

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE CONTROL DEL PROTOTIPO

4.1 – INTRODUCCIÓN

4.2 – LAZOS DE CONTROL ESTABLECIDOS

4.2.1 – ESTRATEGIA DE CONTROL EN MODO CALEFACCIÓN

4.2.2 – ESTRATEGIA DE CONTROL EN MODO REFRIGERACIÓN

4.3 – INSTRUMENTACIÓN

4.4 – ESQUEMA DEL CUADRO ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO

4.5 – COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL EQUIPO

4.5.1 – COMPORTAMIENTO DEL CONTROL DE LOS NIVELES.

4.5.2 – COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO ANTE PERTURBACIONES EXTERIORES

4.1 – Introducción

Los objetivos básicos de cualquier sistema de control para equipos de refrigeración son los de mantener constantes las condiciones operativas como temperaturas y/o presiones, consumiendo el mínimo de energía y garantizar un funcionamiento seguro en todo momento. Para cumplir dichos requerimientos, el sistema de control debe ser capaz de adaptar la capacidad frigorífica a la carga térmica necesaria en cada instante.

En general, los equipos de absorción suelen presentar una excelente respuesta a carga parcial, siendo posible la modulación de la carga entre el 20% y el 100%, manteniendo casi inalterable su COP. No obstante, su principal inconveniente, es la gran inercia térmica, lo que los convierte en equipos poco atractivos desde el punto de vista de confort.

El prototipo desarrollado en este trabajo presenta un doble interés. Por una parte, el uso de intercambiadores de placas permite obtener un equipo compacto. Por otra, debido a que dichos intercambiadores son ligeros y sólo pueden albergar una pequeña cantidad de líquido en su interior, el resultado es un equipo con una inercia térmica relativamente baja.

A diferencia de los equipos de absorción comercializados actualmente que requieren unos sistemas de control bastante sofisticados para evitar los problemas de cristalización de la solución de Agua-BrLi, o bien de rectificación en las unidades de Amoniaco-Agua, el prototipo desarrollado no presenta dichos inconveniente, por lo que se podrán adaptar estrategias de control simples.

4.2 – Lazos de control establecidos

La estrategia de control adoptada debe poder garantizar en cualquier instante un comportamiento eficaz de la máquina, desde el momento del arranque hasta la parada, además de conseguir un comportamiento seguro en todo momento.

Desde el punto de vista de seguridad, los principales puntos de riesgo se localizan en la caldera y no en el prototipo, ya que si éste no esta operativo, la presión en su interior es inferior a la atmosférica, y sólo una pequeña parte de él se halla a una presión ligeramente superior a la atmosférica durante el funcionamiento. Por otra parte, la presión de operación del generador de alta está directamente relacionada con la temperatura del vapor procedente de la caldera, así como de la concentración de la solución rica. De esta forma, si ya se limita la temperatura de operación de la caldera, la presión del generador únicamente dependerá de las pequeñas variaciones de concentración de la solución, y no se precisa un tipo de control adicional.

Desde el punto de vista de control, se han establecido dos estrategias ligeramente diferentes, una para operación en modo calefacción y otra para la operación en modo refrigeración. Los diagramas P&ID para ambos modos de operación se detallan en las Fig. 4.1 y Fig. 4.2.

4.2.1 – Estrategia de control en modo calefacción

En la operación en modo calefacción, el equipo opera como un ciclo de absorción de simple efecto, y por lo tanto una parte del ciclo queda fuera de servicio, como es el caso del intercambiador de calor solución-solución IC1 y el condensador/generador C1/G2.

Para la operación en simple efecto, es preciso manipular la válvula de tres vías del separador del generador de alta (V1), con el fin de direccionar directamente el vapor de metanol al condensador (C2). Además, se requiere abrir la válvula de comunicación entre el generador de alta y el generador de baja (V3). De esta manera, el generador de alta (G1) y el generador de baja (G2) quedan comunicados por vasos comunicante, y es inviable el anegamiento del separador de gotas del generador de alta debido a la diferencia de alturas entre ambos generadores. Evidentemente, la válvula motorizada situada a la entrada del generador de baja (G2) se hallará completamente cerrada en la operación en modo calefacción. Finalmente, y para aislar completamente el intercambiador de solución-solución IC1, es necesario girar la válvula de tres vías a la entrada de este intercambiador (V2) para dirigir la solución al generador (G1).

Una vez el equipo se halla listo para operar, es preciso establecer los siguientes lazos de control:

- a) Presión del absorbedor. La presión de operación del absorbedor durante la operación en modo calefacción se deberá mantener a 10 kPa, para ello se actuará sobre la velocidad de rotación del compresor volumétrico.
- b) Nivel del generador. Para evitar que se anegue el separador de gotas del generador de baja, se controlará el nivel de éste mediante la bomba centrífuga que se halla en la parte inferior de dicho depósito. Es importante remarcar, que no es necesario realizar ningún tipo de control sobre el nivel de alta, ya que ambos generadores se hallan comunicados por vasos comunicantes, y la diferencia de alturas entre ambos generadores impide el rebosamiento de líquido en el generador de alta.
- c) Temperatura de operación de la caldera. A causa del manejo de soluciones con bajo contenido de refrigerante durante la operación en modo calefacción, es necesario mantener la temperatura de operación de la caldera constante a 150°C. Para una caldera de vapor de agua equivale a operar a una presión cercana a los 4 bar.
- d) Modulación de carga. Para regular la potencia térmica disipada en el absorbedor y en el condensador se instalará una sonda de temperatura a la salida del agua del condensador, la lectura de la cual se utilizará para regular el flujo de solución rica hacia el generador. Si la temperatura desciende respecto al valor de consigna, se incrementará el flujo de solución, mientras que en caso contrario se disminuirá dicho flujo

Es oportuno resaltar en este punto que las presiones de operación en el interior del prototipo vienen determinadas únicamente por las temperaturas de operación del evaporador y del condensador, y no se realiza ningún control sobre ellas. Por otra parte, durante la experimentación se constató la necesidad de un purgado continuo de solución en el evaporador para evitar la progresiva acumulación de absorbente en su interior.

