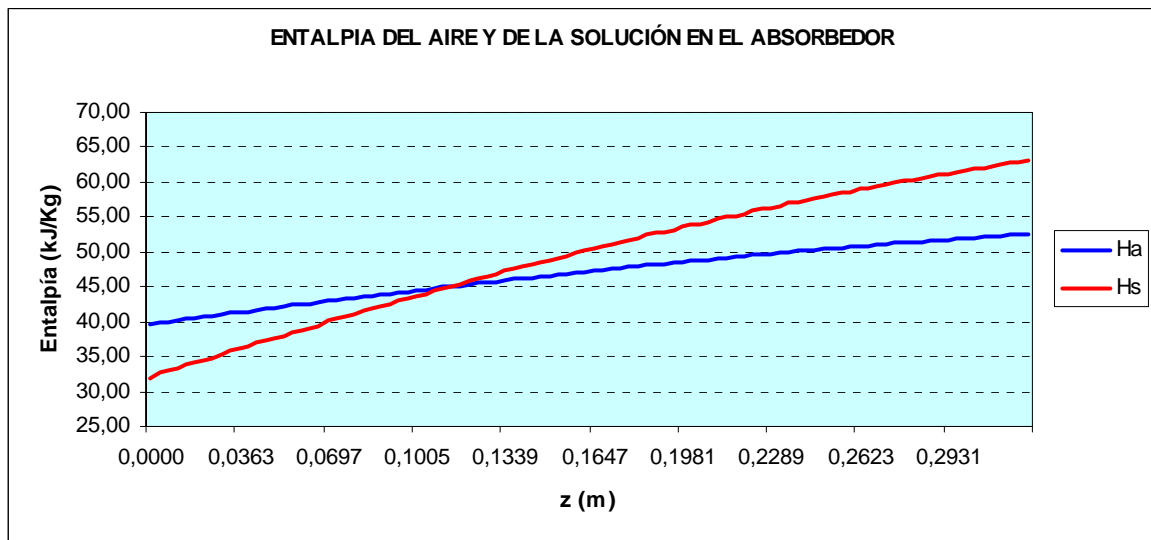
Gráfica 4.2 Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.2 como la fracción másica del cloruro de litio va disminuyendo a medida que avanza la solución por el absorbedor, al ir absorbiendo el vapor de agua del aire.



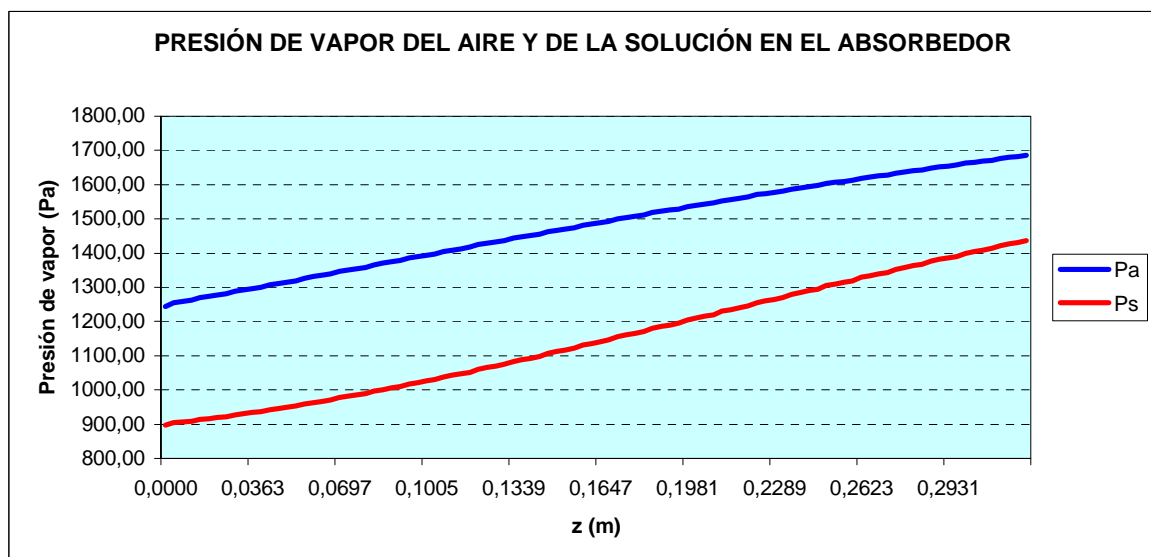
Gráfica 4.3 Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.3 como la temperatura de la solución aumenta absorbiendo la energía cedida en el proceso de deshumectación, mientras que la temperatura del aire disminuye tal como se deseaba.



Gráfica 4.4 Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.4 como la entalpía del aire disminuye mientras la de la solución aumenta



Gráfica 4.5 Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.5 como la presión de vapor del aire disminuye al ir cediendo vapor de agua, mientras aumenta la presión de vapor de la solución.

REGENERADOR

Una vez que la solución acuosa de cloruro de litio ha absorbido el vapor de agua que inicialmente estaba en el caudal de aire tratado, es necesario hacerla pasar por el regenerador para que elimine el agua que ha absorbido y recupere sus condiciones iniciales para iniciar un nuevo ciclo. El proceso que tiene lugar en el regenerador es el inverso del que sucede en el absorbedor.

En este caso, la solución ha de tener una presión de vapor mayor que la del aire para que tenga lugar la transferencia de masa y calor requerida, dado que la fracción másica, X , está impuesta (es la de salida del absorbedor), se conseguirá aumentar la presión de vapor de la solución aumentando la temperatura, mediante la aportación de calor a la solución.

Respecto al aire, se utilizará el aire exterior para absorber el agua que ha de ceder la solución acuosa en el regenerador. También se aportará calor al aire exterior.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que la solución ceda el agua que ha absorbido anteriormente al aire exterior, se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al regenerador se han obtenido los valores de salida de los mismos, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones, en el regenerador se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del regenerador, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 12 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 32 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,01395 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 67,87 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 2.191 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 2,1579 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 34 \text{ °C}$$

$$X = 27,80\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 96,56 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 2.682 \text{ Pa}$$

Para el regenerador, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

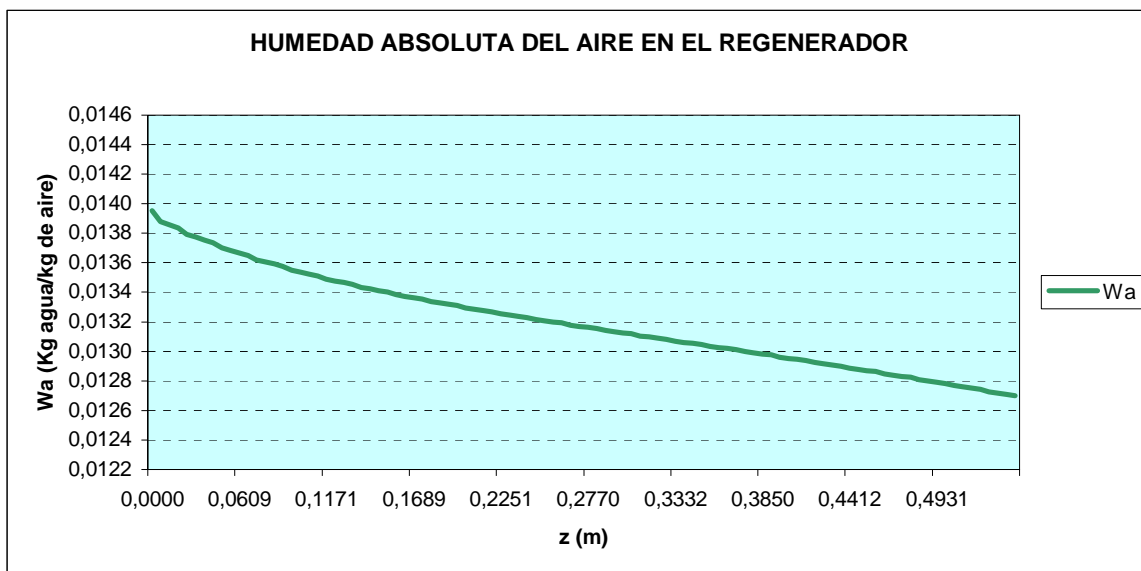
$$S = 1,75 \text{ m}^2 \text{ (0,35 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el regenerador, se muestran en el Anexo A.

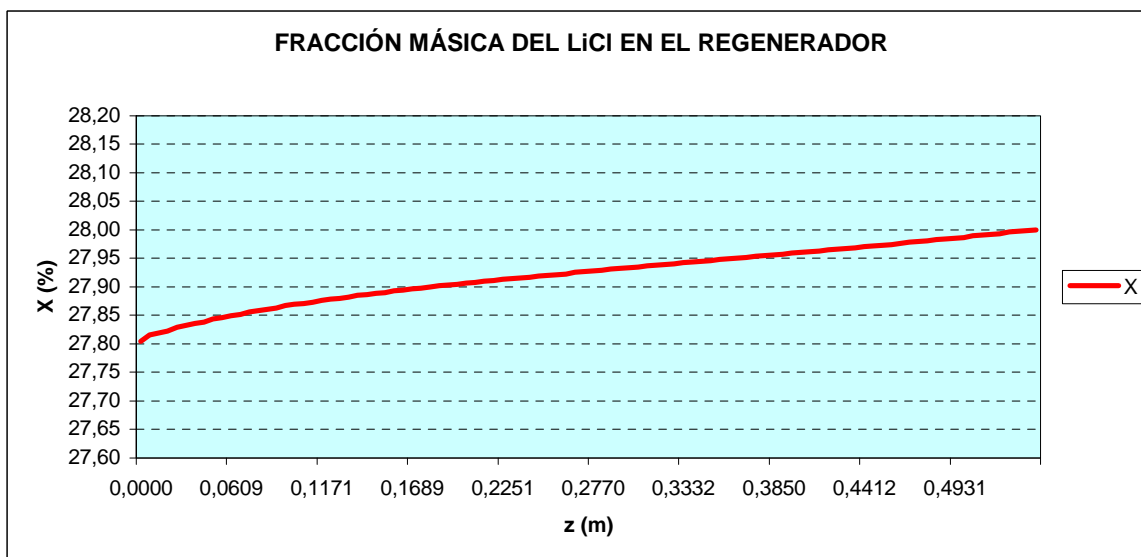
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del regenerador, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



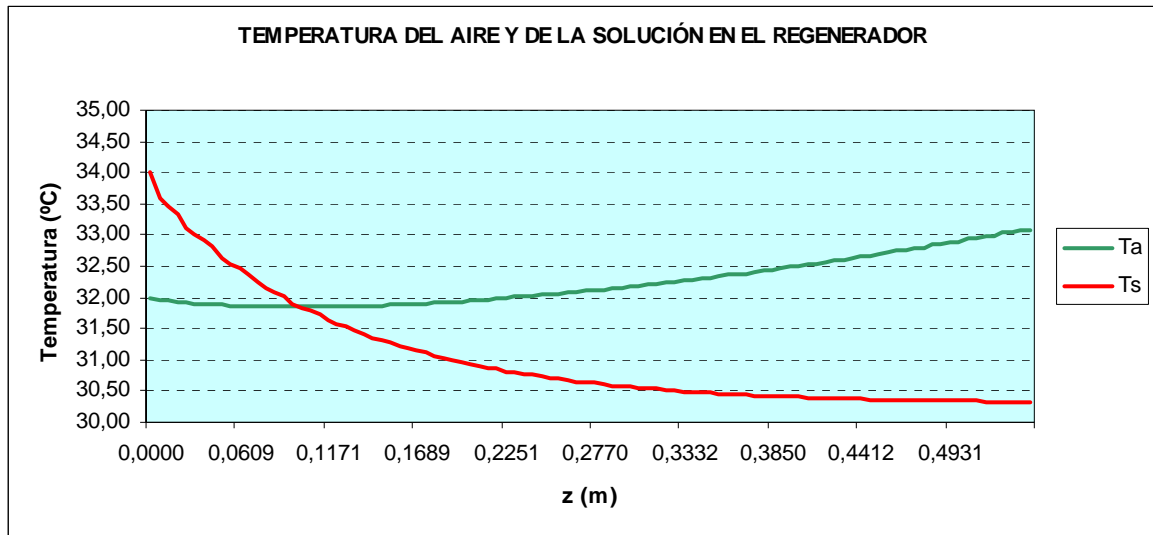
Gráfica 4.6 Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.6 como la humedad absoluta del aire va aumentando a medida que avanza el aire por el regenerador



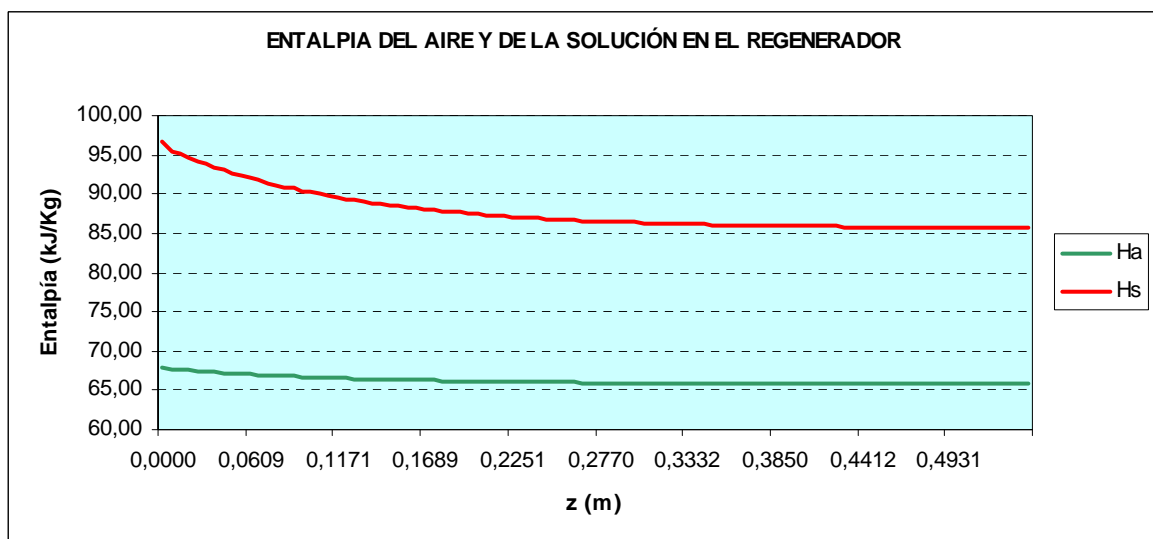
Gráfica 4.7 Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.7 como la fracción másica del cloruro de litio va aumentando a medida que avanza la solución por el regenerador, al ir cediendo el agua al aire.



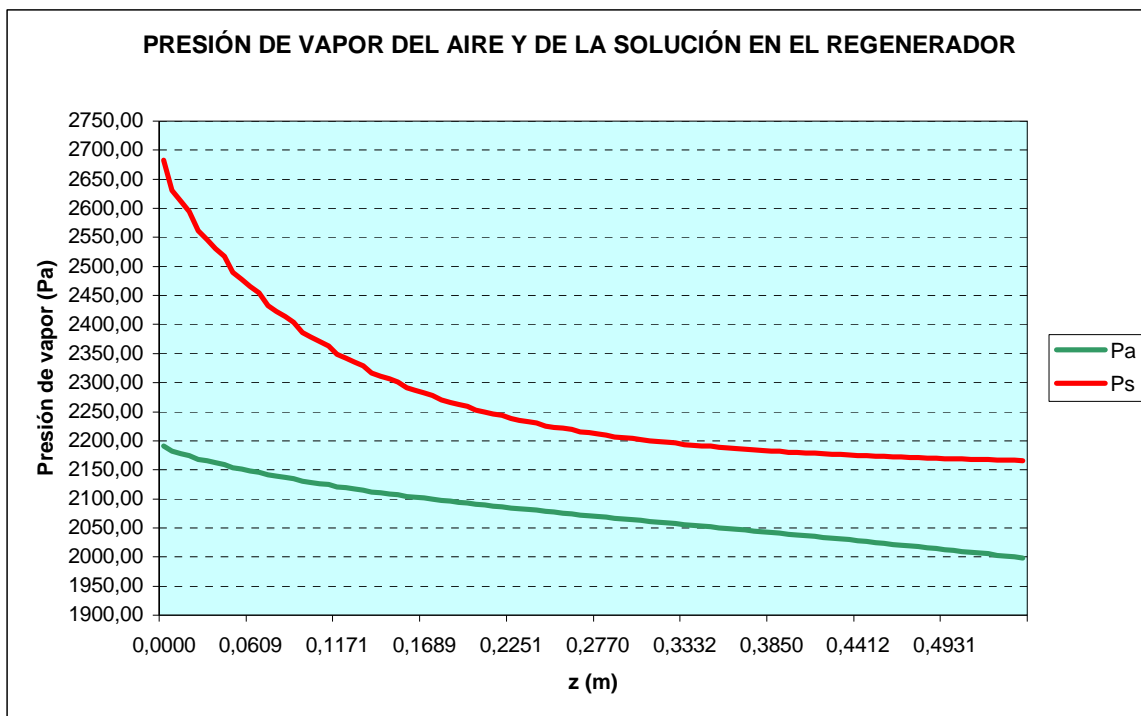
Gráfica 4.8 Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.8 como las temperaturas de la solución y del aire disminuye



Gráfica 4.9 Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.9 como la entalpía del aire aumenta ligeramente y la entalpía de la solución disminuye



Gráfica 4.10 Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 2

Se observa en la gráfica 4.10 como la presión de vapor del aire aumenta al ir absorbiendo el vapor de agua, y como la presión de vapor de la solución disminuye al ir cediendo el agua al aire.

