

MODELADO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FRÍO CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Luis F. Acedo, Manuel G. Satué, Manuel R. Arahal,
Carlos Vivas, Manuel G. Ortega
{lacedo, mgarrido16, arahal, vivas, mortega}@us.es

Resumen

En este artículo se presenta el modelado de un sistema de abastecimiento de energía frigorífica basado en enfriadoras de agua refrigeradas por aire, al que se le ha añadido un sistema de almacenamiento de energía. Con ello se pretende satisfacer la demanda de frío de una gran instalación. El modelado de cada uno de los elementos se ha integrado en Simscape a fin de poder simular la planta completa. En el simulador se ha supuesto el sistema controlado a bajo nivel, de tal manera que es capaz de recibir consignas de caudales desde un optimizador a un nivel jerárquicamente superior. Finalmente, se ha propuesto un problema de optimización mixto no lineal con variables enteras asociadas al funcionamiento de partes de la instalación, de forma que se optimice el coste económico de la generación del frío; y se han presentado resultados de simulación que avalan el buen funcionamiento del optimizador.

Palabras clave: Eficiencia energética, optimización, sistemas de refrigeración.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas aplicaciones requieren refrigeración, ya sea a escala industrial como mercados, fábricas de procesamiento de alimentos, etc. o para edificios de diferentes tipos como hospitales, oficinas, etc. En la actualidad, el consumo de energía eléctrica debido a la demanda de refrigeración en los edificios representa el 10 % del consumo mundial y el 20 % del consumo total de los edificios (40 % en los países desarrollados) según la Agencia Internacional de la Energía [1]. La demanda y la capacidad de refrigeración instalada continuará creciendo a medida que los países de economía emergente progresen. Sin embargo, esta creciente demanda de energía tendrá un gran impacto en el efecto invernadero y el calentamiento global. Por tanto, es de gran importancia mejorar el rendimiento de las grandes instalaciones de producción.

Las máquinas refrigeradoras de agua, o simplemente enfriadoras, son grandes máquinas que pro-

ducen agua enfriada para distribuirla a lo largo de un edificio o red de refrigeración a través de tuberías con el objetivo de enfriar el aire dentro de los edificios. Las enfriadoras pueden utilizar electricidad, gas o energía solar. La eficiencia de las enfriadoras depende del punto de funcionamiento y se expresa generalmente como una cifra asociada al mérito, como por ejemplo el coeficiente de rendimiento (COP, *coefficient of performance*) o el ratio de eficiencia energética (EER, *energy efficiency ratio*). En los sistemas en los que el agua fría alimenta las unidades de refrigeración de la instalación es habitual que más de una máquina de refrigeración se utilice en paralelo. El funcionamiento óptimo requiere una gestión en función de la demanda instantánea de refrigeración, pero en muchos casos esta gestión es semiautomática, utilizando referencias y regímenes de funcionamiento fijos. Además, la planificación es fija o inexistente, lo que va en detrimento de la eficiencia tanto de la potencia instalada como de los costes de funcionamiento. En esta situación, la automatización puede aportar políticas óptimas que produzcan ahorros económicos y beneficios para el medio ambiente.

En la literatura existen trabajos relacionados con el control y la optimización de enfriadoras e instalaciones. Bálint et al. [2] presentan un algoritmo de planificación para una única máquina enfriadora basado en un modelo predictivo de minimización del coste eléctrico que opera con un día de antelación en el mercado. Medoza-Serrano et al. [3] analizan el impacto de varios métodos de predicción y evalúan un controlador predictivo económico basado en modelo (MPC) para el sistema de climatización de un único edificio. Este trabajo también incluye almacenamiento de energía (TES, *thermal energy storage*) en el planteamiento del problema. Arahal et al. [4] han estudiado el problema de la predicción de la demanda de las máquinas enfriadoras utilizando redes hiper-gaussianas.