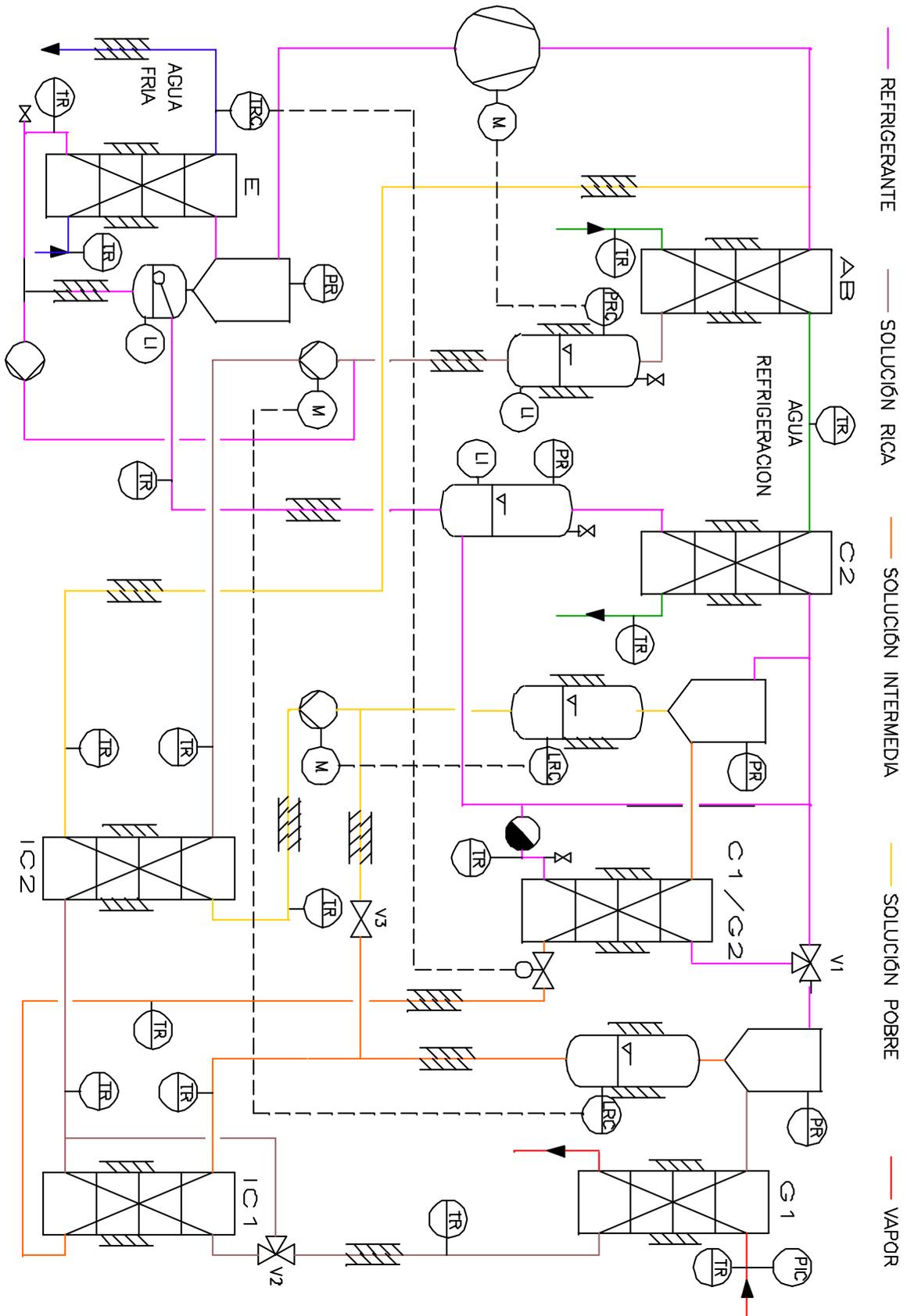


Fig.4. 2 Diagrama P&ID para la operación en modo refrigeración.

4.2.2 – Estrategia de control en modo refrigeración

A diferencia de la operación en modo calefacción, en modo refrigeración todos los componentes del prototipo se encuentran en funcionamiento, debido a la operación en la configuración de doble efecto. Para establecer dicha configuración se requiere operar las válvulas de forma inversa a la realizada para el simple efecto; es decir, la válvula de tres vías (V1) del separador del generador de alta debe direccionar el vapor de metanol hacia el condensador de alta (C1). Por otra parte, es necesario cerrar la válvula de comunicación (V3) entre los dos generadores, y la válvula de tres vías (V2) que se halla a la entrada del intercambiador de solución-solución IC1, se posicionará de tal forma que sólo permita el paso del flujo a través de este intercambiador. Una vez el equipo se encuentra disponible para operar en doble efecto, se requieren los siguientes lazos de control para una operación estable:

- a) Presión del absorbedor. La presión de operación del absorbedor durante la operación en modo refrigeración se mantendrá en 15 kPa, para ello se actuará sobre la velocidad de rotación del compresor volumétrico.
- b) Nivel del generador de alta. Para evitar que se anegue el separador de gotas del generador de alta, se controlará el nivel de éste mediante la bomba de solución rica que se halla en la parte inferior del absorbedor.
- c) Nivel del generador de baja. De manera análoga, se prevendrá el anegamiento del separador de gotas del generador de baja mediante el control del nivel de éste a través de la velocidad de giro de la bomba que se halla en la parte inferior de dicho depósito y que impulsa la de solución pobre hacia los pulverizadores del absorbedor.
- d) Temperatura de operación de la caldera. Desde el punto de vista de eficiencia energética es interesante durante la operación en modo refrigeración variar la consigna de la temperatura de operación de la caldera en función de la temperatura de entrada del agua de refrigeración al absorbedor. Este hecho es debido a la aparición de un mayor contenido de absorbente en la fase vapor al operar a alta temperatura, que repercute de forma significativa en el caudal de purga del evaporador. Así, en principio, cuando la temperatura del agua a la entrada del absorbedor es de 35°C, la temperatura del vapor debería rondar los 100°C, mientras que si la temperatura del agua es de 45°C, el vapor se debe incrementar a 150°C.
- e) Modulación de carga. Para regular la potencia térmica intercambiada en el evaporador se instalará una sonda de temperatura a la salida del agua de éste, la cual actuará sobre la válvula motorizada que se halla a la entrada del generador de baja. Así, si la temperatura de salida del evaporador es inferior al valor de consigna, se efectuará un cierre parcial del paso de dicha válvula, mientras que en caso contrario se procederá a la abertura de la válvula para permitir un mayor paso de flujo. Este aumento de flujo hacia el generador de baja, provoca una disminución del nivel del generador de alta con lo cual se produce una aceleración de la bomba de solución rica, y por otra, al llegar más flujo en el generador de baja, también incrementa de velocidad la bomba de impulsión hacia los pulverizadores del absorbedor, lo que facilita la absorción de vapores y consiguiendo en definitiva una mayor capacidad de refrigeración en el evaporador.

Tal y como se ha descrito, la regulación de los niveles de líquido a la salida de los generadores se realiza mediante el ajuste de la velocidad de rotación de las bombas de solución. El objetivo de la implementación de estos lazos de control es la obtención de una respuesta rápida ante cualquier alteración en los niveles y evitar el rebosamiento en los separadores de gotas. De esta forma, se puede reducir el tamaño de los depósitos de acumulación de solución instalados a la salida de los separadores de gotas, disminuir el contenido de refrigerante y de absorbente en el interior del prototipo, y por consiguiente una reducción de la inercia térmica del equipo. En cambio, como las variaciones de la demanda frigorífica suelen ser más o menos lentas, es posible realizar su regulación a partir de componentes con una constante de tiempo más elevada. Por este motivo, se ha optado por la regulación de la potencia frigorífica del prototipo mediante la válvula motorizada instalada a la entrada del generador de baja (G2). Esta válvula, a pesar que requiere unos 36 s para completar toda su abertura, es suficientemente rápida como para poder ajustar de manera satisfactoria dicha potencia frigorífica.

Finalmente, y al igual que en el caso de la operación en modo de bomba de calor, las presiones de operación del evaporador y del condensador de baja vienen determinadas únicamente por las temperaturas de operación del evaporador y del condensador, y no se realiza un control de ellas. Finalmente, durante la experimentación se constató la necesidad de un purgado continuo de solución en el evaporador para evitar la progresiva acumulación de absorbente en su interior. Dicho control se realizó siempre de forma manual, a causa de unos problemas de cavitación encontrados en la bomba de purga.

4.3 – Instrumentación

A partir de los lazos de control establecidos se determina la instrumentación requerida para el correcto funcionamiento del prototipo:

- a) Dos sondas de temperatura para medir la temperatura de salida del agua en el evaporador y la del condensador.
- b) Dos sondas de nivel, para obtener la lectura de los niveles a la salida de los generadores.
- c) Dos transmisores de presión absoluta que proporcionen la presión en el absorbedor y en el evaporador. Como se ha dicho anteriormente, la lectura del absorbedor se precisa para regular la velocidad de rotación del compresor, mientras que la lectura de la presión en el evaporador permite estimar el contenido de absorbente en su interior.
- d) Cuatro convertidores de frecuencia para ajustar la velocidad de rotación de los motores acoplados al compresor, a la bomba de purga del evaporador, y a las dos bombas de solución. Es conveniente, que los convertidores de frecuencia tengan la capacidad de poder realizar una regulación del tipo proporcional-integrativo.
- e) Dos reguladores del tipo PID. Uno ellos se requiere para la modulación de la carga frigorífica a través de la válvula motorizada y el otro para el control de la presión de operación de la caldera de vapor.

En los puntos anteriores, se indicaba la instrumentación mínima necesaria para la correcta operación del prototipo. No obstante, y para el análisis posterior de su funcionamiento se consideró oportuno incorporar un conjunto de instrumentación adicional con el fin de estimar el funcionamiento interno del equipo. Dicha instrumentación adicional esta compuesta por:

- a) Dos transmisores de presión absoluta que se instalarán en los separadores de gotas, con el fin de conocer la presión de operación del generador de alta y el de baja.
- b) Doce termopares de contacto con el fin de obtener la temperatura en los diferentes puntos de interés del prototipo. La localización de estas sondas de temperatura permite conocer la temperatura del metanol a la entrada del evaporador, a la salida del condensador de baja, la salida del condensador de alta, la temperatura de la solución intermedia a la salida del generador de alta, la temperatura de dicha solución a la salida del intercambiador de solución-solución, la temperatura de la solución pobre a la salida del generador de baja, la temperatura de dicha solución a la entrada del absorbedor, la temperatura de la solución rica a la salida del absorbedor, la temperatura de dicha solución en la conexión entre los dos intercambiadores de solución-solución, la temperatura de la solución rica a la entrada del generador de alta, la temperatura del vapor de agua a la entrada del generador, y por último la temperatura del agua de refrigeración en el tramo entre el absorbedor y el condensador.