Respecto al aire exterior utilizado en el regenerador, en la figura 4.6 se representan, el diagrama psicrométrico del ciclo que realiza.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

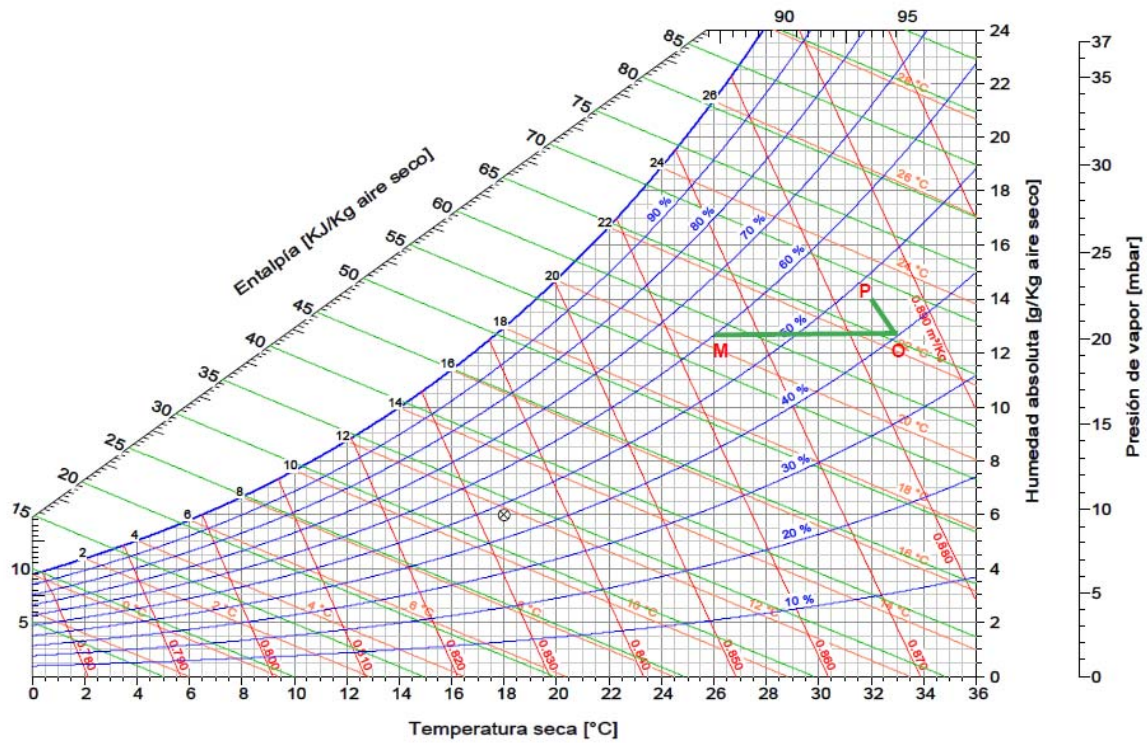


Figura 4.6. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 2

Como se observa, se ha elegido como punto inicial del aire exterior las condiciones medias de verano, 26°C y 60% de humedad relativa.

Es necesario aportar calor para que alcance la temperatura para ser capaz de conseguir la absorción del agua que ha de ceder la solución en el regenerador.

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DE LA SOLUCIÓN

La solución necesita aporte de calor a la salida del absorbedor para aumentar la presión de vapor y necesita aporte de frío a la salida del regenerador para disminuir la presión de vapor. (Ver figura 4.5)

Para mejorar el coste energético de este proceso, se utilizará un recuperador de calor de la solución para conseguir el intercambio térmico, parcial, sin coste energético adicional, los valores de las temperaturas de la solución permiten utilizar un recuperador de calor que recuperaría calor de la solución a la salida del regenerador y lo cedería a la solución a la salida del absorbedor precalentándola.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - solución procedente del regenerador: 30,33°C a 27,99°C
 - solución procedente del absorbedor: 22,99°C a 25,31°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 15,17 \text{ kW}$

La potencia calorífica restante que necesita la solución se aportará mediante un condensador frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 25,31°C a 34°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 56,99 \text{ kW}$

La potencia frigorífica restante necesaria se aportará mediante un evaporador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia frigorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 27,99°C a 12,53°C
 - $P_{\text{Frigorífica}} = 100,50 \text{ kW}$

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DEL AIRE EXTERIOR

A la salida del regenerador, el aire exterior está a una temperatura que permite mediante un recuperador de calor enfriar el aire de la salida, precalentando el aire de la entrada.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - aire procedente del regenerador: 32°C a 31°C
 - aire procedente del exterior: 26°C a 27°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 12,4 \text{ kW}$

El resto de potencia calorífica que se precisa en el aire exterior, antes de entrar al regenerador se aportará mediante un condensador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 27°C a 33,09°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 75,11 \text{ kW}$

A partir de los resultados obtenidos se concluye que las potencias totales que precisa este proceso son:

- Potencia frigorífica: 100,50 kW
- Potencia calorífica: $56,99 + 75,11 = 132,10 \text{ kW}$

CIRCUITO FRIGORÍFICO

Para el circuito frigorífico que suministrará la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesarias se ha de elegir la temperatura de evaporación mayor posible y la temperatura de condensación menor posible, para conseguir obtener tener mejor CEE.

Igual que en los casos anteriores, se ha considerado un incremento de temperatura de 5°C entre el refrigerante y el fluido externo, tanto en el condensador como en el evaporador.

La temperatura de evaporación será:

$$T^a \text{ evap} = 12,53 - 5 = 7,53^\circ\text{C}$$

La temperatura de condensación será:

$$T^a \text{ cond} = 34 + 5 = 39^\circ\text{C}$$

El CEE del compresor del circuito frigorífico que se obtiene es:

$$\text{CEE} = \frac{0,45 (273 + 7,53)}{(39 - 7,53)} = 4,011$$

Este valor es mayor que el obtenido en el proceso 1, dado que la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación son más próximas.

Como la potencia calorífica necesaria es mayor que la potencia frigorífica necesaria con la eficiencia energética obtenida, el valor más exigente para el circuito frigorífico es la potencia calorífica.

Es decir, se obtendrá la potencia frigorífica que necesita el circuito frigorífico (superior a la que necesita el proceso, en este caso la solución) para conseguir obtener la potencia calorífica total necesaria en el proceso.

Considerando que la potencia calorífica es la suma de la potencia frigorífica y la potencia absorbida por el compresor.

$$\text{Potencia calorífica} = \text{potencia frigorífica} + \text{potencia absorbida}$$

A partir de la potencia frigorífica, la potencia absorbida que se obtiene es:

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{\text{CEE}} = \frac{106}{4,011} = 26,425 \text{ kW}$$

El valor de la potencia absorbida es menor que en los dos procesos anteriores.

y la potencia calorífica que se obtiene es:

$$\text{Potencia calorífica} = 106 + 26,425 = 132,42 \text{ kW}$$

valor que iguala la potencia calorífica necesaria en el proceso.

Con ello quedaría cubierta la demanda de potencia frigorífica y potencia calorífica calculada para este proceso.

Finalmente, para este proceso, la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representa el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseado es de:

$$26,425 \text{ kW} / 15,0639 \text{ g/s} = 1,7542 \text{ kJ/g, que equivale a } 1.754 \text{ kJ/kg de agua}$$

En el apartado 4.2.4 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los tres procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que en este proceso se ha obtenido un consumo energético en el compresor del 88,75% del consumo obtenido en el proceso 1, por lo que energéticamente el proceso 2 es mejor proceso que el proceso 1.

4.2.3. PROCESO 3 MEDIANTE CIRCUITO FRIGORÍFICO QUE UTILIZA REFRIGERANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. ALTERNATIVA 2

Se trata del tercer proceso que se presenta como alternativa para la deshumidificación del aire en locales con altos aportes de humedad.

En este caso se pretende el mismo objetivo que en los procesos anteriores, conseguir las mismas condiciones finales del aire a partir de las mismas condiciones iniciales, mediante la utilización de una instalación frigorífica que combina el uso de un refrigerante primario y la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

En la alternativa 2, el proceso que se ha elegido consiste en hacer el tratamiento del aire en dos etapas:

- Etapa 1. Enfriamiento y deshumectación

Consiste en enfriar el caudal de aire, resultante de la mezcla del aire exterior exigido por la normativa y del aire procedente del local, a través del evaporador de un circuito frigorífico, para suministrarle la potencia frigorífica necesaria para reducir la temperatura y parcialmente la humedad absoluta del aire, hasta alcanzar el punto de igual entalpía que el de las condiciones de impulsión (De A a B en figuras 4.7 y 4.8).

- Etapa 2: Deshumidificación

Consiste en hacer circular el caudal de aire a tratar, procedente del evaporador frigorífico, a través del absorbedor para conseguir reducir la humedad absoluta y alcanzar las condiciones de impulsión necesarias para neutralizar la potencia frigorífica sensible interior y la potencia frigorífica latente interior del local. (De B a C en figuras 4.7 y 4.8).

El absorbedor, en flujo a contracorriente, (explicado en el apartado 2.2.2), tendrá la solución acuosa de cloruro de litio en los valores adecuados para conseguir los valores finales del aire directamente a la salida del absorbedor.

Será necesario la regeneración de la solución para ceder el agua absorbida al aire exterior.

El esquema de principio del tratamiento de aire necesario se muestra en la figura 4.7:

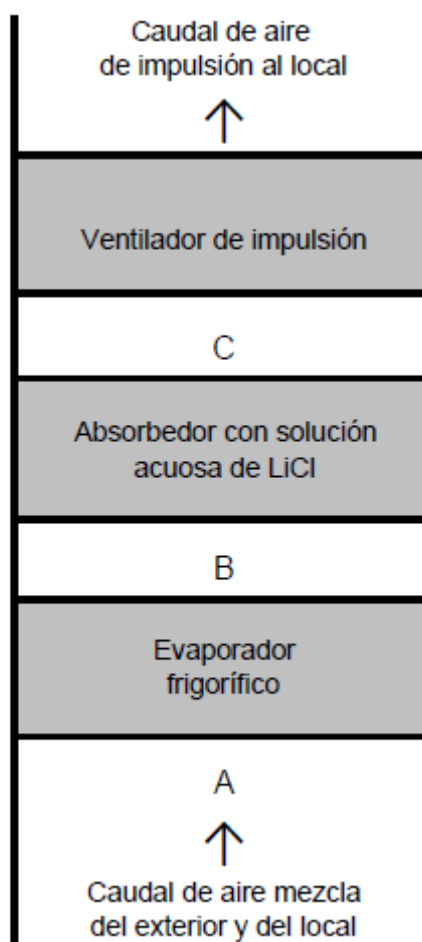


Figura 4.7. Esquema de principio de la unidad de tratamiento de aire con absorbedor de vapor mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

En la tabla 4.5 de detallan los valores de las variables de cada punto de trabajo.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES				
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C
Ta	°C	25,26	15,20	19,54
Wa x 1000	g agua/kg aire	10,680	9,600	7,850
Ha	kJ/kg	52,588	39,550	39,550
Pa	Pa	1686	1518	1245
ma	kg/s	5,3229	5,3229	5,3229

Tabla 4.5. Tabla de valores de las variables del aire a tratar. Proceso 3

En la figura 4.8 se representan, en el diagrama psicrométrico del aire húmedo, el proceso que tiene lugar en aire.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

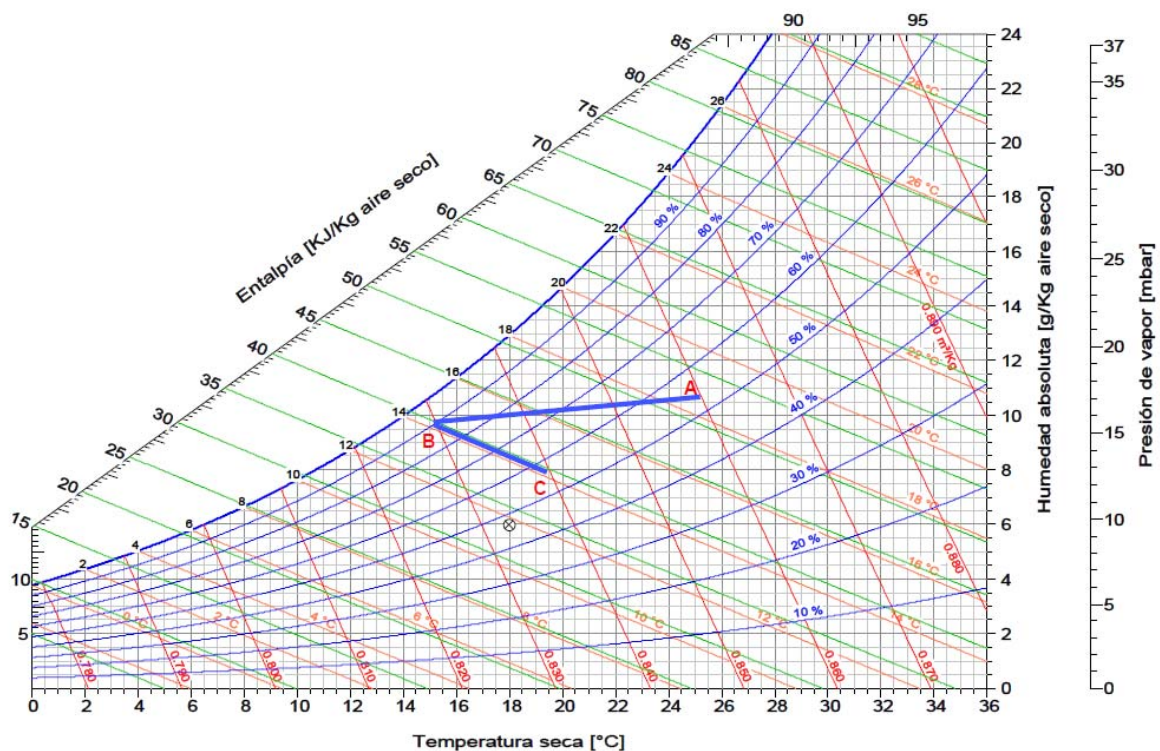





Figura 4.8. Diagrama psicrométrico del tratamiento de aire con absorbedor de vapor de agua mediante solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

Para conseguir que el aire a tratar realice este proceso se precisa que todos los valores de las variables de los flujos que intervienen tenga los valores adecuados que lo permitan. Por lo que se hace necesario la definición de todos los flujos y valores de las variables del ciclo completo explicado en el capítulo 2, apartado 2.3.

La figura 4.9 muestra el esquema de principio global del proceso.