Este artículo se centra en el modelado, el control y la optimización de la gestión de una planta de producción de frío para una instalación que requiere una alta potencia térmica. El modelo se ha implementado utilizando el entorno de simulación

Simscape de MATLAB y contempla tres máquinas enfriadoras funcionando en paralelo, una carga térmica que simula la demanda de un edificio (hospital), un sistema de almacenamiento de energía y un *bypass* entre la entrada y la salida de la corriente de agua que enfrían las máquinas. Se han tenido en cuenta los siguientes factores: la carga térmica puede cambiar en función del uso del edificio y de la climatología, la eficiencia de las enfriadoras, COP, difiere de un punto de funcionamiento a otro en función de la carga y de las condiciones ambientales, y por último el precio de la electricidad puede fluctuar a lo largo del día. La función del TES en principio es reducir el coste eléctrico del funcionamiento del sistema de enfriamiento, pero en ciertas situaciones ambientales podría llegar a reducir la energía consumida por las máquinas enfriadoras a lo largo de un ciclo. Para obtener una planificación óptima que minimice el coste eléctrico se ha utilizado un algoritmo genético de codificación real junto con un modelo estático del sistema. La función de coste evalúa el coste de la electricidad consumida durante un horizonte temporal deslizante de predicción, teniendo en cuenta además ciertas restricciones de funcionamiento de las enfriadoras.

La organización del resto del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presentan las características de la planta, incluyendo el sistema de generación de agua fría, el sistema de almacenamiento térmico, y la carga de frío. En la Sección 3 se presenta el modelado de cada una de los componentes del sistema. Seguidamente, en la Sección 4 se hace referencia al control de bajo nivel, mientras que en la Sección 5 se utiliza el sistema controlado para realizar una optimización a un nivel jerárquicamente superior. En la Sección 6 se presentan algunos resultados de simulación, y finalmente, las principales conclusiones y trabajos futuros se exponen en la Sección 7.

2. SISTEMA

El sistema a tratar en este trabajo (véase la Figura 1) consta de tres elementos principales: un sistema de producción de frío, una carga térmica a satisfacer (edificio) y un sistema de almacenamiento de energía o TES.

El *sistema de producción de frío* está compuesto por tres enfriadoras correspondientes a los modelos RTAC 400, 300 y 250 del fabricante TRANE. Se trata de enfriadoras de agua refrigeradas por aire (véase la Figura 2). Estos modelos tienen una potencia nominal aproximada de 1400, 1060 y 834 kW térmicos de enfriamiento a plena carga respectivamente. En estas condiciones tienen un COP de 2.8 (incluyendo la potencia eléctrica de los com-

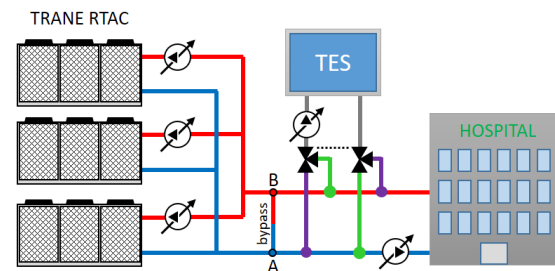


Figura 1: Diagrama de la planta. En color verde se representa la configuración de tuberías para la descarga del TES y en color morado para la carga.

presores, ventiladores y sistemas de control). Funcionando a una carga parcial del 25 % el COP de las máquinas aumenta respectivamente a 5.8, 5.33 y 6.06. El controlador de estas máquinas permite mantener la temperatura de salida del agua enfriada en la referencia especificada, siendo [5, 9] °C el rango de temperatura en funcionamiento nominal. El caudal de agua que atraviesa cada máquina se regula mediante sendas bombas externas de caudal variable.



Figura 2: Enfriadora TRANE de la serie RTAC.

La *carga de la planta de enfriamiento* la impone un hospital. Dicha carga varía en función del nivel de ocupación del edificio, de las condiciones climáticas en el exterior, etc. La función del *bypass* (véase Figura 1) es permitir adaptar el rango de caudales que puede demandar el hospital y el rango de caudales en el que pueden funcionar las enfriadoras en los casos en los que no sean compatibles.

El *sistema de almacenamiento de energía* consiste en un tanque que contiene agua con un volumen constante e igual a 1000 m³. Para conmutar el modo de funcionamiento del TES entre carga y descarga se utilizan dos válvulas de tres vías que permiten cambiar el punto de aspiración de la bomba de este sistema de almacenamiento, junto con el punto de vertido, según se ejemplifica en el diagrama de la Figura 1. En el caso de descarga, el agua fría del TES se vierte en la línea de agua enfriada procedente de las enfriadoras, mientras que el agua caliente procedente de la salida de la demanda se impulsa hacia el tanque. En el caso

de carga se procede a la inversa.