Con la lectura de todas estas sondas de temperatura y de presión es factible establecer los balances de materia y energía en cada uno de los componentes del equipo, mediante la aplicación en tiempo real del procedimiento detallado en el anexo C, y cuyos resultados se muestran en el capítulo 6.

Finalmente es necesario destacar que el control automático de la modulación de la carga frigorífica no ha sido implementado a causa del mal funcionamiento del posicionador electrónico de la válvula motorizada, lo que obligó a un funcionamiento en manual. Por otra parte, para el control automático de la presión de operación de la caldera era preciso realizar unos cambios en la caldera, lo que resultaba ser poco aconsejable ya que se requería de una autorización previa del fabricante, y por tanto se optó, durante esta primera fase de experimentación, por un cambio de consigna manual.

4.4 – Esquema del cuadro eléctrico del prototipo

Una vez establecidos los lazos de control y la instrumentación requerida, el siguiente paso antes de la identificación de los componentes eléctricos del prototipo, es la determinación de la estrategia durante la fase de arranque y parada de dicho equipo.

Al observar detenidamente los diferentes lazos de control establecidos, el punto más trascendental es el mantenimiento de los niveles a la salida de los separadores de gotas de los generadores, para evitar rebosamientos de absorbente hacia el circuito de refrigerante. Por este motivo, si alguno de los convertidores de frecuencia que regulan dichos niveles de solución no se encuentra operativo, el otro convertidor obligatoriamente debe detener su funcionamiento. De forma análoga, si el convertidor de frecuencia del compresor no se halla operativo es ilógico poner en funcionamiento

las bombas de recirculación. Así pues, una primera consideración para el buen funcionamiento de todo el equipo es el chequeo continuo de la disponibilidad de cada uno de dichos convertidores, y en caso de detección de alguna anomalía el equipo debe parar obligatoriamente.

No se requiere un procedimiento especial durante la puesta en marcha del prototipo, aparte de la indicada anteriormente sobre los convertidores. Simplemente es preciso esperar a obtener una temperatura de caldera suficiente alta para poder iniciar la operación del todo el conjunto.

Debido a que dicho prototipo operará únicamente en un banco de ensayos, en el cual se monitorizan en continuo todas las variables medidas del equipo, no se ha considerado oportuno incluir un conjunto de sensores adicionales que permitan asegurar un correcto funcionamiento de la unidad ni los enclavamientos en caso de alarmas. Estos sensores adicionales podrían ser detectores de flujo en los circuitos de agua del evaporador y del absorbedor-condensador, con el fin de constatar el paso de agua por dichos circuitos durante la operación del equipo, o bien un mecanismo de seguridad que evite la puesta en marcha del equipo al detectar una entrada de aire en el interior del equipo. Otro punto importante, es la integración de señales procedentes de la caldera de vapor con el sistema control implementado en el prototipo.

En Fig. 4.3 se muestra el esquema del cuadro eléctrico implementado en el cuadro eléctrico. En él se puede observar como la alimentación trifásica a 380VAC y 50Hz, se conecta primeramente a un diferencial con una sensibilidad en la corriente de fugas de 30 mA. A la salida del diferencial se instala el interruptor principal del cuadro. Así, si el interruptor se halla en posición OFF, se produce una desconexión total de todos los componentes eléctricos del equipo, mientras que en la posición ON, se alimenta cada uno de los convertidores de frecuencia, los cuales se hallan ya preparados para arrancar.

El arranque del prototipo se efectúa mediante un pulsador que permite el cierre del relé K1M, y por lo tanto cada uno de los convertidores intenta arrancar. Si no se generan errores en los convertidores, el relé permanecerá excitado automáticamente a través de los relés SA de los diversos convertidores, y se inicia el proceso automático de control. En cambio, si se produce un error en cualquiera de los ellos, tan pronto como se deje de ejercer presión sobre el pulsador, el relé abrirá de nuevo los contactos al no recibir excitación alguna. En la tabla 4.1, se muestran los errores que se pueden generar en un convertidor que causan la abertura del relé formado por SC-SA y simultáneamente el cierre del relé SC-SB, y provoca el paro del prototipo.

OHF	Sobrecarga térmica del convertidor
OLF	Sobrecarga térmica del motor
OSF	Sobretensión de alimentación
USF	Tensión débil de entrada
ObF	Sobrecarga en frenado
OCF	Cortocircuito a la salida convertidor
DbF	Sobrecarga circuito de frenado
InF	Error interno
TnF	Error de autoajuste
EEF	Error interno

Tabla 4. 1 Errores que provocan el paro del prototipo.