El código de colores utilizado en la figura 4.9 es:

-  Solución acuosa de cloruro de litio
-  Aire a tratar (absorbedor)
-  Aire exterior (regenerador)

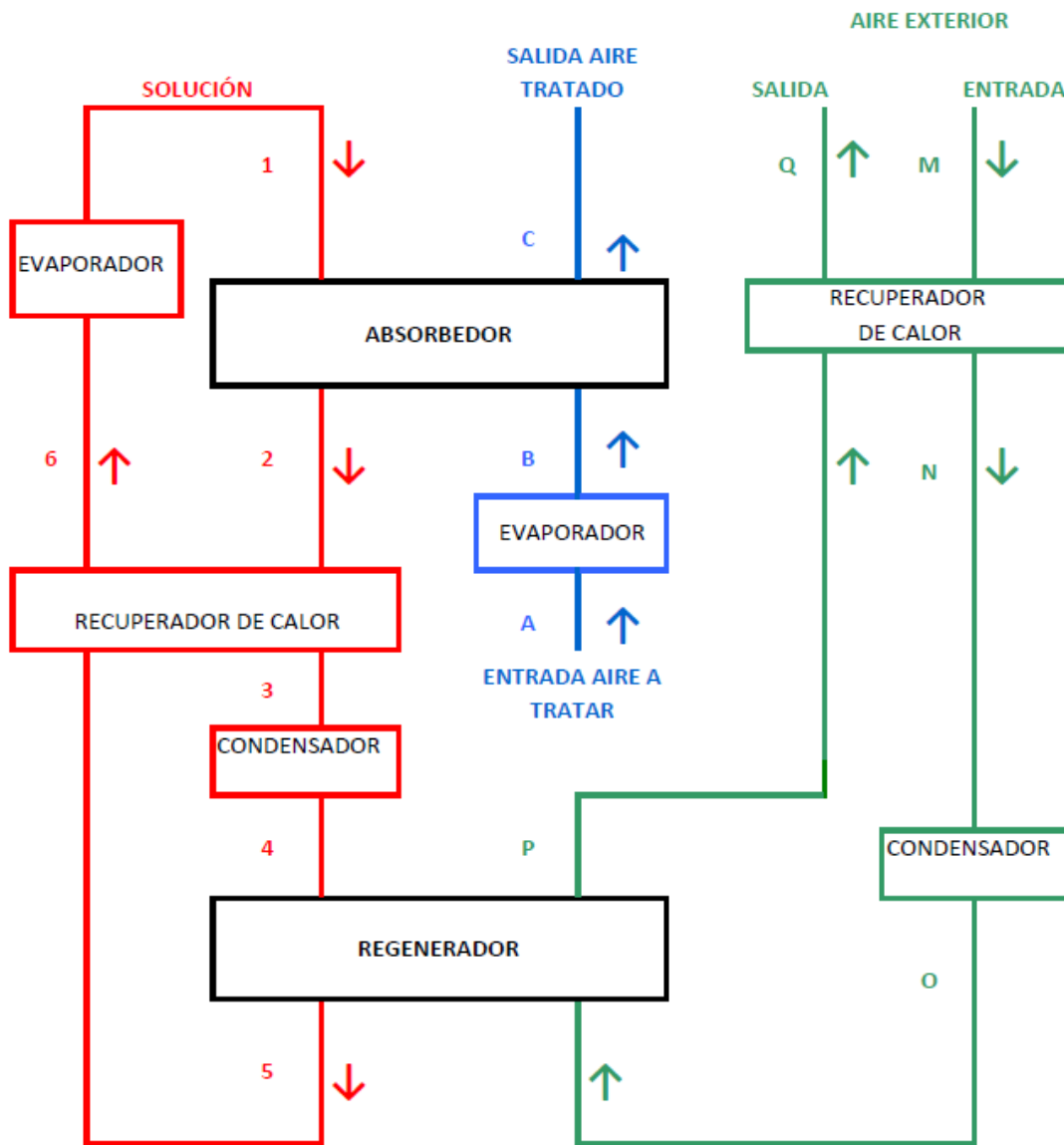


Figura 4.9. Esquema de principio general del proceso 3

Las tablas 4.6 y 4.7 recopilan los valores de las variables del aire y de la solución que intervienen en el proceso.

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA EL AIRE									
VARIABLE	UNIDADES	A	B	C	M	N	O	P	Q
Ta	°C	25,26	15,2	19,54	26	28	33,83	33	31
Wa x 1000	g agua/kg aire	10,680	9,600	7,850	12,700	12,700	12,700	13,477	13,477
Ha	kJ/kg	52,588	39,550	39,550	58,490	60,549	66,546	67,677	65,619
Pa	Pa	1686	1518	1245	1998	1998	1998	2118	2118
ma	kg/s	5,3229	5,3229	5,3229	12	12	12	12	12

Tabla 4.6. Tabla de valores de las variables del aire a. Proceso 3

TABLA DE VALORES DE LAS VARIABLES PARA SOLUCIÓN ACUOSA DE CLORURO DE LITIO							
VARIABLE	UNIDADES	1	2	3	4	5	6
X	% kgLiCl/Kgsolución	30,00	29,86	29,86	29,86	30,00	30,00
Ts (°C)	g agua/kg aire	21,30	21,26	26,81	34,00	31,85	26,26
Hs	kJ/kg	63,400	62,860	79,427	100,880	94,820	78,169
Ps	Pa	1145	1152		2408	2118	
ms	kg/s	2,0000	2,0093	2,0093	2,0093	2,0000	2,0000

Tabla 4.7. Tabla de valores de las variables de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

A continuación se explica el desarrollo de este proceso.

ABSORBEDOR

Es el equipo en el que la mezcla acuosa de cloruro de litio hace la segunda etapa de deshumidificación del caudal de aire que procede del evaporador, donde ya ha eliminado una parte del vapor de agua presente en el aire.

En el absorbedor se ha elegido el caudal de aire vertical, ascendente y la solución vertical descendente.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que el aire realice el proceso descrito (de B a C), se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al absorbedor de la solución acuosa de cloruro de litio, se han obtenido los valores de la solución acuosa de cloruro de litio a la salida del mismo, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del absorbedor, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 5,3229 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 19,54 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,00785 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 39,550 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 1.245 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 2 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 21,30\text{°C}$$

$$X = 30\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 63,400 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 1145 \text{ Pa}$$

Para el calor específico de la solución, a partir de las ecuaciones 2.43, y 2.46 se ha utilizado la expresión:

$$C_{ps} = \frac{dH_s}{dT_s} = B + (2CT_s)$$

Para el absorbedor, los parámetros considerados son:

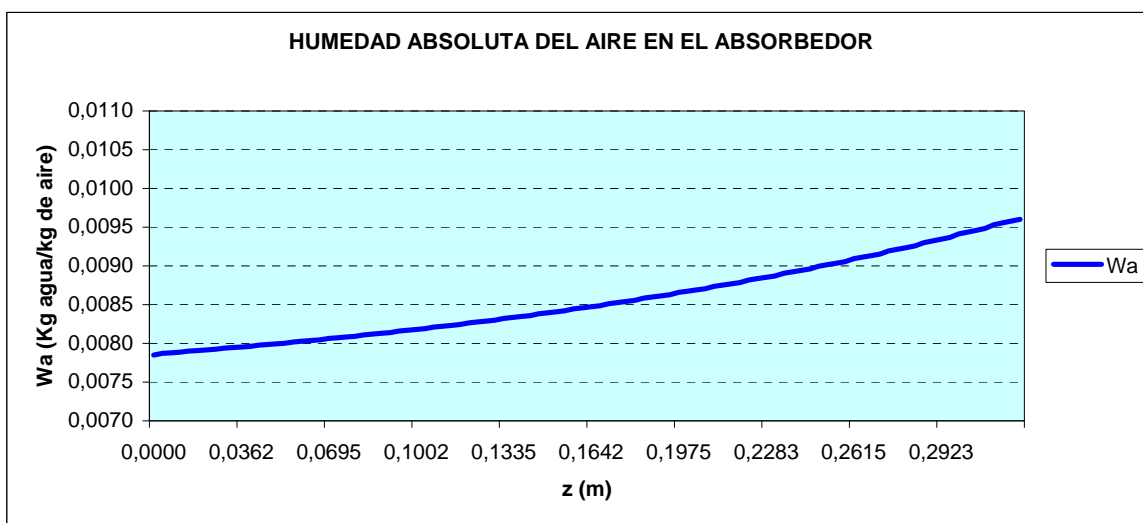
$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

$$S = 1,75 \text{ m}^2 \text{ (1,75 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

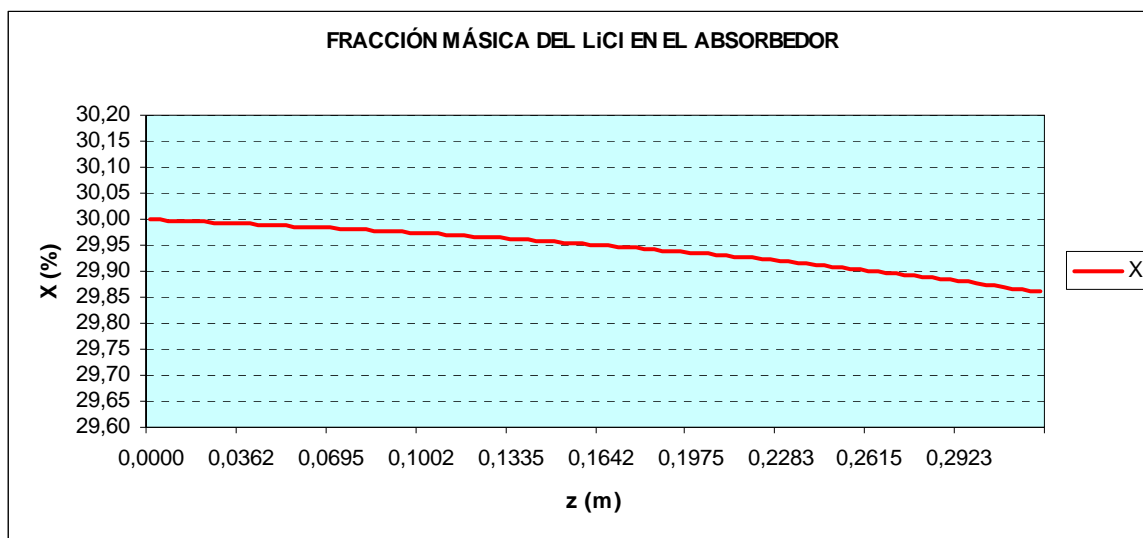
Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z, para el absorbedor, se muestran en al Anexo A.

Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del absorbedor, se ha realizado la representación gráfica. Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



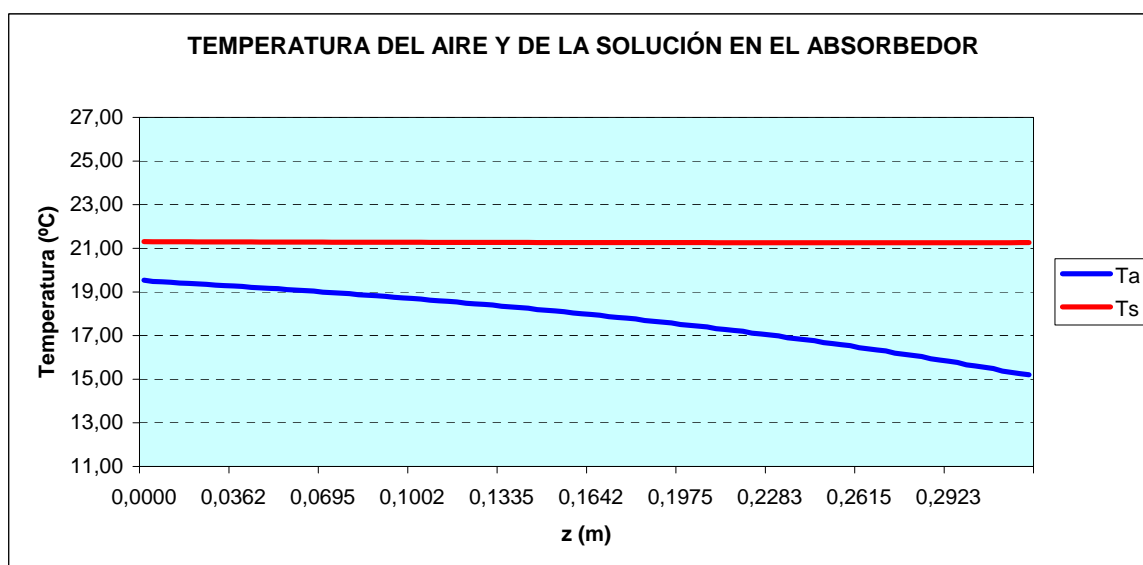
Gráfica 4.11 Evolución de la humedad absoluta del aire en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.11 como la humedad absoluta del aire va disminuyendo a medida que avanza el aire por el absorbedor



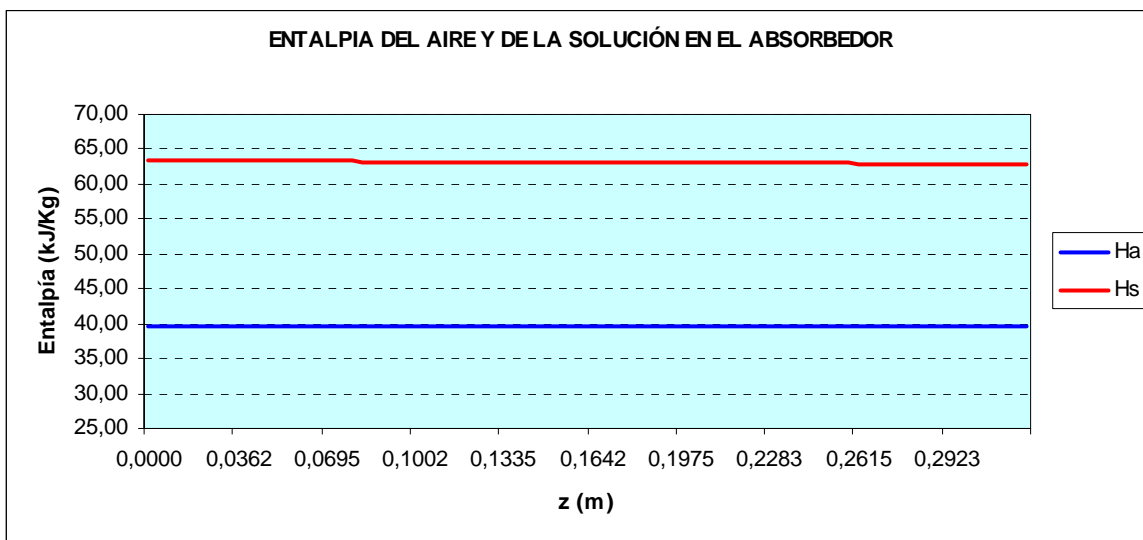
Gráfica 4.12 Evolución de la fracción másica de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.12 como la fracción másica del cloruro de litio va disminuyendo a medida que avanza la solución por el absorbedor, al ir absorbiendo el vapor de agua del aire.



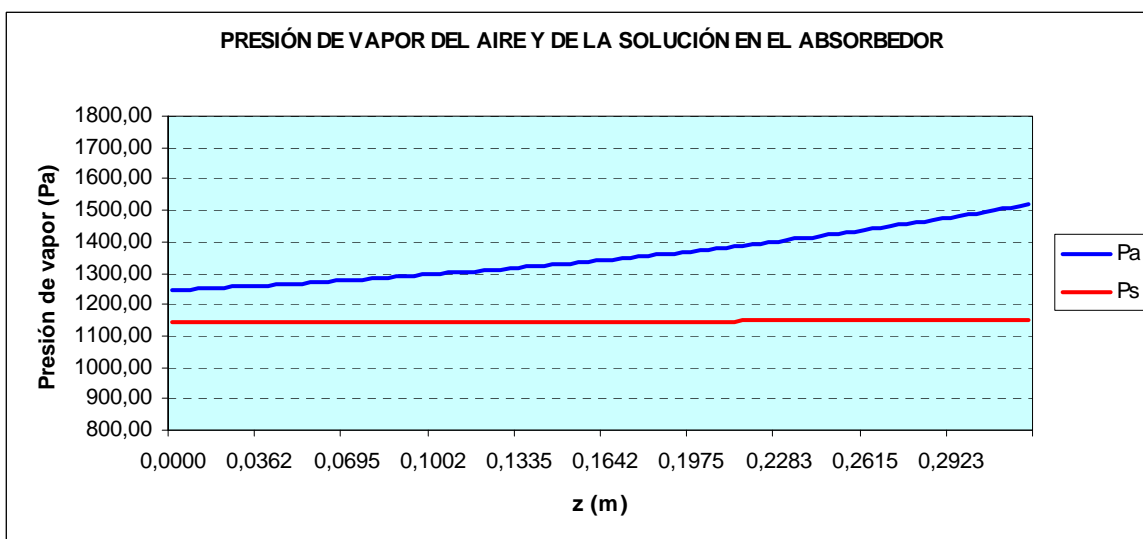
Gráfica 4.13 Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.13 como la temperatura de la solución prácticamente es constante mientras el aire aumenta su temperatura absorbiendo la energía cedida en el proceso de deshumectación.



Gráfica 4.14 Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.14 como la entalpía del aire permanece constante y la entalpía de la solución prácticamente es constante.



Gráfica 4.15 Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el absorbedor. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.15 como la presión de vapor del aire disminuye al ir cediendo vapor de agua, mientras que aumenta ligeramente la presión de vapor de la solución.

REGENERADOR

Una vez que la solución acuosa de cloruro de litio ha absorbido el vapor de agua que estaba en el caudal de aire, es necesario hacerla pasar por el regenerador para que elimine el agua que ha absorbido y recupere sus condiciones iniciales para iniciar un nuevo ciclo. El proceso que tiene lugar en el regenerador es el inverso del que sucede en el absorbedor.

En este caso, la solución ha de tener una presión de vapor mayor que la del aire para que tenga lugar la transferencia de masa y calor requerida, dado que la fracción másica, X , está impuesta (es la de salida del absorbedor), se conseguirá aumentar la presión de vapor de la solución aumentando la temperatura, mediante la aportación de calor a la solución.

Respecto al aire, se utilizará el aire exterior para absorber el agua que ha de ceder la solución acuosa en el regenerador. También se aportará calor al aire exterior.

Para conocer los valores necesarios de las variables que intervienen para conseguir que la solución ceda el agua que ha absorbido anteriormente al aire exterior, se ha aplicado el sistema de ecuaciones descrito en el apartado 2.2.2, (flujo a contracorriente) y a partir de los valores de entrada al regenerador se han obteniendo los valores de salida de los mismos, así como la altura, z , necesaria para conseguir la transferencia de masa y calor deseada.