3. MODELADO

El modelado del sistema se basa en el desarrollo de submodelos para cada uno de los componentes de la planta de producción de frío, en el entorno de simulación Simscape de Simulink. A continuación, se detalla la estrategia utilizada.

3.1. MODELO DE LAS ENFRIADORAS

Las enfriadoras no se han modelado con ecuaciones que describan el ciclo refrigeración, sino que el modelo se basa en los datos de funcionamiento que proporciona el fabricante. Concretamente, éste proporciona la potencia térmica de enfriamiento y el COP tanto a plena carga como a cargas parciales para varias combinaciones de la temperatura del agua a la salida del evaporador y la temperatura del aire a la entrada del condensador para cada modelo de máquina. El modelo interpola el valor del COP a partir de los datos del fabricante en función de la temperatura del agua a la salida del evaporador, la temperatura del aire a la entrada del condensador y el ratio de carga de la máquina o PLR (*part load ratio*). Con el valor obtenido del COP y la potencia térmica de enfriamiento se calcula la potencia eléctrica que consume la máquina.

Debido a las características explicadas del modelo de la máquina enfriadora, éste se ha implementado utilizando un bloque *MATLAB Function* y no en lenguaje Simscape.

Las entradas del modelo de una máquina son: la temperatura del agua en el punto B del *bypass*, la temperatura de referencia del agua a la salida del evaporador, el caudal másico de agua que circula por el evaporador y la temperatura ambiente. Como salidas proporciona el COP, la potencia eléctrica consumida y la potencia térmica de refrigeración.

La conexión en paralelo de las enfriadoras se realiza con otra *MATLAB Function* que recibe como entradas las temperaturas de salida de cada máquina junto con los caudales másicos correspondientes y a la salida proporciona la temperatura del agua de mezcla de las tres máquinas junto con el caudal total de agua enfriada (véase la Figura 3).

Las variables de salida del bloque que modela las enfriadoras son la temperatura de mezcla del agua refrigerada T_m y caudal másico total \dot{m}_T . Estas variables se calculan según se indica en las ecuaciones (1) y (2):

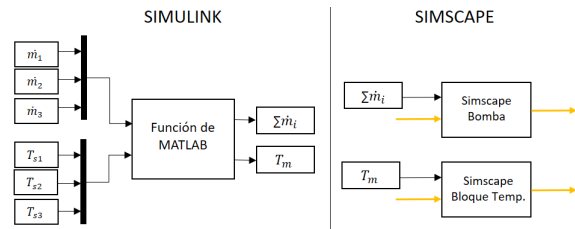


Figura 3: Conexión de las variables en Simscape.

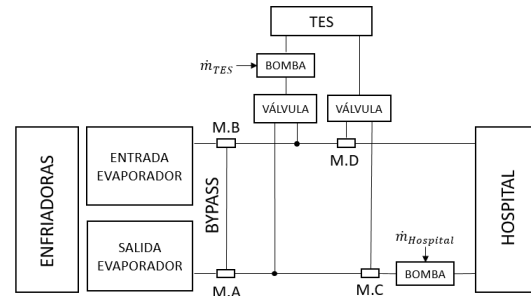


Figura 4: Diagrama de bloques sistema en Simscape.

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^3 \dot{m}_i \cdot T_{s_i}}{\dot{m}_T} \tag{1}$$

$$\dot{m}_T = \sum_{i=1}^3 \dot{m}_i, \quad i = 1, 2, 3 \tag{2}$$

donde T_{s_i} y \dot{m}_i son la temperatura de salida del agua enfriada y el caudal másico [kg/s] que circula por la enfriadora i -ésima.

Para que estas variables puedan ser conectadas al resto del modelo en Simscape, tal como se describe en la Figura 3, se han modelado dos bloques: un bloque de temperatura y una bomba.

3.2. MODELO DEL BLOQUE DE TEMPERATURA

El modelo del bloque de temperatura consiste en un depósito infinito a presión constante y temperatura variable. Conecta la variable T_m de salida de las enfriadoras con el sistema a través de un puerto de señal física (en terminología Simscape) con la que se establece la temperatura del depósito.