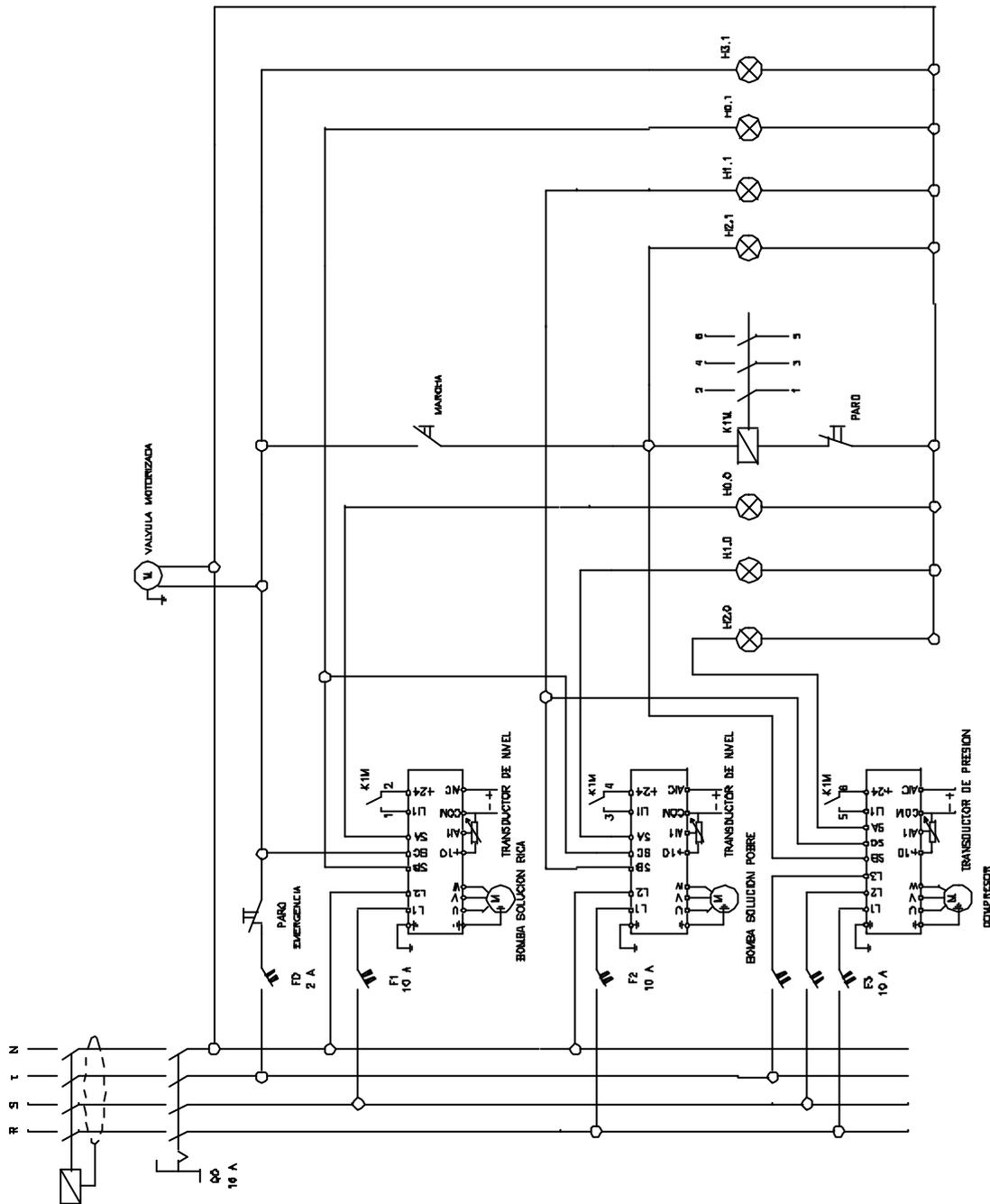


Fig.4. 3 Esquema del cuadro eléctrico del prototipo

Finalmente, sólo cabe indicar que tras la observación del estado de las luces durante el proceso de arranque, se puede conocer cual de los convertidores muestra alguna anomalía, la cual queda reflejada en el código de error del display que tiene cada uno de ellos.

4.5 – Comportamiento dinámico del equipo

En este punto no se trata de realizar un estudio exhaustivo del comportamiento dinámico del prototipo, ya que esta fuera del objetivo de la presente tesis. Simplemente, se considera oportuno incluir un conjunto de gráficos que muestren el comportamiento de los lazos de control establecidos.

4.5.1 – Comportamiento del control de los niveles.

Así pues, en Fig. 4.4 se muestra la evolución de los niveles durante la experimentación realizada en las siguientes condiciones de operación: temperatura de salida del agua en el evaporador 10°C, temperatura de entrada del agua en el absorbedor 35°C, y la temperatura del vapor de agua de la caldera a 130°C.