Para la resolución del sistema de ecuaciones, en el regenerador se han utilizado los siguientes datos:

Para el aire, en $z=0$, (parte superior del regenerador, ver figura 2.5):

$$\dot{m}_a = 12 \text{ kg/s}$$

$$T_a = 33 \text{ °C}$$

$$W_a = 0,01348 \text{ kg vapor agua / kg aire seco}$$

$$H_a = 67,68 \text{ kJ/kg}$$

$$P_a = 2.118 \text{ Pa}$$

$$P = 1 \text{ E5 Pa}$$

Para la solución acuosa de cloruro de litio, en $z=0$:

$$\dot{m}_s = 2,0093 \text{ kg solución /s}$$

$$T_s = 34 \text{ °C}$$

$$X = 29,86\% \text{ kg LiCl / kg solución}$$

$$H_s = 100,88 \text{ kJ/kg}$$

$$P_s = 2.408 \text{ Pa}$$

Para el regenerador, los parámetros considerados son:

$$a = 400 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ (1 placa cada 10 mm)}$$

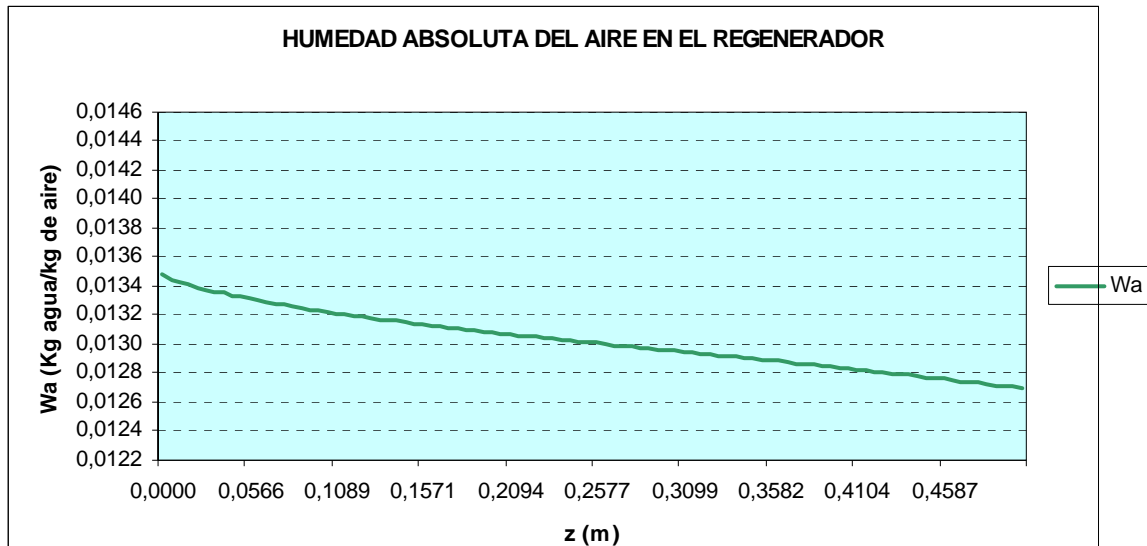
$$S = 1,75 \text{ m}^2 \text{ (0,35 m x 1 m)}$$

$$U = 0,030 \text{ kW/m}^2\text{°C}$$

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el regenerador, se muestran en el Anexo A.

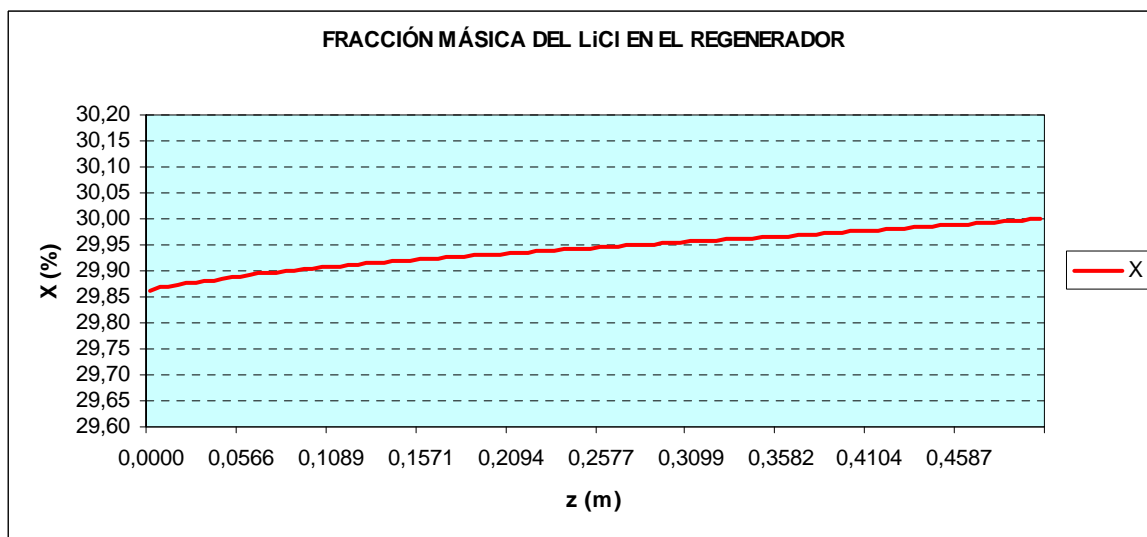
Para visualizar la evolución de las variables, en función de la z del regenerador, se ha realizado la representación gráfica.

Se recuerda que el aire tiene la entrada por la parte derecha de las gráficas y la solución entra por la parte izquierda de las graficas (origen de la z).



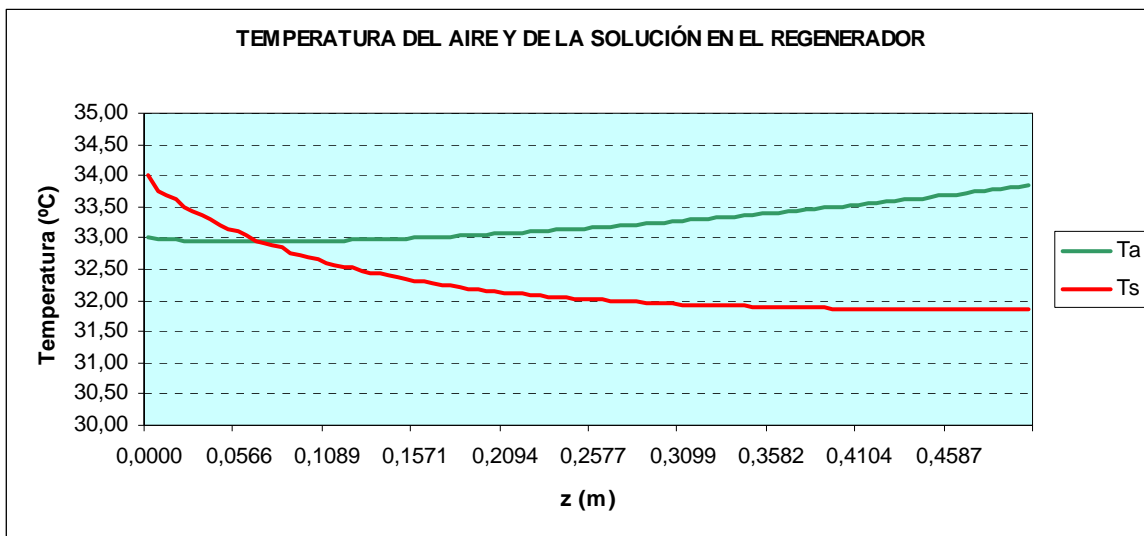
Gráfica 4.16 Evolución de la humedad absoluta del aire en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.16 como la humedad absoluta del aire va aumentando a medida que avanza el aire por el regenerador



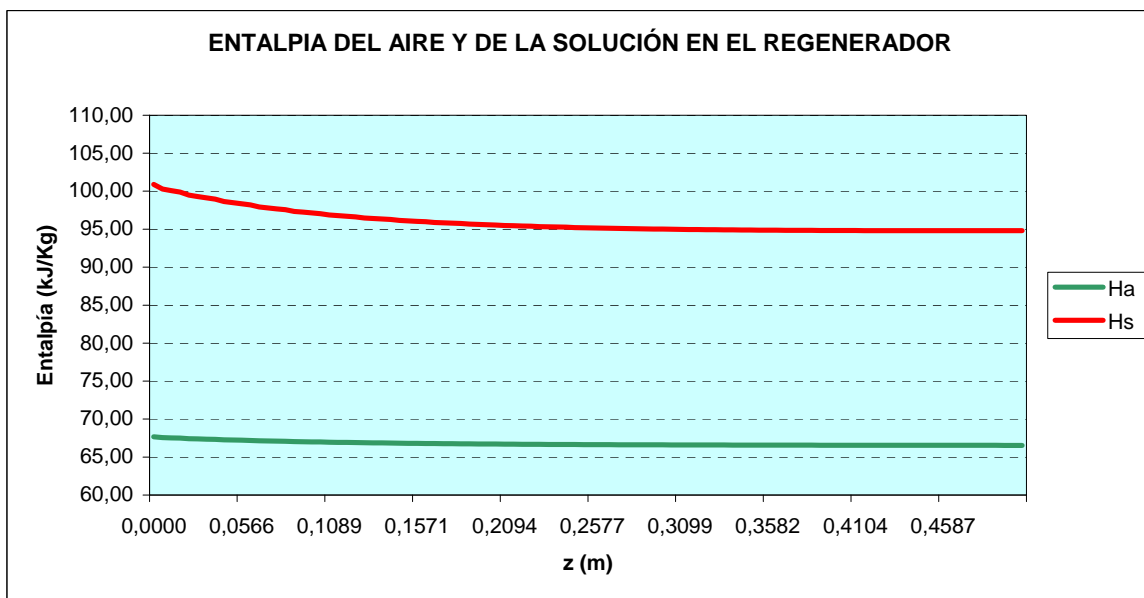
Gráfica 4.17 Evolución de la fracción másica de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.17 como la fracción másica del cloruro de litio va aumentando a medida que avanza la solución por el regenerador, al ir cediendo el agua al aire.



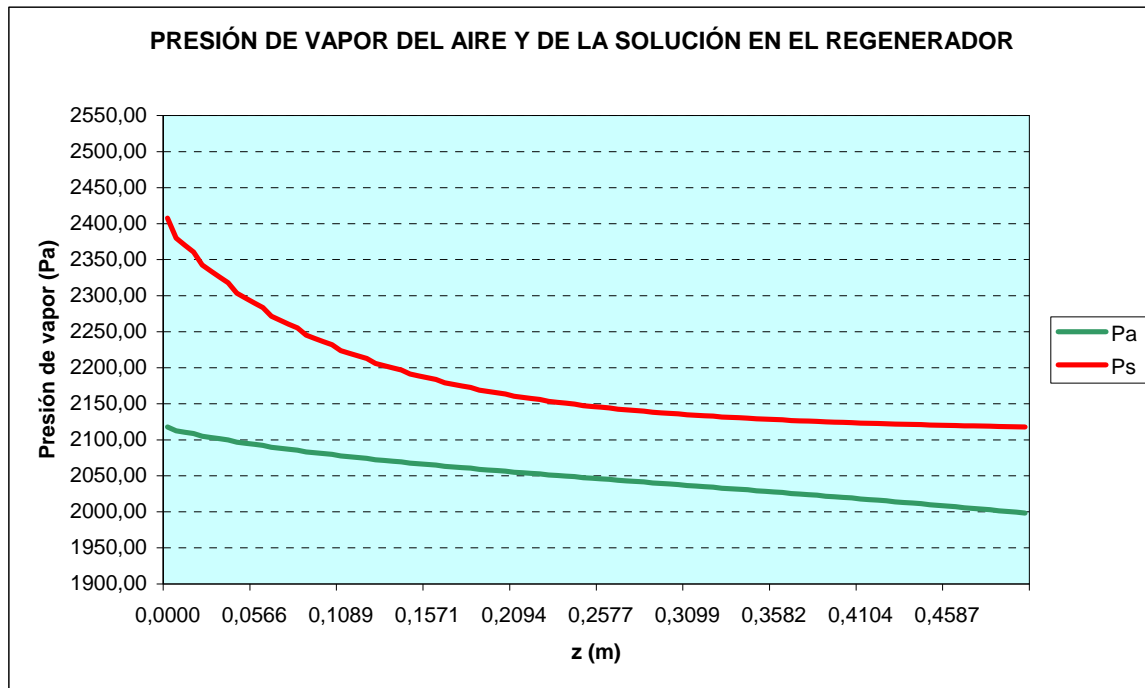
Gráfica 4.18 Evolución de la temperatura del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.18 como la temperatura de la solución y del aire disminuye.



Gráfica 4.19 Evolución de la entalpía del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.19 como la entalpía del aire permanece prácticamente constante y la entalpía de la solución disminuye.



Gráfica 4.20 Evolución de la presión de vapor del aire y de la solución en el regenerador. Proceso 3

Se observa en la gráfica 4.20 como la presión de vapor del aire aumenta al ir absorbiendo el vapor de agua, y como la presión de vapor de la solución disminuye al ir cediendo el agua al aire.

Respecto al aire exterior utilizado en el regenerador, en la figura 4.10 se representan, el diagrama psicrométrico del ciclo que realiza.



DIAGRAMA PSICROMÉTRICO:

Presión: 1.01325 bar Altura: 0 m

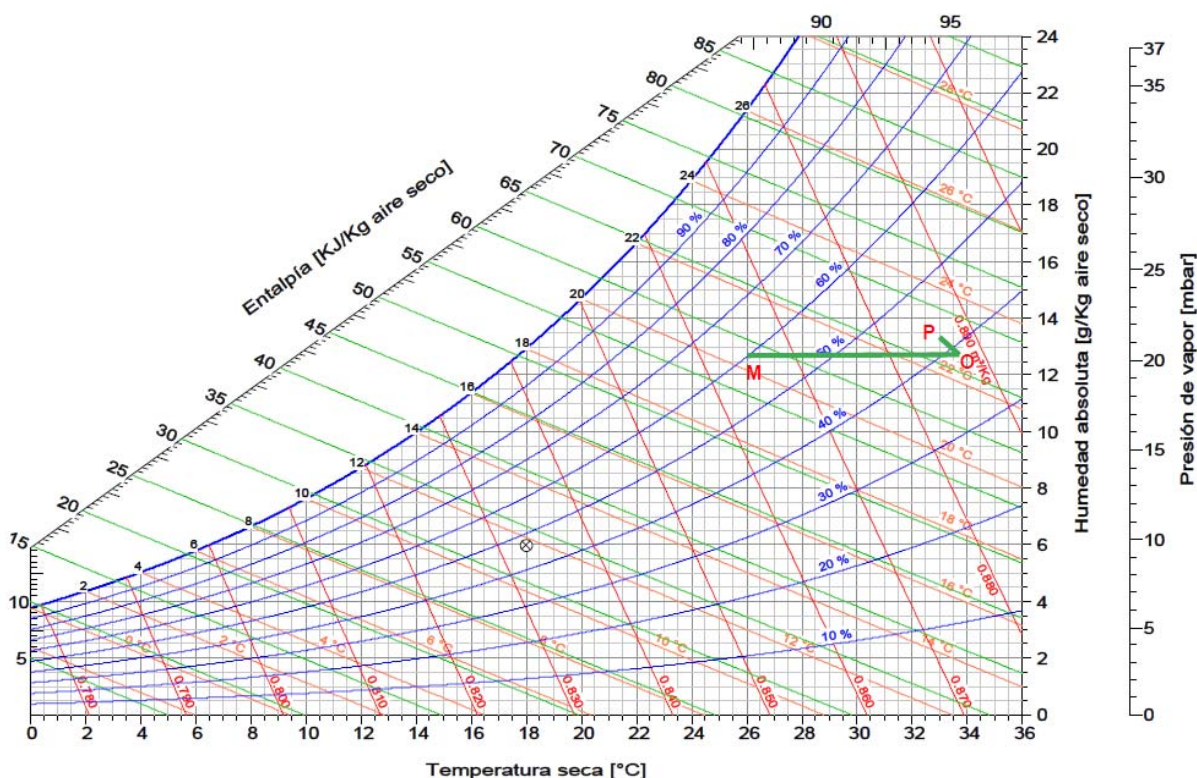


Figura 4.10. Diagrama psicrométrico del aire exterior de un regenerador de la solución acuosa de cloruro de litio. Proceso 3

Como se observa, se ha elegido como punto inicial del aire exterior las condiciones medias de verano, 26°C y 60% de humedad relativa.

Es necesario aportar calor para que alcance la temperatura para ser capaz de conseguir la absorción del agua que ha de ceder la solución en el regenerador.

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DEL AIRE A TRATAR

En la primera etapa de este proceso el caudal de aire circula a través de un evaporador frigorífico (Ver figura 4.9).