3.3. MODELO DE LA BOMBA

El modelo de la bomba consiste en una fuente de energía mecánica ideal, donde el caudal másico se controla por una señal física de entrada. Mantiene el caudal especificado independientemente del di-

ferencial de presión, no hay resistencia al flujo ni intercambio de calor con el entorno.

No sólo permite conectar la variable de salida de las enfriadoras \dot{m}_T en el sistema, además se utiliza para introducir el perfil de caudal másico en el TES, \dot{m}_{TES} , y en el hospital (o carga), \dot{m}_C .

3.4. MODELO DEL BYPASS

El *bypass* representa una conexión entre la corriente de agua enfriada por las enfriadoras y la corriente de agua caliente procedente del hospital. Se permite un flujo de caudal entre ellas en ambas direcciones, según lo requiera el sistema para cumplir con el balance de conservación de masa.

El modelo del *bypass* consiste en dos bloques de mezcla, M.A y M.B en la Figura 4, donde cada uno de estos bloques establece un balance de masa [kg/s] y energía, ϕ [kW], entre sus puertos de entrada/salida A, B y C según las ecuaciones (3) y (4).

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B + \dot{m}_C = 0 \quad (3)$$

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0 \quad (4)$$

3.5. MODELO DEL SUBSISTEMA TES

Para la inclusión en el simulador del subsistema de almacenamiento de energía (TES) es necesario modelar, no solo el propio TES, sino también los elementos necesarios para la carga y descarga del mismo, esto es, una bomba y una válvula de tres vías.

3.5.1. Bomba

Como se indicó en la sección 3.3, la bomba permite aspirar el perfil de caudal de carga del TES, \dot{m}_{TES} , procedente de la corriente de agua enfriada por las enfriadoras o de la corriente de agua caliente procedente del hospital, según la dirección que indique la válvula de tres vías.

3.5.2. Válvula de tres vías

Para realizar de manera simultánea el funcionamiento del TES entre carga y descarga, es necesario una válvula de dirección de tres vías que, a través de una señal física, desvía el flujo de agua en una dirección u otra.

3.5.3. Tanque de almacenamiento

El modelo se basa en la acumulación de masa y energía en un depósito que contiene un volumen constante de agua. El depósito presenta un puerto de entrada y otro de salida, a través de los cuales

fluye el agua. La masa de agua varía con la densidad, propiedad que es función de la presión y la temperatura.

Se supone una resistencia al flujo despreciable entre la entrada y el interior. Por lo tanto, la presión en el interior es igual a la presión en la entrada.

Balance de masa

El volumen de la cámara es fijo, pero la compresibilidad del fluido nos dice que su masa puede cambiar con la presión y la temperatura. La acumulación de masa en el depósito debe ser igual al caudal que atraviesa los puertos de entrada y salida:

$$\left(\frac{1}{\beta} \frac{dp}{dt} - \alpha \frac{dT}{dt} \right) \rho V = \dot{m}_A + \dot{m}_B \quad (5)$$

donde el término de la izquierda es la tasa de acumulación de masa, y:

- p es la presión [MPa],
- T es la temperatura [K],
- β es la constante isotérmica [MPa],
- α es el coeficiente de expansión térmica [K⁻¹],
- \dot{m}_A es el caudal másico [kg/s].

Balance de energía

La tasa de acumulación de energía en el volumen de fluido deberá ser igual a la suma de los caudales de energía en los puertos de entrada y salida:

$$\left[\left(\frac{h}{\beta} - \frac{T\alpha}{\rho} \right) \frac{dp}{dt} + (C_p - h\alpha) \frac{dT}{dt} \right] \rho V = \phi_A + \phi_B \quad (6)$$

Donde el término de la izquierda es la tasa de acumulación de energía, y:

- h es la entalpía [kJ/kg],
- ρ es la densidad [kg/m³],
- C_p es el calor específico [kJ/kg · K],
- V es el volumen del depósito [m³],
- ϕ es el caudal de energía [kW].

3.6. MODELO DEL HOSPITAL

El modelado del bloque de carga se realiza mediante un modelo tipo *caja negra*. Para ello, se utiliza una conducción (tubería) por la que circula el agua y, además, por donde intercambia calor con el entorno.