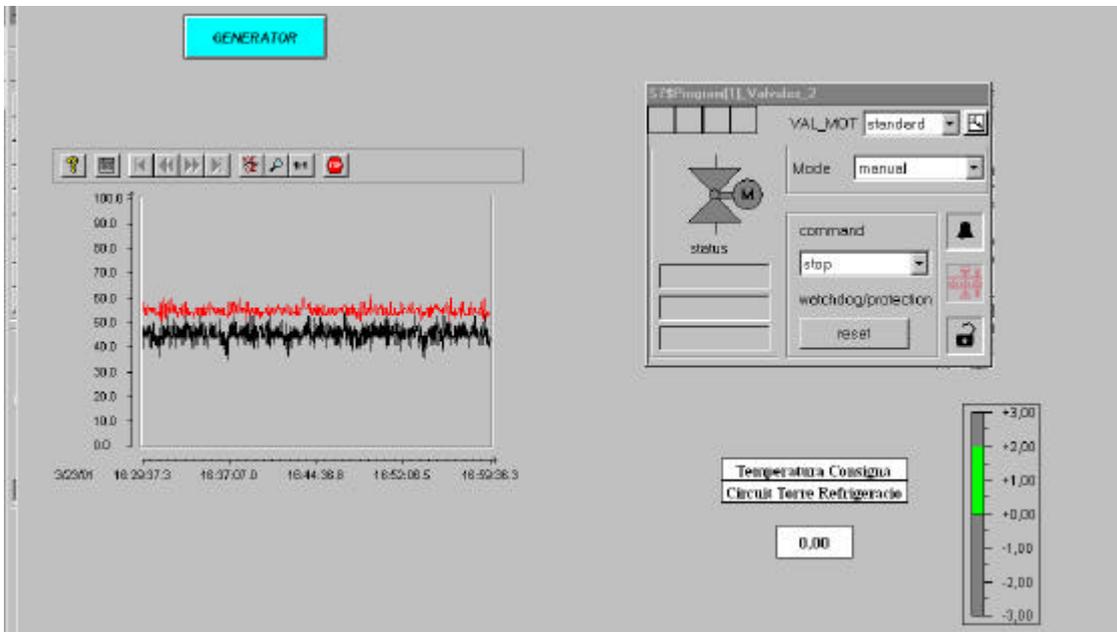


Fig.4.4 Comportamiento estable de los niveles en los generadores. El color rojo corresponde al generador de baja, y el color negro al generador de alta.

Como puede verse, el control en los niveles es francamente bueno, teniendo en cuenta además que no se dispone de depósito especial para ello, ya que es la misma tubería que realiza dicha función. Este buen control de los niveles facilita un comportamiento estable del resto de componentes, y desde el punto de vista energético facilita la aproximación a las condiciones de equilibrio en el proceso de separación y absorción.

No obstante, es preciso señalar que la evolución de dichos niveles no ha sido en todo los casos tan estable como la indicada en la anterior Fig. 4.4. Si bien que el comportamiento del nivel en el generador de baja ha sido muy regular en cualquiera de las condiciones de operación, el nivel del generador de alta se ha comportado de forma mucho más aleatoria. Como ejemplo de ello, en la Fig. 4.5, se presenta dicha la evolución de los niveles cuando las condiciones de operación exteriores corresponden a una temperatura

de salida del agua del evaporador de 10°C, una temperatura de entrada del agua en el absorbedor de 31.5°C y una temperatura del vapor de agua de 110°C.

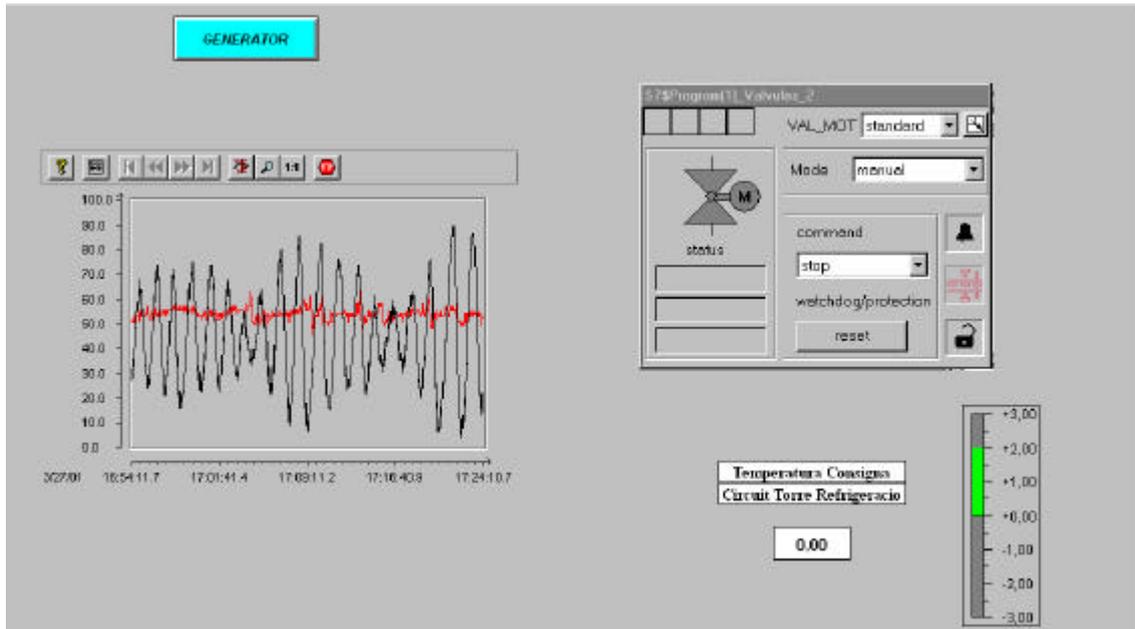


Fig.4. 5 Comportamiento poco estable de los niveles en los generadores. El color rojo corresponde al generador de baja, y el color negro al generador de alta.

Este comportamiento menos estable en el lazo de control del nivel en el generador de alta, se puede explicar por la no linealidad entre la velocidad de rotación de la bomba y su altura de impulsión, y entre la velocidad de rotación y el caudal trasvasado a través de ella. Aunque la no linealidad es común en ambas bombas, la principal diferencia del comportamiento observado se halla en la curva característica de cada uno de los dos circuitos. Así pues, para iniciar el proceso de trasvase de solución en el circuito de solución rica se precisa de una columna mínima de impulsión que corresponde a la diferencia de presiones entre el absorbedor y el generador de alta. Una vez la velocidad de rotación es suficiente para alcanzar esta altura mínima de impulsión, pequeños incrementos adicionales en dicha velocidad provocan variaciones importantes de caudal, ya que la pérdida de carga en los intercambiadores de solución-solución es pequeña. En cambio, en la bomba de solución pobre, no se requiere una columna de impulsión inicial para poder iniciar el trasvase de solución, y como la mayor pérdida de carga se produce en los pulverizadores, el resultado es una relación más uniforme entre caudal y velocidad de rotación de la bomba.