La potencia frigorífica necesaria es:

$$P_F = \dot{m}_a (h_A - h_B) = 5,3229 \text{ kg/s} (52,588 - 39,550) \text{ kJ/kg} = 69,41 \text{ kW}$$

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DE LA SOLUCIÓN

La solución necesita aporte de calor a la salida del absorbedor para aumentar la presión de vapor y necesita aporte de frío a la salida del regenerador para disminuir la presión de vapor. (Ver figura 4.9)

Para mejorar el coste energético de este proceso, se utilizará un recuperador de calor de la solución para conseguir el intercambio térmico, parcial, sin coste energético adicional, los valores de las temperaturas de la solución permiten utilizar un recuperador de calor que recuperaría calor de la solución a la salida del regenerador y lo cedería a la solución a la salida del absorbedor precalentándola.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - solución procedente del regenerador: 31,85°C a 26,26°C
 - solución procedente del absorbedor: 21,26°C a 26,81°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 33,30 \text{ kW}$

La potencia calorífica restante que necesita la solución se aportará mediante un condensador frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 26,81°C a 34°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 43,11 \text{ kW}$

La potencia frigorífica restante necesaria se aportará mediante un evaporador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia frigorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 26,26°C a 21,30°C
 - $P_{\text{Frigorífica}} = 29,54 \text{ kW}$

INTERCAMBIADORES DE CALOR EN EL CIRCUITO DEL AIRE EXTERIOR

A la salida del regenerador, el aire exterior está a una temperatura que permite mediante un recuperador de calor enfriar el aire de la salida, precalentando el aire de la entrada.

- La potencia recuperada, en este caso es:
 - Salto térmico
 - aire procedente del regenerador: 33°C a 31°C
 - aire procedente del exterior: 26°C a 28°C
 - $P_{\text{Recuperada}} = 24,7 \text{ kW}$

El resto de potencia calorífica que se precisa en el aire exterior, antes de entrar al regenerador se aportará mediante un condensador del mismo circuito frigorífico.

- La potencia calorífica necesaria, en este caso es:
 - Salto térmico: 28°C a 33,83°C
 - $P_{\text{Calorífica}} = 71,97 \text{ kW}$

A partir de los resultados obtenidos se concluye que las potencias totales que precisa este proceso son:

- Potencia frigorífica: $69,41 + 29,54 = 98,95 \text{ kW}$
- Potencia calorífica: $43,11 + 71,97 = 115,08 \text{ kW}$

CIRCUITO FRIGORÍFICO

Para el circuito frigorífico que suministrará la potencia frigorífica y la potencia calorífica necesarias se ha de elegir la temperatura de evaporación mayor posible y la temperatura de condensación menor posible, para conseguir obtener tener mejor CEE.

Igual que en los casos anteriores, se ha considerado un incremento de temperatura de 5°C entre el refrigerante y el fluido externo, tanto en el condensador como en el evaporador.

La temperatura de evaporación será:

$$T^{\text{a}} \text{ evap} = 15,20 - 5 = 10,2^{\circ}\text{C}$$

La temperatura de condensación será:

$$T^{\text{a}} \text{ cond} = 34 + 5 = 39^{\circ}\text{C}$$

El CEE del compresor del circuito frigorífico que se obtiene es:

$$CEE = \frac{0,45 (273 + 10,2)}{(39 - 10,2)} = 4,425$$

Este valor es mayor que el obtenido en los procesos anteriores, dado que la temperatura de evaporación y la temperatura de condensación son más próximas, y la temperatura de evaporación es la más alta.

A partir de la potencia frigorífica, la potencia absorbida que se obtiene es:

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{\text{Potencia frigorífica}}{CEE} = \frac{98,95}{4,425} = 22,362 \text{ kW}$$

El valor de la potencia absorbida es menor que en los dos procesos anteriores.

y la potencia calorífica que se obtiene es:

$$\text{Potencia calorífica} = 98,95 + 22,36 = 121,31 \text{ kW}$$

valor que supera la potencia calorífica necesaria en el proceso.

Con ello quedaría cubierta la demanda de potencia frigorífica y potencia calorífica calculada para este proceso.

Finalmente, para este proceso, la relación entre la potencia absorbida y la cantidad de agua eliminada, que representa el consumo de energía necesario en el compresor para eliminar el caudal de agua deseado es de:

$$22,362 \text{ kW} / 15,0639 \text{ g/s} = 1,4845 \text{ kJ/g, que equivale a } 1.485 \text{ kJ/kg de agua}$$

En el apartado 4.2.4 de este capítulo se realiza la comparativa de los resultados obtenidos para los tres procesos presentados en esta aplicación, pero se avanza que en este proceso se ha obtenido un consumo energético en el compresor del 75,11% del consumo obtenido en el proceso 1 y 84,66% del consumo del proceso 2, por lo que ha resultado ser el proceso con menor consumo energético.

4.2.4. RESULTADOS. COMPARATIVA

Se han presentado tres procesos diferentes para el tratamiento del aire en locales con altos aportes de humedad.

Se han aplicado los tres procesos para atender las mismas necesidades de temperatura y humedad del aire interior, a partir de unas condiciones iniciales que corresponde a un caso real, así, de esta manera poder comparar los resultados obtenidos.

El primer proceso utilizan un circuito frigorífico con un refrigerante primario y sería el proceso tradicionalmente utilizado.

El segundo y el tercer proceso utilizan una instalación frigorífica que mezcla el uso de un refrigerante primario y un refrigerante secundario, con propiedades deshidratantes, en concreto la solución acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario.

Se ha realizado la comparativa de los tres procesos según detalle:

- A) Según las temperaturas de evaporación y de condensación del refrigerante primario
- B) Según el CEE del compresor del circuito frigorífico
- C) Según la potencia frigorífica total necesaria en el proceso
- D) Según el ratio del consumo energético respecto al agua eliminada

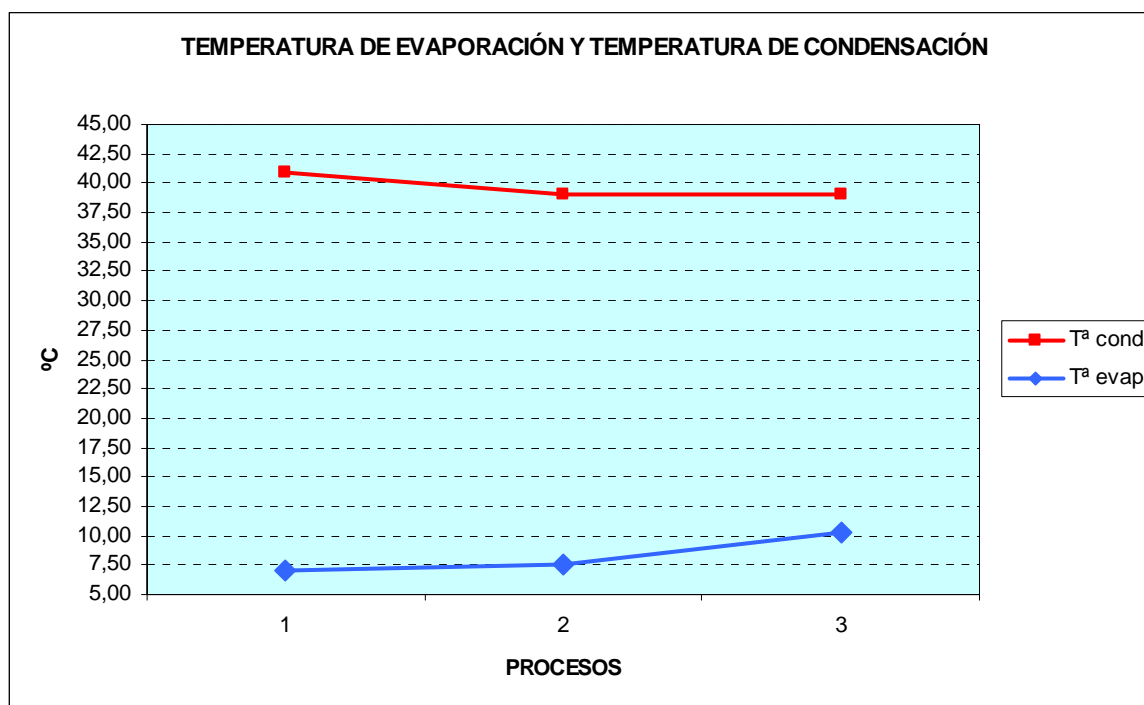
A continuación se presentan la recopilación de los resultados obtenidos

A) Comparativa de los tres procesos según las temperaturas de evaporación y de condensación del refrigerante primario

La tabla 4.8 y la gráfica 4.21 muestran la comparativa de la temperatura de condensación y la temperatura de evaporación de los tres procesos estudiados.

Proceso	T ^a evap (°C)	T ^a cond (°C)
1	7	41
2	7,53	39
3	10,20	39

Tabla 4.8. Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los tres procesos presentados



Gráfica 4.21 Comparativa de la temperatura de evaporación y de condensación del circuito frigorífico de los tres procesos presentados

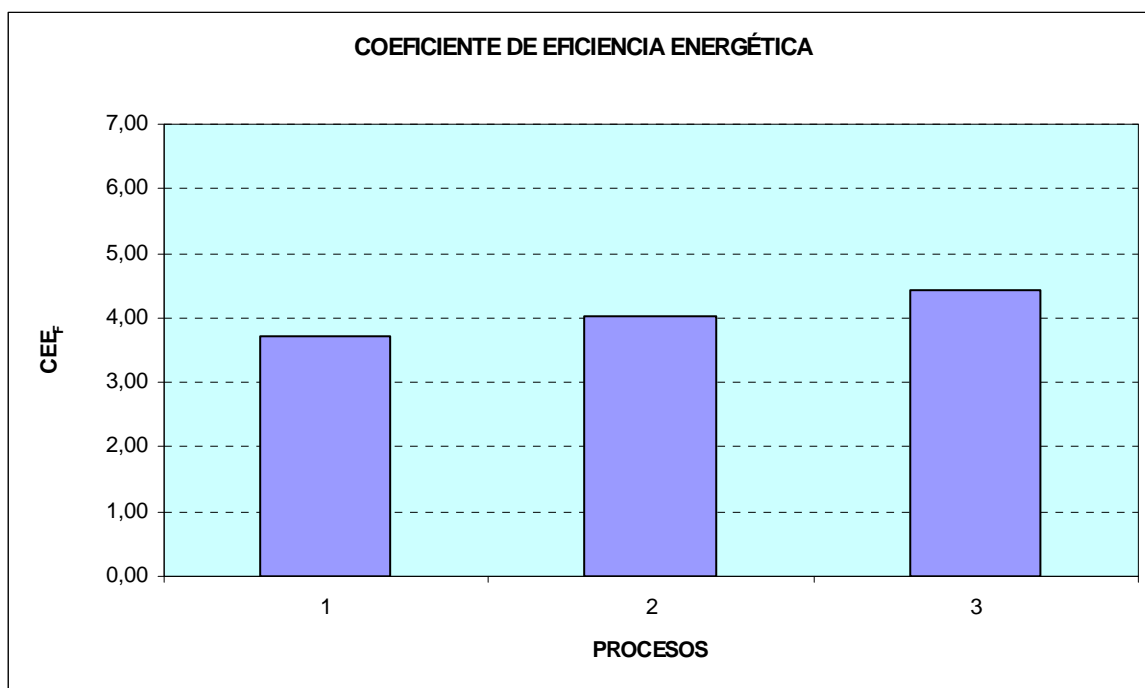
Se observa como la temperatura de condensación más alta y la temperatura de evaporación menor se da en el proceso 1, y es el en proceso 3 en el que se encuentran más próximas.

B) Comparativa de los tres procesos según el CEE del compresor del circuito frigorífico

La tabla 4.9 y la gráfica 4.22 muestran la comparativa de los Coeficientes de Eficiencia Energética de los tres procesos estudiados.

Proceso	CEE _F
1	3,706
2	4,011
3	4,425

Tabla 4.9. Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los tres procesos presentados



Gráfica 4.22 Comparativa de la eficiencia energética del circuito frigorífico de los tres procesos presentados

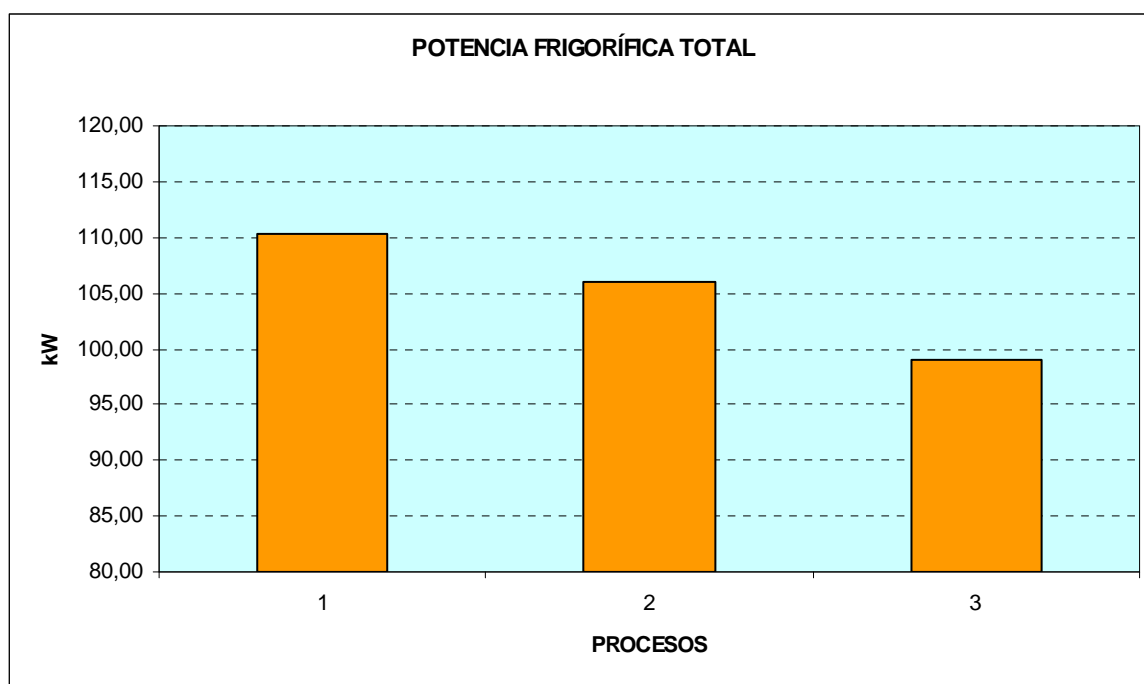
Se observa como la eficiencia energética aumenta a medida que aumenta la temperatura de evaporación y disminuye la temperatura de condensación, según la comparativa anterior. Los dos procesos presentados que mezclan el uso de refrigerantes primarios y refrigerantes secundarios, proceso 2 y proceso 3 resulta con mayor eficiencia energética.

C) Comparativa de los tres procesos según la potencia frigorífica total necesaria en el proceso

La tabla 4.10 y la gráfica 4.22 muestran la comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en los tres procesos estudiados.

Proceso	P _F (kW)
1	110,34
2	106,00
3	98,95

Tabla 4.10. Comparativa de la potencia frigorífica necesaria en el circuito frigorífico de los tres procesos presentados



Gráfica 4.23 Comparativa de la potencia frigorífica total necesaria en el circuito frigorífico de los tres procesos presentados

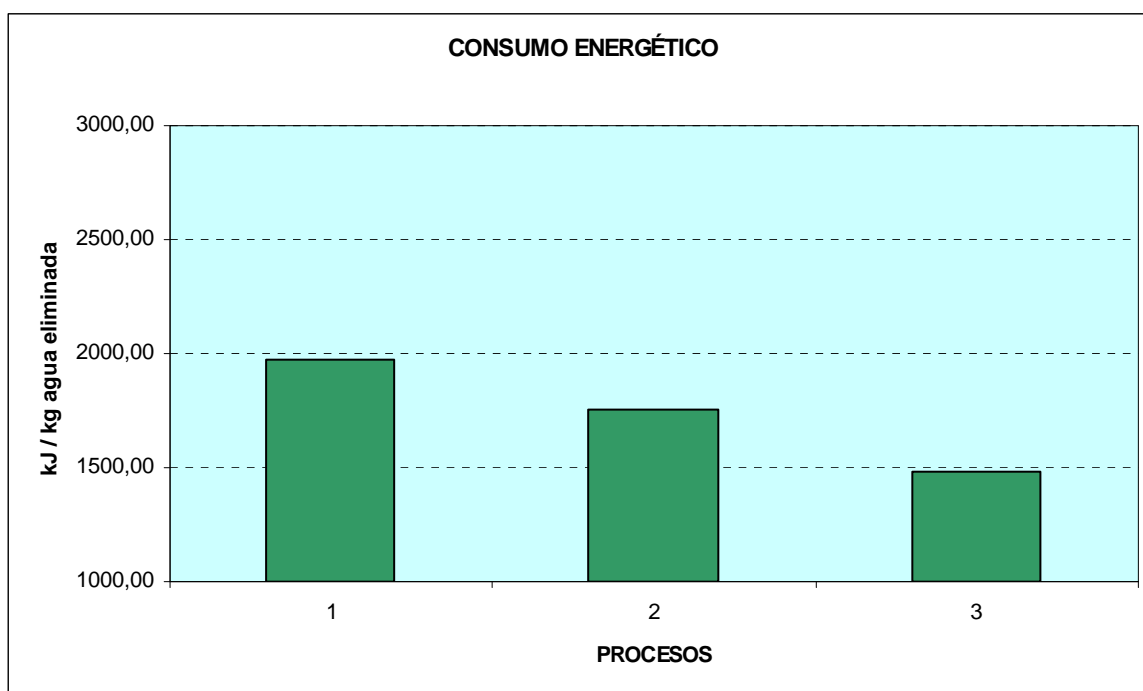
Se observa como la mayor potencia frigorífica necesaria es la del proceso 1, siendo menor en los procesos 2 y 3 que mezclan el uso de refrigerantes primarios y refrigerantes secundarios. El proceso que precisa menor potencia frigorífica es el proceso 3.