Por tanto, al hospital llega un caudal de carga, \dot{m}_C , determinado por una bomba. En el momento en que el agua circula por la tubería, esta permite el intercambio de calor con el entorno, a través de un puerto térmico. Los perfiles de carga del

hospital se programan para que sean variables con el tiempo, y se conectan con el bloque a través de una señal física.

4. CONTROL DE BAJO NIVEL

Para la gestión del sistema es necesario manipular adecuadamente las diferentes bombas y válvulas a fin de controlar los caudales que circulan por las distintas tuberías del sistema; para lo cual se supone que se dispone de los elementos de medida (caudalímetros) necesarios.

Este control suele ser relativamente rápido (dinámica en bucle cerrado del orden de pocas decenas de segundos) comparado con el tiempo de muestreo en el que se va a ejecutar la optimización del sistema (del orden de una hora), el cual proporcionará consignas de caudales a este control de bajo nivel.

Por tanto, teniendo en cuenta la jerarquización y las distintas escalas de tiempo del optimizador y de este nivel de control, en el simulador se ha considerado que el sistema ya está controlado a este nivel. Esto evitará simular dinámicas rápidas que no afectan significativamente al resultado de la optimización, y que sin embargo ralentizarían significativamente la ejecución de las simulaciones.

5. OPTIMIZACIÓN

Esta capa de control se encarga de enviar referencias a los controladores de bajo nivel que accionan las bombas de las enfriadoras, la bomba y válvulas que gobiernan el TES, y la bomba que impulsa el agua enfriada por el circuito del edificio. Para ello utiliza un modelo matemático estático de la planta, el cual se simula en una ventana de tiempo deslizante asociada al horizonte de predicción, N_p , para obtener un coste económico asociado al consumo eléctrico de las máquinas en la ventana de tiempo actual.

El problema consiste en decidir para cada periodo de tiempo en el que se divide el horizonte de predicción, por ejemplo 24 horas con intervalos de una hora, el punto de trabajo de cada una de las enfriadoras de la planta, así como del TES y la carga. El punto de trabajo está definido por las referencias de temperatura a la salida del evaporador de cada máquina, T_{s_i} , los respectivos caudales másicos, \dot{m}_i , tres *variables binarias* que indican si las máquinas están encendidas o apagadas, el caudal másico que circula por la carga, \dot{m}_C , y por el TES y *otras dos variables binarias* que indican si el TES está funcionando y el modo en el que está funcionando (carga o descarga). El objetivo es *proporcionar la potencia de enfriamiento*

suficiente para cubrir la demanda con el mínimo coste de electricidad posible, puesto que se considera una tarifa eléctrica variable con la hora del día. Es necesario además contar con predicciones de la demanda de potencia de refrigeración y de la temperatura ambiente en el horizonte de predicción.

El optimizador, en principio, solo considera el consumo eléctrico de las máquinas enfriadoras. El coste económico será el producto de la potencia total consumida por las máquinas, P , multiplicado por la tarifa correspondiente, Tar , según la siguiente ecuación:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{N_p} \left(\sum_{j=1}^3 P_k \cdot Tar_k \right) \quad (7)$$

Con las definiciones dadas, el problema de optimización se puede definir de forma matemática como:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & J(\mathbf{x}) \\ \text{s.a.} \quad & x_i \leq \mathbf{x} \leq x_s \\ & \dot{Q}(\mathbf{x}) = \dot{Q}_L \end{aligned} \quad (8)$$

donde la variable independiente \mathbf{x} es un vector que contiene las trayectorias desde $k = 1$ hasta $k = N_p$ que definen el punto de trabajo del sistema dado por (9).

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = [& \dot{m}_C|_1^{N_p}, \dot{m}_{TES}|_1^{N_p}, \dot{m}_1|_1^{N_p}, \dot{m}_2|_1^{N_p}, \dot{m}_3|_1^{N_p}, \\ & T_{s_1}|_1^{N_p}, T_{s_2}|_1^{N_p}, T_{s_3}|_1^{N_p}, Eon_1|_1^{N_p}, Eon_2|_1^{N_p}, \\ & Eon_3|_1^{N_p}, TESon|_1^{N_p}, TES_{desc}|_1^{N_p}] \end{aligned} \quad (9)$$

En la definición del problema de optimización se han utilizado las siguientes restricciones:

- $x_i \leq \mathbf{x} \leq x_s$, para limitar las variables independientes a los límites físicos impuestos por la planta, como los caudales mínimos y máximos que pueden circular por las enfriadoras, la temperatura mínima y máxima del agua a la salida del evaporador, etc.
- $\dot{Q}(\mathbf{x}) = \dot{Q}_L$, para obligar a que la demanda sea satisfecha en cada periodo en que se divide el horizonte de predicción.