Con el fin de reducir al máximo las oscilaciones en el nivel del generador de alta, ha sido necesario limitar el rango de maniobra en frecuencia del convertidor en cuestión. Así, se limitó la frecuencia mínima de alimentación a 18 Hz, y el valor de la frecuencia máxima a 35 Hz, durante la operación en modo refrigeración. En modo calefacción, durante los ensayos realizados se constató un comportamiento estable del único control de nivel que se realiza.

Es importante resaltar en este punto, que este comportamiento poco estable del nivel del generador de alta, puede ser mejorado con el cambio de la bomba centrífuga por una de engranajes. Como es sabido, las bombas de engranajes presentan un comportamiento más lineal entre la velocidad de rotación de la bomba y el caudal trasvasado.

Debido a la diferencia de coste entre una bomba centrífuga y una de engranajes con prestaciones similares, se optó por la solución más económica y comprobar en este prototipo la viabilidad de dichas bombas. Además, los requerimientos en NSPH de las bombas de engranajes suele ser mayor que las centrífugas autoaspirantes, lo que implicaba la necesidad de una altura mayor del prototipo.

Finalmente, la Fig. 4.6 muestra la evolución de los niveles al variar el porcentaje de abertura de la válvula motorizada desde el 50.3% hasta el 55.6%, cuando el generador operaba a 170 kPa, el condensador a 37 kPa, y el absorbedor a 12 kPa. Como puede observarse, el tiempo de estabilización es francamente corto, y el grado de estabilización de los niveles tanto antes como después de dicha variación es similar a pesar que los caudales en circulación sean diferentes.

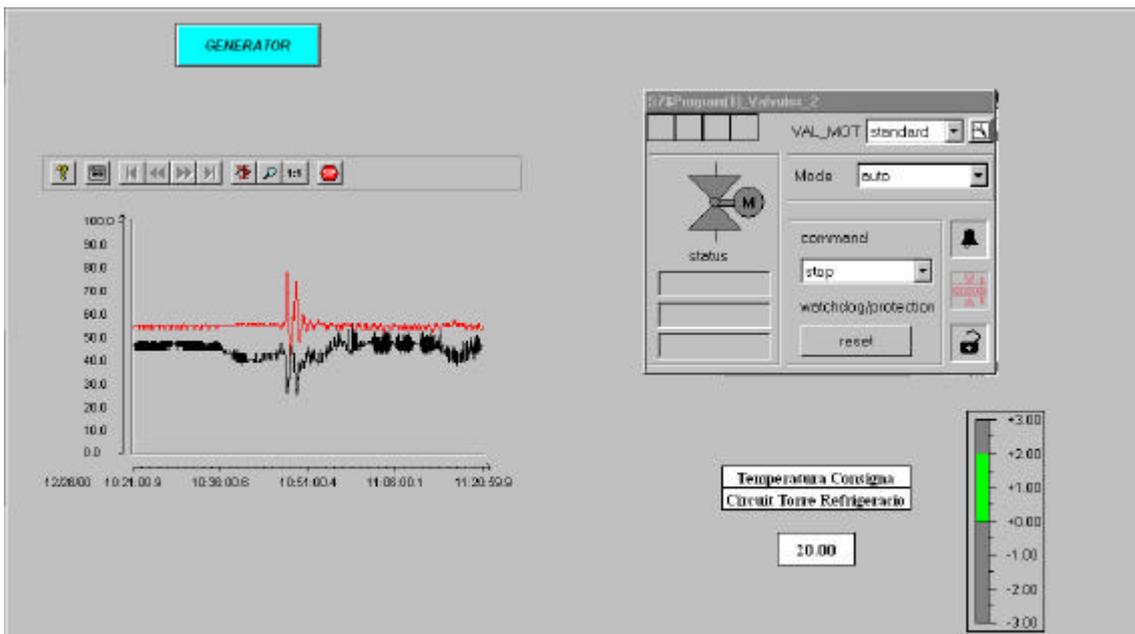


Fig.4.6 Evolución de los niveles al variar la abertura de la válvula motorizada desde el 50.3% al 55.6%.

4.5.2 – Comportamiento del prototipo ante perturbaciones exteriores

Al resultar defectuoso el posicionador electrónico de la válvula motorizada, no fue posible realizar estudios de la modulación de la carga frigorífica. No obstante, para validar el buen comportamiento de los lazos de control establecidos, se consideró oportuno provocar una perturbación simultánea en el circuito del agua en el evaporador y en el circuito de refrigeración del absorbedor/condensador. Con dichas variaciones, se pretende constatar si los cambios inducidos en las condiciones de operación en el evaporador, en el condensador y en el absorbedor provocan algún trastorno significativo que causan el colapso del equipo, o por el contrario, el sistema de control desarrollado es capaz de adaptarse de forma progresiva a las nuevas condiciones de operación.

En Fig. 4.7 se presenta la evolución de las temperaturas de entrada y salida del agua en el evaporador, cuando se efectúa a través del banco de ensayos un cambio en la temperatura de operación del agua a la salida del evaporador de 10°C a 8°C.

En dicho gráfico se observa un comportamiento estable de la máquina ante tal perturbación, además de constatar de forma gráfica la baja inercia térmica del sistema.