D) Comparativa de los tres procesos según el ratio del consumo energético respecto al agua eliminada

La tabla 4.11 y la gráfica 4.24 muestran la comparativa que se obtiene en los tres procesos estudiados

Proceso	Consumo kJ/kg agua
1	1.977
2	1.754
3	1.484

Tabla 4.11. Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los tres procesos presentados



Gráfica 4.24 Comparativa del consumo del circuito frigorífico por kg de agua eliminada, en los tres procesos presentados

Se observa como el mayor consumo energético por kg de agua eliminada se obtiene en el proceso 1, circuito frigorífico habitualmente utilizado y que es menor en los otros dos procesos presentados que mezclan refrigerantes primarios y secundarios, resultando de menor consumo energético el proceso 3.

De todo lo anterior se desprende que el proceso 1, que representa el proceso más utilizado habitualmente en los secaderos, ha sido superado por otros procesos energéticamente más eficaces.

En la comparativa realizada se observa que el proceso 1 es el que ha resultado con mayor potencia frigorífica necesaria y con menor eficiencia energética, por lo que es el proceso con más alto consumo energético en el compresor frigorífico por kg de agua eliminada.

El proceso 2 y proceso 3 que utilizan un circuito frigorífico que combina el uso de refrigerantes primarios y refrigerantes secundarios superan energéticamente el proceso 1, siendo el proceso 3 el que ha resultado con menor potencia frigorífica requerida, con mayor eficiencia energética y consecuentemente con menor consumo energético en el compresor frigorífico.

El mezclar en una instalación frigorífica un refrigerante primario y como refrigerante secundario una solución acuosa de cloruro de litio, dependiendo del proceso que se siga y de las condiciones de trabajo del refrigerante primario, permite que el circuito frigorífico pueda demandar menor potencia frigorífica y pueda aumentar la eficiencia energética del ciclo frigorífico, reduciendo el consumo energético de la instalación.

En resumen, el consumo energético depende de la potencia frigorífica total o de la potencia calorífica total necesaria en el proceso y de la eficiencia del circuito frigorífico, que a la vez depende de la temperatura de evaporación y de la temperatura de condensación del refrigerante primario del circuito frigorífico.

Para la aplicación en locales con altos aportes de humedad, se ha encontrado dos alternativas más eficaz energéticamente para la deshumidificación con un circuito frigorífico que combina el uso de un refrigerante primario y una mezcla acuosa de cloruro de litio como refrigerante secundario, actuando como deshidratante y realizando la regeneración de la solución mediante el mismo circuito frigorífico e incorporando recuperadores de calor donde los parámetros lo permiten para mejora la eficiencia del proceso.

5 CONCLUSIONES GENERALES

5 CONCLUSIONES GENERALES

Con el trabajo presentado en esta tesis doctoral, se concluyen los siguientes puntos:

- Se demuestra que la deshumidificación el aire a baja temperatura mediante el uso de un circuito frigorífico y la solución acuosa de cloruro de litio como deshidratante líquido es **viable**.
- En los casos presentados se obtiene el **menor consumo energético** en el compresor frigorífico en aquellos procesos que utilizan circuito frigorífico y la solución acuosa de cloruro de liquido como deshidratante líquido.
- En los casos presentados se obtiene **mejor eficiencia energética** en el compresor frigorífico en aquellos procesos que utilizan circuito frigorífico y la solución acuosa de cloruro de liquido como deshidratante líquido.
- Se **reduce el coste de explotación** de la instalación de deshumidificación al reducir el coste energético principal.
- Se resalta la importancia de **estudiar con detalle las condiciones de trabajo** del circuito frigorífico, la solución acuosa y los intercambiadores de calor de la instalación para conseguir un consumo energético en el compresor frigorífico satisfactorio.
- Se resuelve la **regeneración del deshidrantante líquido** a través del mismo circuito frigorífico utilizado, sin dependencias de fuentes energéticas exteriores y sin aumentar el consumo energético.
- En definitiva, se ha abierto un **nuevo camino para la deshumidificación del aire a baja temperatura**.

6 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

6 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

A partir de este trabajo se considera que sería interesante continuar investigando, en alguno de los siguientes puntos:

- Realizar una instalación experimental de deshumidificación del aire con circuito frigorífico y con la solución acuosa de cloruro de litio, que permita validar el ciclo completo estudiado en este trabajo.
- Completar los consumos totales de la instalación necesaria, incorporando los consumos derivados del transporte de los fluidos (bomba y ventiladores) intentando reducir su contribución al consumo total.
- Ampliar la modelización realizada, en función de los requerimientos de cada aplicación, incorporando criterios para conseguir determinar el proceso que sea más eficaz energéticamente, para cada caso.
- Trasladar la utilización de esta metodología a la deshumectación del aire que actualmente trata otros productos a medias o altas temperatura, afectando la calidad del producto final, por ejemplo productos secos deshidratados como pasas, orejones, etc. estudiando las particularidades que exigirá cada proceso, para mejorar la calidad del producto final.
- Comparar resultados con otros posibles deshidratantes líquidos.

7 BIBLIOGRAFIA

7 BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS

- [1] Al-Farayedhi, A.A., Gandhidasan, P., Al-Mutairi, M.A., 2002. Evaluation of heat and mass transfer coefficients in a gauze-type structured packing air dehumidifier operating with liquid desiccant. *International Journal of Refrigeration* 25, 330-339
- [2] Chaudhari, S.K., Patil, K.R., 2002. Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium chloride. *Physics and Chemistry of Liquids*, Vol 40 (3), 317-325
- [3] Conde, R.C., 2004. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design. *International Journal of Thermal Sciences* 43, 367-382
- [4] Fumo, N., Goswami, D.Y., 2002. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air deshumidification and desiccant regeneration. *Solar Energy*, Vol 72, No 4, 351-361
- [5] Gandhidasan, P, 2004. A simplified model for air deshumidification with liquid desiccant. *Solar Energy*, Vol 76, 409-416
- [6] Gandhidasan, P; Mohamed A., 2008. Prediction of vapor pressure of aqueous desiccants for cooling applications by using artificial neural networks. *Applied Thermal Engineering* 28, 126-135
- [7] Patek, J., Klomfar, J., 2008. Thermodynamic properties of the LiCl-H₂O system at vapor-liquid equilibrium from 273 K to 400K. *International Journal of Refrigeration* 31, 287-303

LIBROS

- [8] Ashrae, 2013. Fundamentals. Ashrae Handbook. Ashrae
- [9] Ashrae, 2012. HVAC Systems and Equipment. Ashrae Handbook. Ashrae
- [10] Ashrae, 2014. Refrigeration. Ashrae Handbook. Ashrae
- [11] Çengel, Y., Boles, M.A., 2007. Termodinámica. McGrawHill
- [12] McCabe, W., Smith J., Harriot,P., 2002. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. McGrawHill
- [13] Weast, R.C., 1979-1980. Handbook of Chemistry and Physics, 60 ed. CRC Press, inc

NORMATIVA

- [14] Reglamento (UE) N° 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 sobre los gases fluorados de efecto invernadero.
- [15] Real Decreto 138/2011, de 4 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias..
- [16] Real Decreto 1042/2013, de 27 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre los Gases Fluorados de Efecto Invernadero.
- [17] Ley 16/2013, de 29 de octubre, por la que se establecen determinadas medidas en materia de fiscalidad medioambiental y se adoptan otras medidas tributarias y financieras.

ANEXO A

ANEXO A

A.1 TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 2. ABSORBEDOR

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el absorbedor, se muestran a continuación.

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0078500	28,00	19,540	12,533	39,549	31,774	1245	898	2,14286
0,0080511	0,0079242	27,99	19,759	12,866	39,895	32,613	1254	904	2,14319
0,0106191	0,0079481	27,99	19,828	12,972	40,026	32,931	1258	907	2,14332
0,0131871	0,0079720	27,99	19,897	13,078	40,157	33,249	1262	909	2,14344
0,0183231	0,0080202	27,99	20,033	13,289	40,418	33,882	1269	914	2,14370
0,0208911	0,0080444	27,99	20,101	13,394	40,549	34,198	1273	917	2,14383
0,0234591	0,0080687	27,98	20,168	13,500	40,679	34,514	1277	919	2,14396
0,0260271	0,0080930	27,98	20,235	13,605	40,809	34,829	1281	922	2,14409
0,0311631	0,0081419	27,98	20,368	13,814	41,069	35,457	1288	928	2,14435
0,0337311	0,0081665	27,98	20,433	13,919	41,198	35,770	1292	931	2,14448
0,0362991	0,0081911	27,98	20,499	14,023	41,327	36,083	1296	934	2,14461
0,0388671	0,0082157	27,97	20,563	14,127	41,456	36,395	1300	937	2,14474
0,0440031	0,0082652	27,97	20,692	14,334	41,713	37,017	1308	943	2,14500
0,0465711	0,0082900	27,97	20,756	14,437	41,841	37,327	1312	946	2,14513
0,0491391	0,0083149	27,97	20,819	14,541	41,969	37,636	1315	950	2,14527
0,0517071	0,0083398	27,97	20,882	14,643	42,097	37,944	1319	953	2,14540
0,0568431	0,0083897	27,96	21,007	14,848	42,351	38,558	1327	960	2,14566
0,0594111	0,0084146	27,96	21,068	14,950	42,477	38,864	1331	963	2,14580
0,0619791	0,0084397	27,96	21,130	15,052	42,604	39,169	1335	967	2,14593
0,0645471	0,0084647	27,96	21,190	15,153	42,729	39,473	1339	971	2,14606
0,0696831	0,0085148	27,95	21,311	15,355	42,980	40,079	1347	978	2,14633
0,0722511	0,0085399	27,95	21,371	15,455	43,105	40,380	1351	982	2,14646
0,0748191	0,0085650	27,95	21,430	15,555	43,229	40,681	1355	985	2,14660
0,0773871	0,0085901	27,95	21,489	15,655	43,353	40,980	1358	989	2,14673
0,0825231	0,0086404	27,95	21,605	15,854	43,600	41,576	1366	997	2,14700
0,0850911	0,0086655	27,94	21,663	15,952	43,723	41,872	1370	1001	2,14713
0,0876591	0,0086906	27,94	21,720	16,051	43,845	42,167	1374	1005	2,14727
0,0902271	0,0087157	27,94	21,777	16,149	43,967	42,461	1378	1009	2,14740
0,0953631	0,0087659	27,94	21,889	16,343	44,210	43,046	1386	1017	2,14767
0,0979311	0,0087909	27,93	21,945	16,440	44,331	43,337	1390	1022	2,14780
0,1004991	0,0088160	27,93	22,000	16,537	44,451	43,626	1394	1026	2,14793
0,1030671	0,0088410	27,93	22,055	16,633	44,570	43,915	1398	1030	2,14807
0,1082031	0,0088910	27,93	22,163	16,824	44,808	44,488	1405	1039	2,14833
0,1107711	0,0089159	27,93	22,216	16,919	44,927	44,772	1409	1043	2,14847
0,1133391	0,0089408	27,92	22,269	17,013	45,044	45,056	1413	1047	2,14860

Tabla A.1. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 2

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1159071	0,0089657	27,92	22,322	17,107	45,162	45,338	1417	1052	2,14873
0,1210431	0,0090153	27,92	22,426	17,294	45,394	45,899	1425	1061	2,14899
0,1236111	0,0090401	27,92	22,477	17,386	45,510	46,177	1429	1065	2,14913
0,1261791	0,0090648	27,92	22,528	17,478	45,625	46,454	1433	1070	2,14926
0,1287471	0,0090895	27,91	22,579	17,570	45,740	46,730	1436	1074	2,14939
0,1338831	0,0091386	27,91	22,678	17,753	45,967	47,277	1444	1084	2,14965
0,1364511	0,0091632	27,91	22,728	17,843	46,080	47,548	1448	1088	2,14978
0,1390191	0,0091876	27,91	22,777	17,933	46,193	47,818	1452	1093	2,14991
0,1415871	0,0092120	27,91	22,825	18,022	46,304	48,087	1456	1098	2,15004
0,1467231	0,0092606	27,90	22,921	18,200	46,526	48,620	1463	1107	2,15030
0,1492911	0,0092848	27,90	22,968	18,288	46,636	48,885	1467	1112	2,15043
0,1518591	0,0093089	27,90	23,015	18,375	46,746	49,148	1471	1117	2,15056
0,1544271	0,0093330	27,90	23,061	18,463	46,855	49,410	1474	1122	2,15069
0,1595631	0,0093809	27,89	23,153	18,635	47,071	49,928	1482	1131	2,15094
0,1621311	0,0094047	27,89	23,198	18,721	47,178	50,185	1486	1136	2,15107
0,1646991	0,0094285	27,89	23,243	18,806	47,285	50,441	1489	1141	2,15120
0,1672671	0,0094522	27,89	23,287	18,890	47,391	50,695	1493	1146	2,15132
0,1724031	0,0094993	27,89	23,375	19,058	47,600	51,199	1500	1156	2,15157
0,1749711	0,0095227	27,88	23,418	19,141	47,705	51,449	1504	1161	2,15170
0,1775391	0,0095461	27,88	23,461	19,224	47,808	51,697	1508	1166	2,15182
0,1801071	0,0095693	27,88	23,503	19,306	47,911	51,943	1511	1171	2,15195
0,1852431	0,0096156	27,88	23,587	19,468	48,114	52,431	1519	1180	2,15219
0,1878111	0,0096385	27,88	23,628	19,549	48,215	52,673	1522	1185	2,15232
0,1903791	0,0096614	27,87	23,669	19,629	48,316	52,914	1526	1190	2,15244
0,1929471	0,0096842	27,87	23,709	19,708	48,415	53,152	1529	1195	2,15256
0,1980831	0,0097295	27,87	23,789	19,865	48,613	53,625	1536	1205	2,15280
0,2006511	0,0097520	27,87	23,828	19,943	48,710	53,859	1540	1210	2,15292
0,2032191	0,0097744	27,87	23,867	20,020	48,807	54,091	1543	1215	2,15304
0,2057871	0,0097967	27,87	23,905	20,097	48,904	54,322	1547	1220	2,15316
0,2109231	0,0098410	27,86	23,981	20,249	49,094	54,779	1554	1230	2,15340
0,2134911	0,0098630	27,86	24,018	20,324	49,189	55,005	1557	1235	2,15351
0,2160591	0,0098849	27,86	24,055	20,399	49,283	55,229	1561	1240	2,15363
0,2186271	0,0099066	27,86	24,092	20,473	49,376	55,452	1564	1245	2,15375
0,2237631	0,0099499	27,85	24,164	20,620	49,560	55,893	1571	1255	2,15398
0,2263311	0,0099713	27,85	24,199	20,692	49,651	56,111	1574	1260	2,15409

Tabla A.1. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 2

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,2288991	0,0099926	27,85	24,234	20,764	49,742	56,327	1577	1265	2,15421
0,2314671	0,0100138	27,85	24,269	20,835	49,831	56,542	1581	1270	2,15432
0,2366031	0,0100559	27,85	24,337	20,977	50,009	56,967	1587	1280	2,15454
0,2391711	0,0100768	27,85	24,371	21,047	50,097	57,176	1591	1285	2,15466
0,2417391	0,0100976	27,84	24,404	21,116	50,184	57,385	1594	1290	2,15477
0,2443071	0,0101182	27,84	24,437	21,184	50,271	57,591	1597	1295	2,15488
0,2494431	0,0101592	27,84	24,501	21,320	50,442	58,000	1603	1305	2,15509
0,2520111	0,0101795	27,84	24,533	21,387	50,526	58,202	1607	1310	2,15520
0,2545791	0,0101997	27,84	24,565	21,454	50,610	58,402	1610	1315	2,15531
0,2571471	0,0102197	27,84	24,596	21,520	50,693	58,601	1613	1320	2,15542
0,2622831	0,0102595	27,83	24,657	21,651	50,858	58,993	1619	1329	2,15563
0,2648511	0,0102792	27,83	24,687	21,715	50,939	59,187	1622	1334	2,15574
0,2674191	0,0102988	27,83	24,716	21,779	51,020	59,380	1625	1339	2,15584
0,2699871	0,0103183	27,83	24,746	21,842	51,099	59,570	1628	1344	2,15594
0,2751231	0,0103568	27,83	24,803	21,968	51,257	59,947	1634	1353	2,15615
0,2776911	0,0103759	27,83	24,832	22,029	51,335	60,133	1637	1358	2,15625
0,2802591	0,0103949	27,82	24,860	22,091	51,413	60,317	1640	1363	2,15635
0,2828271	0,0104138	27,82	24,887	22,151	51,489	60,500	1643	1367	2,15645
0,2879631	0,0104512	27,82	24,942	22,271	51,641	60,861	1649	1377	2,15665
0,2905311	0,0104697	27,82	24,968	22,331	51,716	61,039	1652	1382	2,15675
0,2930991	0,0104881	27,82	24,995	22,389	51,790	61,216	1655	1386	2,15685
0,2956671	0,0105063	27,82	25,021	22,447	51,863	61,391	1657	1391	2,15695
0,3008031	0,0105425	27,81	25,072	22,562	52,008	61,737	1663	1400	2,15714
0,3033711	0,0105604	27,81	25,097	22,619	52,080	61,907	1666	1405	2,15724
0,3059391	0,0105782	27,81	25,122	22,675	52,151	62,076	1669	1409	2,15733
0,3085071	0,0105959	27,81	25,146	22,731	52,221	62,244	1671	1414	2,15743
0,3136431	0,0106308	27,81	25,194	22,841	52,360	62,574	1677	1423	2,15761
0,3162111	0,0106481	27,81	25,217	22,895	52,428	62,737	1680	1427	2,15771
0,3187791	0,0106653	27,81	25,241	22,948	52,496	62,898	1682	1431	2,15780
0,3210000	0,0106801	27,80	25,260	22,994	52,587	63,116	1686	1437	2,15792

Tabla A.1. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 2

A.2 TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 2. REGENERADOR

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el regenerador, se muestran a continuación.