Además se han considerado otras restricciones *suaves* en la función de coste:

- se penaliza que la temperatura del agua de entrada al evaporador de una enfriadora sea menor que la temperatura de salida.

- se penaliza que no circule caudal por ninguna de las máquinas.
- se penaliza que la temperatura del TES supere un cierto valor.
- se penaliza que el salto de temperatura entre la entrada y la salida del evaporador de cada máquina salga de un cierto rango preestablecido.

Estas penalizaciones consisten en la adición de un coste extra que aumenta exponencialmente cuanto más se infrinja la restricción asociada.

Por la naturaleza de este problema de optimización (un número elevado variables de decisión, existencia probable de mínimos locales, no disponer del Jacobiano del sistema e incluir variables de decisión binarias) se ha seleccionado un algoritmo genético de codificación real [5] para resolver el problema. El algoritmo utiliza el operador de cruce *BLX-alpha* [6] y selección por torneo.

6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A fin de mostrar la eficacia del proceso de optimización propuesto, en esta sección se presentan algunos resultados de simulación.

Para el diseño del experimento se han considerado tres días consecutivos con un perfil de carga similar. En la Figura 5 se muestra la carga frigorífica demandada por el edificio, junto a las cargas proporcionadas por el conjunto de enfriadoras así como por el TES. Las potencias negativas del TES significan que éste se está cargando, y las positivas que se está descargando.

Para el proceso de optimización se han establecido tres tramos de tarifas eléctricas: un tramo *valle* (en azul), otro *punta* (en rojo); y un tercero *llano* (en verde). Se ha utilizado una ponderación económica simulada en las tarifas con un ratio de 2 a 1 del tramo llano respecto al valle, y de 5 a 1 del tramo punta respecto al valle.

De los resultados cabe destacar como el optimizador claramente hace uso de la descarga del TES en los tramos punta, mientras que aprovecha los tramos llanos y valles para volverlo a cargar.

Finalmente, como puede observarse del balance de potencias, la carga proporcionada por las enfriadoras y el TES es idéntica a la carga demandada por el edificio, por lo que se consigue satisfacer dicha demanda.

En la Figura 6 se muestran los perfiles de temperatura de los distintos puntos del sistema, además de

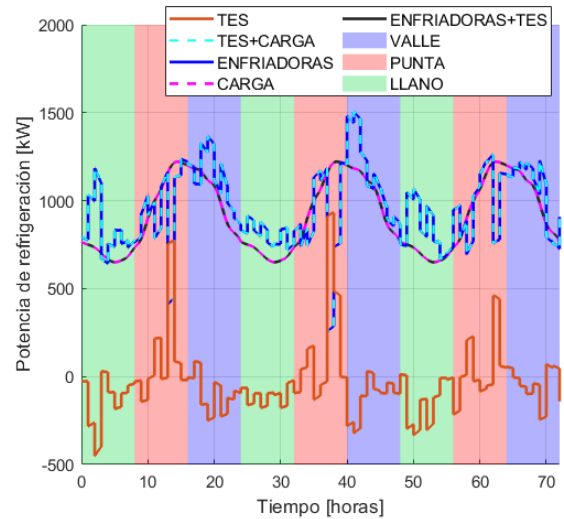


Figura 5: Potencia de refrigeración de las enfriadoras.

mostrar la temperatura ambiente simulada (días calurosos de verano con temperatura máximas del orden de 40 °C).