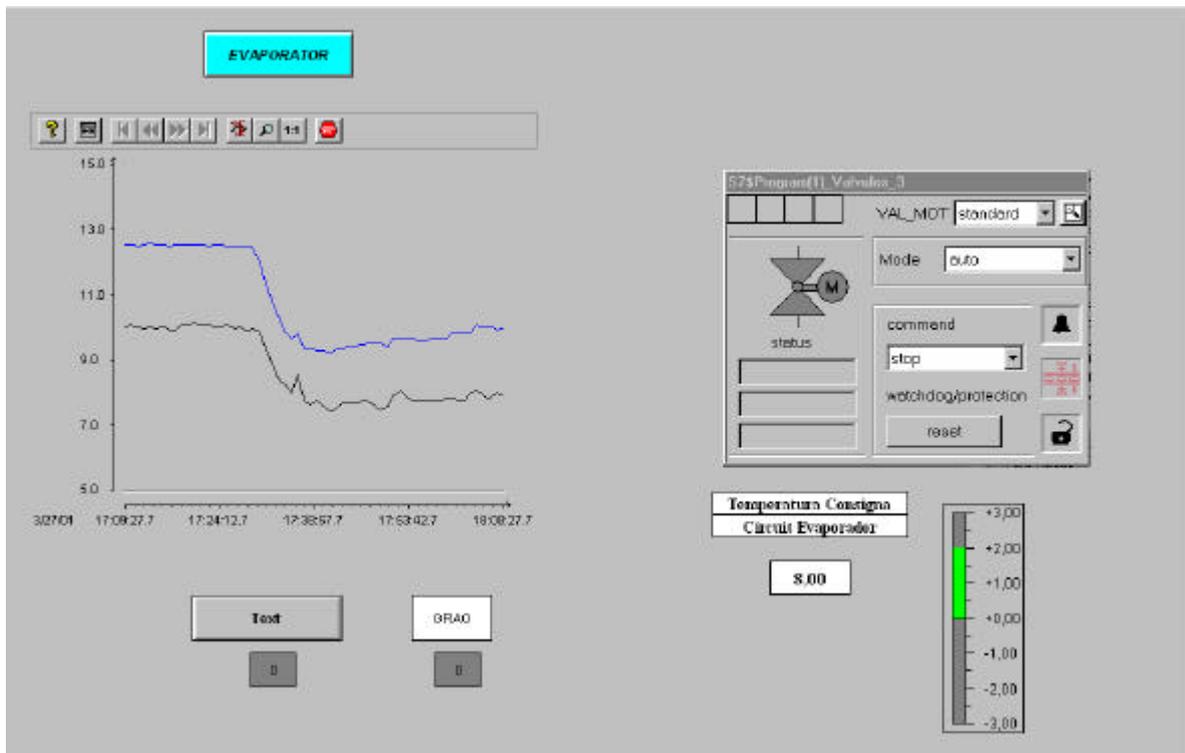


Fig.4.7 Evolución de las temperaturas del agua en el evaporador al provocar un cambio en la temperatura de operación del evaporador de 10°C a 8°C

De forma simultánea se provocó un cambio en la temperatura de entrada del agua en el absorbedor, al pasar de 31.5°C a 30°C. La evolución estable de las temperaturas de entrada y salida del agua de refrigeración del prototipo se muestran en Fig. 4.8.

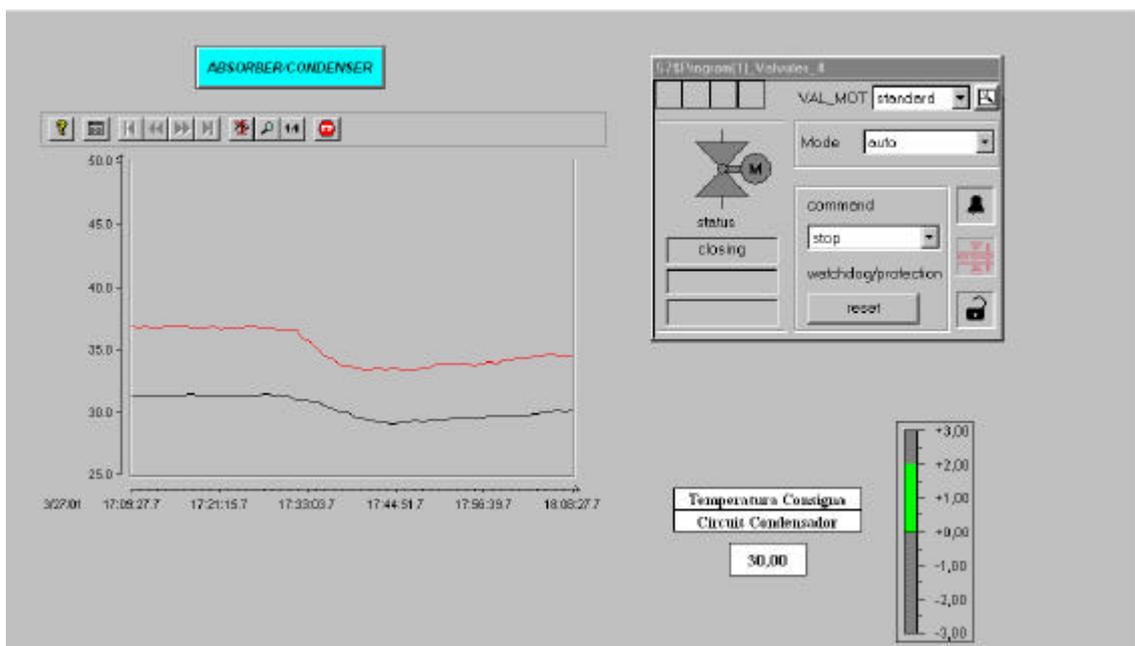


Fig.4.8 Evolución de las temperaturas del agua en el circuito del absorbedor condensador al provocar un cambio en la temperatura de operación de 31.5°C a 30°C.