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0139548	27,80	32,000	34,000	67,872	96,561	2191	2682	2,15792
0,0133139	0,0138801	27,82	31,958	33,586	67,674	95,513	2182	2630	2,15717
0,0176363	0,0138576	27,82	31,946	33,463	67,603	95,136	2178	2612	2,15689
0,0219587	0,0138357	27,82	31,935	33,344	67,534	94,773	2175	2594	2,15662
0,0306035	0,0137941	27,83	31,916	33,120	67,405	94,090	2168	2561	2,15612
0,0349259	0,0137743	27,83	31,907	33,015	67,344	93,769	2165	2546	2,15587
0,0392483	0,0137552	27,84	31,899	32,913	67,286	93,460	2162	2531	2,15564
0,0435707	0,0137366	27,84	31,892	32,816	67,230	93,163	2159	2517	2,15541
0,0522155	0,0137010	27,84	31,879	32,632	67,124	92,603	2154	2490	2,15498
0,0565379	0,0136841	27,85	31,874	32,545	67,074	92,339	2151	2478	2,15477
0,0608603	0,0136676	27,85	31,869	32,462	67,026	92,085	2149	2466	2,15457
0,0651827	0,0136515	27,85	31,865	32,382	66,980	91,841	2146	2455	2,15438
0,0738275	0,0136208	27,86	31,858	32,230	66,892	91,380	2141	2433	2,15400
0,0781499	0,0136061	27,86	31,856	32,159	66,851	91,163	2139	2423	2,15383
0,0824723	0,0135917	27,86	31,854	32,090	66,812	90,954	2137	2413	2,15365
0,0867947	0,0135777	27,86	31,852	32,024	66,774	90,753	2135	2404	2,15348
0,0954395	0,0135508	27,87	31,851	31,899	66,702	90,373	2130	2386	2,15315
0,0997619	0,0135378	27,87	31,850	31,840	66,668	90,194	2128	2378	2,15300
0,1040843	0,0135252	27,87	31,851	31,783	66,635	90,022	2126	2370	2,15284
0,1084067	0,0135128	27,87	31,851	31,729	66,603	89,856	2124	2363	2,15269
0,1170515	0,0134889	27,88	31,854	31,625	66,544	89,542	2121	2348	2,15240
0,1213739	0,0134773	27,88	31,856	31,576	66,516	89,394	2119	2342	2,15226
0,1256963	0,0134660	27,88	31,858	31,529	66,489	89,251	2117	2335	2,15212
0,1300187	0,0134549	27,88	31,861	31,484	66,463	89,114	2115	2329	2,15199
0,1386635	0,0134335	27,89	31,867	31,398	66,413	88,855	2112	2317	2,15173
0,1429859	0,0134230	27,89	31,871	31,358	66,390	88,732	2110	2312	2,15160
0,1473083	0,0134128	27,89	31,875	31,319	66,367	88,614	2109	2306	2,15148
0,1516307	0,0134027	27,89	31,879	31,281	66,346	88,501	2107	2301	2,15136
0,1602755	0,0133832	27,89	31,889	31,210	66,305	88,286	2104	2291	2,15112
0,1645979	0,0133736	27,89	31,894	31,176	66,285	88,185	2103	2287	2,15101
0,1689203	0,0133642	27,90	31,900	31,144	66,267	88,087	2101	2282	2,15089
0,1732427	0,0133550	27,90	31,906	31,113	66,249	87,993	2100	2278	2,15078
0,1818875	0,0133369	27,90	31,918	31,054	66,215	87,816	2097	2270	2,15056
0,1862099	0,0133281	27,90	31,925	31,026	66,199	87,732	2096	2266	2,15045
0,1905323	0,0133193	27,90	31,931	30,999	66,183	87,651	2094	2263	2,15035

Tabla A.2. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 2

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1948547	0,0133107	27,90	31,939	30,973	66,168	87,573	2093	2259	2,15024
0,2034995	0,0132938	27,91	31,954	30,924	66,140	87,426	2090	2253	2,15004
0,2078219	0,0132855	27,91	31,961	30,901	66,126	87,357	2089	2249	2,14994
0,2121443	0,0132773	27,91	31,970	30,878	66,113	87,290	2088	2246	2,14984
0,2164667	0,0132692	27,91	31,978	30,857	66,101	87,225	2087	2243	2,14974
0,2251115	0,0132531	27,91	31,995	30,816	66,077	87,104	2084	2238	2,14955
0,2294339	0,0132453	27,91	32,004	30,797	66,066	87,046	2083	2235	2,14945
0,2337563	0,0132374	27,92	32,013	30,778	66,055	86,991	2082	2233	2,14936
0,2380787	0,0132297	27,92	32,023	30,760	66,045	86,938	2081	2230	2,14927
0,2467235	0,0132143	27,92	32,042	30,726	66,025	86,837	2078	2226	2,14908
0,2510459	0,0132067	27,92	32,052	30,710	66,016	86,789	2077	2224	2,14899
0,2553683	0,0131992	27,92	32,062	30,695	66,007	86,744	2076	2221	2,14890
0,2596907	0,0131917	27,92	32,073	30,680	65,998	86,700	2075	2219	2,14881
0,2683355	0,0131768	27,93	32,094	30,652	65,982	86,617	2072	2216	2,14863
0,2726579	0,0131694	27,93	32,105	30,638	65,974	86,578	2071	2214	2,14854
0,2769803	0,0131621	27,93	32,116	30,626	65,966	86,540	2070	2212	2,14845
0,2813027	0,0131548	27,93	32,127	30,613	65,959	86,504	2069	2210	2,14837
0,2899475	0,0131402	27,93	32,150	30,590	65,946	86,435	2067	2207	2,14819
0,2942699	0,0131330	27,93	32,162	30,579	65,939	86,403	2066	2205	2,14810
0,2985923	0,0131258	27,93	32,174	30,568	65,933	86,372	2064	2204	2,14802
0,3029147	0,0131186	27,93	32,186	30,558	65,927	86,342	2063	2203	2,14793
0,3115595	0,0131042	27,94	32,211	30,538	65,915	86,286	2061	2200	2,14776
0,3158819	0,0130970	27,94	32,224	30,529	65,910	86,260	2060	2198	2,14767
0,3202043	0,0130899	27,94	32,236	30,520	65,905	86,234	2059	2197	2,14759
0,3245267	0,0130827	27,94	32,249	30,512	65,900	86,210	2058	2196	2,14750
0,3331715	0,0130684	27,94	32,276	30,496	65,890	86,164	2056	2194	2,14733
0,3374939	0,0130613	27,94	32,289	30,488	65,885	86,143	2055	2193	2,14724
0,3418163	0,0130541	27,94	32,303	30,481	65,881	86,122	2053	2192	2,14716
0,3461387	0,0130470	27,95	32,317	30,474	65,877	86,102	2052	2191	2,14707
0,3547835	0,0130326	27,95	32,345	30,460	65,869	86,065	2050	2189	2,14690
0,3591059	0,0130254	27,95	32,359	30,454	65,865	86,047	2049	2188	2,14681
0,3634283	0,0130183	27,95	32,373	30,448	65,861	86,031	2048	2187	2,14673
0,3677507	0,0130111	27,95	32,388	30,442	65,858	86,014	2047	2186	2,14664
0,3763955	0,0129966	27,95	32,417	30,431	65,851	85,984	2045	2184	2,14647
0,3807179	0,0129894	27,95	32,432	30,426	65,848	85,970	2043	2183	2,14638

Tabla A.2. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 2

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,3850403	0,0129821	27,96	32,447	30,421	65,845	85,957	2042	2183	2,14629
0,3893627	0,0129748	27,96	32,463	30,416	65,842	85,944	2041	2182	2,14621
0,3980075	0,0129602	27,96	32,494	30,407	65,836	85,920	2039	2181	2,14603
0,4023299	0,0129528	27,96	32,510	30,403	65,834	85,909	2038	2180	2,14594
0,4066523	0,0129455	27,96	32,525	30,398	65,831	85,898	2037	2179	2,14585
0,4109747	0,0129381	27,96	32,542	30,394	65,828	85,888	2036	2179	2,14577
0,4196195	0,0129232	27,96	32,574	30,387	65,824	85,869	2033	2177	2,14559
0,4239419	0,0129157	27,97	32,591	30,384	65,822	85,860	2032	2177	2,14550
0,4282643	0,0129082	27,97	32,607	30,380	65,819	85,852	2031	2176	2,14541
0,4325867	0,0129006	27,97	32,624	30,377	65,817	85,844	2030	2176	2,14532
0,4412315	0,0128854	27,97	32,658	30,371	65,813	85,829	2027	2175	2,14514
0,4455539	0,0128778	27,97	32,675	30,368	65,811	85,823	2026	2174	2,14504
0,4498763	0,0128701	27,97	32,693	30,365	65,810	85,816	2025	2174	2,14495
0,4541987	0,0128623	27,97	32,710	30,362	65,808	85,810	2024	2173	2,14486
0,4628435	0,0128468	27,98	32,746	30,358	65,805	85,799	2022	2172	2,14467
0,4671659	0,0128389	27,98	32,764	30,355	65,803	85,794	2020	2172	2,14458
0,4714883	0,0128311	27,98	32,782	30,353	65,801	85,790	2019	2171	2,14448
0,4758107	0,0128231	27,98	32,800	30,351	65,800	85,785	2018	2171	2,14439
0,4844555	0,0128071	27,98	32,838	30,347	65,797	85,777	2015	2170	2,14420
0,4887779	0,0127991	27,98	32,856	30,345	65,796	85,774	2014	2170	2,14410
0,4931003	0,0127910	27,99	32,875	30,343	65,795	85,770	2013	2170	2,14401
0,4974227	0,0127829	27,99	32,894	30,341	65,793	85,767	2012	2169	2,14391
0,5060675	0,0127664	27,99	32,933	30,338	65,791	85,762	2009	2168	2,14371
0,5103899	0,0127581	27,99	32,953	30,337	65,790	85,760	2008	2168	2,14361
0,5147123	0,0127498	27,99	32,972	30,335	65,789	85,758	2007	2168	2,14351
0,5190347	0,0127414	27,99	32,992	30,334	65,788	85,756	2005	2167	2,14341
0,5276795	0,0127245	28,00	33,033	30,331	65,786	85,753	2003	2167	2,14321
0,5320019	0,0127159	28,00	33,053	30,330	65,785	85,752	2001	2167	2,14311
0,5363243	0,0127073	28,00	33,073	30,329	65,784	85,751	2000	2166	2,14300
0,5403000	0,0126994	28,00	33,092	30,328	65,783	85,750	1998	2166	2,14286

Tabla A.2. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 2

A.3 TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 3. ABSORBEDOR

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el absorbedor, se muestran a continuación.

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0078500	30,00	19,540	21,304	39,549	63,397	1245	1145	2,00000
0,0080285	0,0078716	30,00	19,484	21,301	39,547	63,385	1248	1145	2,00010
0,0105893	0,0078787	30,00	19,465	21,300	39,546	63,381	1249	1145	2,00013
0,0131501	0,0078858	30,00	19,447	21,299	39,545	63,377	1250	1145	2,00017
0,0182717	0,0079003	30,00	19,409	21,297	39,544	63,368	1252	1145	2,00025
0,0208325	0,0079076	30,00	19,390	21,297	39,543	63,364	1253	1145	2,00029
0,0233933	0,0079151	29,99	19,371	21,296	39,542	63,359	1254	1145	2,00033
0,0259541	0,0079226	29,99	19,352	21,295	39,542	63,355	1255	1145	2,00037
0,0310757	0,0079378	29,99	19,312	21,293	39,540	63,346	1258	1145	2,00045
0,0336365	0,0079456	29,99	19,293	21,292	39,539	63,342	1259	1145	2,00049
0,0361973	0,0079535	29,99	19,272	21,292	39,539	63,338	1260	1145	2,00053
0,0387581	0,0079614	29,99	19,252	21,291	39,538	63,334	1261	1145	2,00057
0,0438797	0,0079775	29,99	19,211	21,289	39,537	63,325	1264	1145	2,00066
0,0464405	0,0079857	29,99	19,190	21,289	39,536	63,321	1265	1145	2,00070
0,0490013	0,0079940	29,99	19,169	21,288	39,536	63,317	1267	1145	2,00074
0,0515621	0,0080023	29,99	19,147	21,287	39,535	63,313	1268	1145	2,00079
0,0566837	0,0080193	29,99	19,104	21,286	39,534	63,304	1271	1145	2,00088
0,0592445	0,0080280	29,99	19,082	21,285	39,534	63,300	1272	1145	2,00092
0,0618053	0,0080367	29,99	19,060	21,284	39,533	63,296	1273	1145	2,00097
0,0643661	0,0080455	29,98	19,037	21,283	39,533	63,292	1275	1145	2,00102
0,0694877	0,0080634	29,98	18,992	21,282	39,532	63,283	1277	1145	2,00111
0,0720485	0,0080726	29,98	18,969	21,281	39,531	63,279	1279	1145	2,00116
0,0746093	0,0080818	29,98	18,946	21,281	39,531	63,275	1280	1145	2,00121
0,0771701	0,0080911	29,98	18,922	21,280	39,530	63,271	1282	1145	2,00126
0,0822917	0,0081099	29,98	18,874	21,279	39,530	63,263	1285	1145	2,00136
0,0848525	0,0081195	29,98	18,850	21,278	39,529	63,259	1286	1145	2,00141
0,0874133	0,0081292	29,98	18,826	21,278	39,529	63,255	1288	1145	2,00146
0,0899741	0,0081390	29,98	18,801	21,277	39,529	63,251	1289	1145	2,00151
0,0950957	0,0081590	29,98	18,751	21,276	39,528	63,242	1292	1145	2,00162
0,0976565	0,0081691	29,97	18,725	21,275	39,528	63,238	1294	1145	2,00167
0,1002173	0,0081793	29,97	18,700	21,275	39,527	63,234	1295	1145	2,00173
0,1027781	0,0081896	29,97	18,674	21,274	39,527	63,230	1297	1145	2,00178
0,1078997	0,0082106	29,97	18,621	21,273	39,527	63,222	1300	1145	2,00189
0,1104605	0,0082213	29,97	18,594	21,273	39,526	63,218	1302	1145	2,00195
0,1130213	0,0082321	29,97	18,567	21,272	39,526	63,214	1304	1145	2,00201