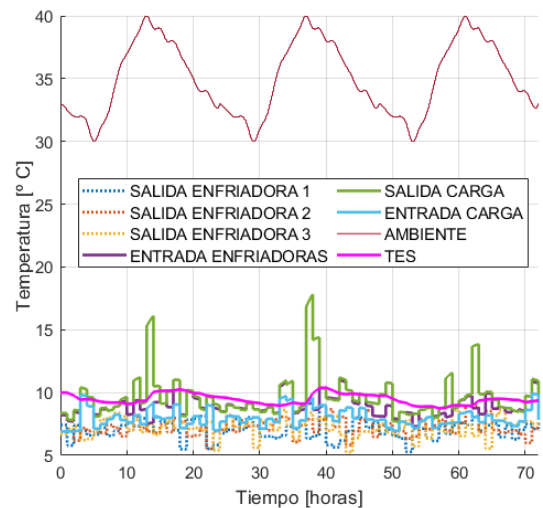


Figura 6: Temperaturas.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el modelado, control y optimización de un sistema de abastecimiento de energía frigorífica para atender a la demanda de frío de una gran instalación (como puede ser un hospital), a la cual se le ha añadido un sistema de almacenamiento de energía térmica (TES).

Para la simulación del sistema se ha utilizado la herramienta Simscape bajo MATLAB, que permite la fácil interconexión de distintos elementos del

sistema. Si bien, la mayor parte de estos elementos se han tenido que implementar utilizando *Matlab functions* al tener que incorporar características no incluidas en las bibliotecas habituales de Simscape.

El simulador se ha implementado suponiendo cerrado el control de bajo nivel, de tal manera que el simulador recibe principalmente consignas de caudales. Se supone que la dinámica en bucle cerrado de este control es suficientemente rápida como para no verse afectada por el tiempo de muestreo del optimizador, que está a un nivel jerárquicamente superior.

Se ha propuesto un problema de optimización mixto no lineal con variables enteras (asociadas al funcionamiento o no de partes del sistema), donde se pretende optimizar el coste económico de la generación de la carga frigorífica atendiendo a distintas tarifas eléctricas a lo largo del día. La optimización se ha resuelto utilizando algoritmos genéticos basados en el operador de cruce *BLX-alpha* y selección por torneo.

Finalmente, se han presentado resultados de simulación que muestran la eficacia del algoritmo propuesto, no solo satisfaciendo la carga frigorífica demandada, sino también descargando el TES en tramos de alto precio de la energía eléctrica y volviéndolo cargar en tramos donde ésta es más barata.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada como Proyecto RTI2018-101897-B-I00 por FEDER / Ministerio de Ciencia e Innovación – Agencia Estatal de Investigación.

English summary

MODELLING, CONTROL AND OPTIMIZATION OF A COOLING PLANT WITH A THERMAL STORAGE SYSTEM

Abstract

This article presents the modeling of a refrigeration energy supply system based on air-cooled water chillers, to which an energy storage system (TES) has been added. This is to satisfy the cold demand of a large installation. The modeling of each of the elements has been integrated into Simscape in order to be able to simulate the complete plant. In the simulator, the low-level controlled system has been assumed,

in such a way that it is capable of receiving flow references from an optimizer at a hierarchically higher level. Finally, a non-linear mixed optimization problem has been proposed with integer variables associated with the operation of parts of the installation, in such a way that the economic cost of cold generation is optimized; and simulation results have been presented that support the good performance of the optimizer.

Keywords: Energy efficiency, optimization, cooling plants.

Referencias

- [1] IEA (2018), The Future of Cooling, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [2] Bálint, R., Fodor, A., Hnagos, K.M., Magyar, A., (2018) Cost-optimal model predictive scheduling of freezers, Control Engineering Practice (80), pp. 61-69.
- [3] Mendoza-Serrano, D.I., Chmielewski, D.J., (2014) Smart grid coordination in building HVAC systems: EMPC and the impact of forecasting, Journal of Process Control (24), pp. 1301-1310.
- [4] Arahál, M.R., Ortega, M.G., Satué, M.G., (2021) Chiller Load Forecasting Using Hyper-Gaussian Nets, Energies, 14, 3479.
- [5] Herrera, F., Lozano, M., Sánchez, A. M. (2007). Algoritmos Genéticos con Codificación Real: Operadores de Cruce Híbridos Basados en Entornos con Múltiples Descendientes, Actas del Congreso MAEB, Vol. 7, pp. 827-834.
- [6] Herrera, F., Lozano, M., Pérez, E., Sánchez, A. M., Villar, P. (2002). Multiple crossover per couple with selection of the two best offspring: an experimental study with the BLX- α crossover operator..., Advances in Artificial Intelligence—IBERAMIA, pp. 392-401.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).