Tabla A.3. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1155821	0,0082429	29,97	18,540	21,272	39,526	63,210	1305	1145	2,00206
0,1207037	0,0082650	29,97	18,485	21,271	39,525	63,202	1309	1145	2,00218
0,1232645	0,0082763	29,97	18,457	21,270	39,525	63,198	1310	1145	2,00224
0,1258253	0,0082876	29,97	18,428	21,270	39,525	63,194	1312	1145	2,00230
0,1283861	0,0082991	29,96	18,400	21,269	39,525	63,190	1314	1145	2,00236
0,1335077	0,0083224	29,96	18,342	21,268	39,525	63,182	1318	1145	2,00248
0,1360685	0,0083342	29,96	18,312	21,268	39,525	63,177	1320	1145	2,00255
0,1386293	0,0083462	29,96	18,282	21,268	39,525	63,173	1321	1145	2,00261
0,1411901	0,0083583	29,96	18,252	21,267	39,524	63,169	1323	1145	2,00267
0,1463117	0,0083828	29,96	18,191	21,266	39,524	63,161	1327	1145	2,00280
0,1488725	0,0083953	29,96	18,160	21,266	39,524	63,157	1329	1145	2,00287
0,1514333	0,0084079	29,96	18,129	21,266	39,524	63,153	1331	1146	2,00294
0,1539941	0,0084206	29,95	18,097	21,265	39,524	63,149	1333	1146	2,00300
0,1591157	0,0084464	29,95	18,033	21,265	39,524	63,141	1337	1146	2,00314
0,1616765	0,0084595	29,95	18,001	21,264	39,524	63,137	1339	1146	2,00321
0,1642373	0,0084728	29,95	17,968	21,264	39,524	63,133	1341	1146	2,00328
0,1667981	0,0084862	29,95	17,935	21,264	39,524	63,129	1343	1146	2,00335
0,1719197	0,0085134	29,95	17,867	21,263	39,525	63,120	1347	1146	2,00350
0,1744805	0,0085273	29,95	17,833	21,263	39,525	63,116	1350	1146	2,00357
0,1770413	0,0085412	29,94	17,799	21,262	39,525	63,112	1352	1146	2,00364
0,1796021	0,0085553	29,94	17,764	21,262	39,525	63,108	1354	1146	2,00372
0,1847237	0,0085840	29,94	17,693	21,262	39,525	63,100	1358	1146	2,00387
0,1872845	0,0085986	29,94	17,657	21,261	39,525	63,095	1361	1146	2,00395
0,1898453	0,0086133	29,94	17,621	21,261	39,526	63,091	1363	1146	2,00402
0,1924061	0,0086281	29,94	17,584	21,261	39,526	63,087	1365	1146	2,00410
0,1975277	0,0086583	29,94	17,509	21,260	39,526	63,079	1370	1147	2,00426
0,2000885	0,0086736	29,93	17,472	21,260	39,527	63,075	1372	1147	2,00434
0,2026493	0,0086891	29,93	17,433	21,260	39,527	63,070	1375	1147	2,00443
0,2052101	0,0087048	29,93	17,395	21,260	39,527	63,066	1377	1147	2,00451
0,2103317	0,0087365	29,93	17,317	21,259	39,528	63,058	1382	1147	2,00468
0,2128925	0,0087527	29,93	17,277	21,259	39,528	63,053	1385	1147	2,00476
0,2154533	0,0087690	29,93	17,237	21,259	39,528	63,049	1387	1147	2,00485
0,2180141	0,0087854	29,93	17,196	21,259	39,529	63,045	1390	1147	2,00494
0,2231357	0,0088189	29,92	17,114	21,259	39,529	63,036	1395	1147	2,00511
0,2256965	0,0088359	29,92	17,072	21,259	39,530	63,032	1397	1147	2,00520

Tabla A.3. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,2282573	0,0088530	29,92	17,030	21,258	39,530	63,027	1400	1148	2,00529
0,2308181	0,0088704	29,92	16,988	21,258	39,530	63,023	1403	1148	2,00539
0,2359397	0,0089056	29,92	16,901	21,258	39,531	63,014	1408	1148	2,00557
0,2385005	0,0089235	29,91	16,857	21,258	39,532	63,010	1411	1148	2,00567
0,2410613	0,0089416	29,91	16,813	21,258	39,532	63,005	1414	1148	2,00576
0,2436221	0,0089598	29,91	16,768	21,258	39,533	63,001	1417	1148	2,00586
0,2487437	0,0089969	29,91	16,677	21,258	39,534	62,992	1422	1148	2,00606
0,2513045	0,0090157	29,91	16,631	21,258	39,534	62,988	1425	1148	2,00616
0,2538653	0,0090347	29,91	16,584	21,258	39,535	62,983	1428	1149	2,00626
0,2564261	0,0090539	29,90	16,537	21,258	39,535	62,979	1431	1149	2,00636
0,2615477	0,0090930	29,90	16,442	21,258	39,536	62,969	1437	1149	2,00656
0,2641085	0,0091128	29,90	16,393	21,258	39,537	62,965	1440	1149	2,00667
0,2666693	0,0091328	29,90	16,344	21,258	39,538	62,960	1444	1149	2,00678
0,2692301	0,0091530	29,90	16,295	21,258	39,538	62,956	1447	1149	2,00688
0,2743517	0,0091941	29,89	16,194	21,258	39,540	62,946	1453	1149	2,00710
0,2769125	0,0092150	29,89	16,143	21,258	39,540	62,942	1456	1150	2,00721
0,2794733	0,0092360	29,89	16,092	21,258	39,541	62,937	1460	1150	2,00732
0,2820341	0,0092573	29,89	16,040	21,258	39,542	62,932	1463	1150	2,00743
0,2871557	0,0093005	29,88	15,934	21,258	39,543	62,923	1470	1150	2,00766
0,2897165	0,0093225	29,88	15,881	21,258	39,544	62,918	1473	1150	2,00778
0,2922773	0,0093447	29,88	15,826	21,258	39,544	62,913	1476	1150	2,00790
0,2948381	0,0093671	29,88	15,772	21,258	39,545	62,908	1480	1150	2,00802
0,2999597	0,0094126	29,88	15,661	21,259	39,547	62,898	1487	1151	2,00826
0,3025205	0,0094357	29,87	15,604	21,259	39,548	62,893	1491	1151	2,00838
0,3050813	0,0094590	29,87	15,547	21,259	39,548	62,888	1494	1151	2,00850
0,3076421	0,0094826	29,87	15,490	21,259	39,549	62,883	1498	1151	2,00863
0,3127637	0,0095305	29,87	15,373	21,259	39,551	62,873	1505	1151	2,00888
0,3153245	0,0095548	29,86	15,314	21,259	39,552	62,868	1509	1152	2,00901
0,3178853	0,0095794	29,86	15,254	21,260	39,553	62,863	1513	1152	2,00914
0,3201000	0,0096008	29,86	15,202	21,260	39,554	62,856	1518	1152	2,00932

Tabla A.3. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el absorbedor del proceso 3

A.4. TRATAMIENTO DEL AIRE EN LOCALES CON ALTOS APORTES DE HUMEDAD. PROCESO 3. REGENERADOR

Los valores de las variables obtenidos con la resolución del sistema de ecuaciones, en función de z , para el absorbedor, se muestran a continuación.

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0	0,0134765	29,86	33,000	34,000	67,678	100,880	2118	2408	2,00932
0,0124085	0,0134353	29,87	32,981	33,759	67,572	100,287	2113	2380	2,00890
0,0164289	0,0134228	29,87	32,976	33,687	67,534	100,073	2111	2370	2,00875
0,0204493	0,0134107	29,87	32,971	33,617	67,497	99,868	2109	2360	2,00860
0,0284901	0,0133874	29,88	32,963	33,486	67,428	99,480	2105	2342	2,00832
0,0325105	0,0133763	29,88	32,959	33,424	67,395	99,297	2103	2334	2,00818
0,0365309	0,0133655	29,88	32,956	33,365	67,364	99,121	2102	2326	2,00805
0,0405513	0,0133549	29,88	32,954	33,308	67,333	98,952	2100	2318	2,00792
0,0485921	0,0133347	29,89	32,949	33,199	67,276	98,632	2097	2304	2,00768
0,0526125	0,0133250	29,89	32,948	33,148	67,249	98,482	2095	2297	2,00756
0,0566329	0,0133156	29,89	32,947	33,099	67,223	98,337	2094	2290	2,00744
0,0606533	0,0133063	29,89	32,946	33,052	67,198	98,197	2092	2284	2,00733
0,0686941	0,0132886	29,89	32,945	32,962	67,151	97,934	2090	2272	2,00711
0,0727145	0,0132800	29,90	32,945	32,920	67,129	97,809	2088	2266	2,00701
0,0767349	0,0132716	29,90	32,945	32,880	67,107	97,690	2087	2261	2,00691
0,0807553	0,0132635	29,90	32,946	32,840	67,086	97,574	2086	2255	2,00681
0,0887961	0,0132477	29,90	32,948	32,766	67,047	97,357	2083	2245	2,00662
0,0928165	0,0132400	29,90	32,949	32,732	67,029	97,254	2082	2241	2,00652
0,0968369	0,0132325	29,90	32,951	32,698	67,011	97,156	2081	2236	2,00643
0,1008573	0,0132252	29,91	32,953	32,665	66,994	97,060	2080	2232	2,00635
0,1088981	0,0132110	29,91	32,957	32,604	66,961	96,881	2078	2224	2,00617
0,1129185	0,0132041	29,91	32,960	32,575	66,946	96,796	2077	2220	2,00609
0,1169389	0,0131973	29,91	32,963	32,547	66,931	96,715	2075	2216	2,00601
0,1209593	0,0131906	29,91	32,966	32,520	66,917	96,636	2074	2213	2,00593
0,1290001	0,0131776	29,91	32,972	32,470	66,890	96,488	2072	2206	2,00577
0,1330205	0,0131713	29,92	32,976	32,446	66,877	96,418	2071	2203	2,00569
0,1370409	0,0131650	29,92	32,980	32,423	66,865	96,351	2070	2200	2,00562
0,1410613	0,0131589	29,92	32,984	32,400	66,853	96,286	2069	2197	2,00554
0,1491021	0,0131469	29,92	32,992	32,358	66,831	96,163	2068	2191	2,00540
0,1531225	0,0131410	29,92	32,997	32,338	66,820	96,106	2067	2189	2,00533
0,1571429	0,0131353	29,92	33,001	32,319	66,810	96,050	2066	2186	2,00526
0,1611633	0,0131295	29,92	33,006	32,301	66,800	95,997	2065	2184	2,00519
0,1692041	0,0131183	29,92	33,016	32,266	66,782	95,896	2063	2179	2,00505
0,1732245	0,0131128	29,93	33,022	32,249	66,773	95,848	2062	2177	2,00499
0,1772449	0,0131073	29,93	33,027	32,233	66,764	95,802	2062	2175	2,00492

Tabla A.4. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,1812653	0,0131020	29,93	33,033	32,218	66,756	95,758	2061	2173	2,00485
0,1893061	0,0130913	29,93	33,044	32,189	66,741	95,675	2059	2169	2,00473
0,1933265	0,0130861	29,93	33,050	32,175	66,733	95,636	2058	2167	2,00466
0,1973469	0,0130809	29,93	33,057	32,162	66,726	95,599	2057	2165	2,00460
0,2013673	0,0130757	29,93	33,063	32,149	66,720	95,563	2057	2164	2,00454
0,2094081	0,0130656	29,93	33,076	32,125	66,707	95,494	2055	2160	2,00442
0,2134285	0,0130605	29,94	33,083	32,114	66,701	95,462	2054	2159	2,00436
0,2174489	0,0130555	29,94	33,090	32,103	66,695	95,431	2053	2157	2,00430
0,2214693	0,0130506	29,94	33,096	32,092	66,689	95,402	2053	2156	2,00424
0,2295101	0,0130407	29,94	33,111	32,072	66,678	95,346	2051	2153	2,00412
0,2335305	0,0130358	29,94	33,118	32,063	66,673	95,320	2050	2152	2,00406
0,2375509	0,0130310	29,94	33,125	32,054	66,668	95,294	2050	2151	2,00400
0,2415713	0,0130261	29,94	33,133	32,045	66,664	95,270	2049	2150	2,00394
0,2496121	0,0130165	29,94	33,148	32,029	66,655	95,225	2047	2147	2,00383
0,2536325	0,0130117	29,94	33,156	32,021	66,650	95,203	2047	2146	2,00377
0,2576529	0,0130069	29,94	33,164	32,014	66,646	95,183	2046	2145	2,00371
0,2616733	0,0130022	29,95	33,172	32,006	66,642	95,163	2045	2144	2,00365
0,2697141	0,0129927	29,95	33,189	31,993	66,635	95,126	2044	2142	2,00354
0,2737345	0,0129879	29,95	33,197	31,986	66,631	95,109	2043	2141	2,00348
0,2777549	0,0129832	29,95	33,206	31,980	66,628	95,092	2042	2141	2,00343
0,2817753	0,0129785	29,95	33,214	31,974	66,625	95,076	2042	2140	2,00337
0,2898161	0,0129691	29,95	33,232	31,963	66,618	95,047	2040	2138	2,00326
0,2938365	0,0129643	29,95	33,241	31,957	66,615	95,033	2039	2137	2,00320
0,2978569	0,0129596	29,95	33,250	31,952	66,613	95,019	2039	2137	2,00314
0,3018773	0,0129549	29,95	33,259	31,947	66,610	95,007	2038	2136	2,00309
0,3099181	0,0129455	29,96	33,278	31,938	66,605	94,983	2037	2135	2,00297
0,3139385	0,0129408	29,96	33,287	31,934	66,602	94,972	2036	2134	2,00292
0,3179589	0,0129360	29,96	33,296	31,930	66,600	94,962	2035	2133	2,00286
0,3219793	0,0129313	29,96	33,306	31,926	66,597	94,952	2034	2133	2,00280
0,3300201	0,0129218	29,96	33,326	31,918	66,593	94,933	2033	2132	2,00269
0,3340405	0,0129171	29,96	33,335	31,914	66,591	94,924	2032	2131	2,00263
0,3380609	0,0129123	29,96	33,345	31,911	66,589	94,916	2031	2131	2,00258
0,3420813	0,0129075	29,96	33,355	31,908	66,587	94,908	2031	2130	2,00252
0,3501221	0,0128979	29,96	33,376	31,901	66,584	94,894	2029	2129	2,00240
0,3541425	0,0128931	29,97	33,386	31,898	66,582	94,887	2028	2129	2,00235

Tabla A.4. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3

z	Wa	X	Ta	Ts	Ha	Hs	Pa	Ps	ms
0,3581629	0,0128883	29,97	33,397	31,896	66,580	94,881	2028	2128	2,00229
0,3621833	0,0128834	29,97	33,407	31,893	66,579	94,875	2027	2128	2,00223
0,3702241	0,0128737	29,97	33,429	31,888	66,575	94,864	2025	2127	2,00211
0,3742445	0,0128688	29,97	33,439	31,885	66,574	94,859	2025	2126	2,00205
0,3782649	0,0128639	29,97	33,450	31,883	66,573	94,855	2024	2126	2,00200
0,3822853	0,0128589	29,97	33,461	31,881	66,571	94,850	2023	2126	2,00194
0,3903261	0,0128490	29,97	33,484	31,877	66,569	94,843	2022	2125	2,00182
0,3943465	0,0128440	29,97	33,495	31,875	66,568	94,839	2021	2125	2,00176
0,3983669	0,0128390	29,98	33,506	31,873	66,566	94,836	2020	2124	2,00170
0,4023873	0,0128340	29,98	33,518	31,871	66,565	94,833	2019	2124	2,00164
0,4104281	0,0128239	29,98	33,541	31,868	66,563	94,828	2018	2123	2,00152
0,4144485	0,0128188	29,98	33,553	31,866	66,562	94,826	2017	2123	2,00145
0,4184689	0,0128136	29,98	33,564	31,865	66,561	94,824	2016	2123	2,00139
0,4224893	0,0128085	29,98	33,576	31,864	66,560	94,822	2015	2122	2,00133
0,4305301	0,0127981	29,98	33,600	31,861	66,558	94,819	2014	2122	2,00121
0,4345505	0,0127929	29,98	33,613	31,860	66,557	94,817	2013	2122	2,00115
0,4385709	0,0127876	29,98	33,625	31,859	66,557	94,816	2012	2121	2,00108
0,4425913	0,0127824	29,99	33,637	31,857	66,556	94,816	2011	2121	2,00102
0,4506321	0,0127717	29,99	33,662	31,855	66,554	94,814	2010	2121	2,00089
0,4546525	0,0127664	29,99	33,675	31,854	66,554	94,814	2009	2120	2,00083
0,4586729	0,0127610	29,99	33,688	31,854	66,553	94,814	2008	2120	2,00076
0,4626933	0,0127555	29,99	33,701	31,853	66,552	94,814	2007	2120	2,00070
0,4707341	0,0127446	29,99	33,727	31,851	66,551	94,814	2006	2120	2,00057
0,4747545	0,0127391	29,99	33,740	31,850	66,550	94,815	2005	2119	2,00050
0,4787749	0,0127336	29,99	33,753	31,850	66,550	94,815	2004	2119	2,00044
0,4827953	0,0127280	29,99	33,766	31,849	66,549	94,816	2003	2119	2,00037
0,4908361	0,0127167	30,00	33,793	31,848	66,548	94,818	2001	2119	2,00023
0,4948565	0,0127111	30,00	33,807	31,847	66,548	94,819	2000	2118	2,00017
0,4988769	0,0127054	30,00	33,821	31,847	66,547	94,820	2000	2118	2,00010
0,5025500	0,0127001	30,00	33,833	31,847	66,546	94,822	1998	2118	2,00000

Tabla A.4. Tabla de valores de las variables del aire y de la solución en función de la z, en el regenerador del proceso 3