OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO APLICADA AL CONTROL DE TEMPERATURA EN UNA PLANTA DE REFRIGERACIÓN SOLAR

D. Zambrano
Universidad de Los Andes, darine@cartuja.us.es

E. F. Camacho
Departamento de Ingenieria de Sistemas y Automatica.
Escuela Superior de Ingenieros, 41092-Sevilla, eduardo@cartuja.us.es

Resumen

En este artículo se presenta la aplicación de un algoritmo de optimización con múltiples objetivos a una planta de refrigeración con energía solar. El algoritmo de optimización es usado para seleccionar el modo de funcionamiento óptimo de la planta, tomando en consideración las condiciones ambientales. Se entiende por considera funcionamiento óptimo, la configuración de la planta que satisfaga los objetivos económicos y de control establecidos.

Palabras clave: Optimización, multiples objetivos, variables lógicas, planta solar .

1 Introducción

En una planta de refrigeración solar con energía solar, al igual que en la mayoría de los procesos reales, se requiere satisfacer más de un objetivo, dichos objetivos pueden ser de tipo económicos, de control de variables del proceso, y, de seguridad, y estos a su vez pueden presentar distintas prioridades, por lo que resulta apropiado aplicar un algoritmo de optimización con múltiples objetivos en el que se puedan establecer prioridades a los mismos, al igual que restricciones en las variables manipuladas. Las restricciones pueden ser duras o suaves, las restricciones duras no pueden ser violadas, bien sea por limitaciones físicas de los elementos finales de control o por razones de seguridad, y las suaves, se deben tratar de satisfacer antes de ser violadas.
Se pueden citar algunas referencias en donde se hace uso de algoritmos de optimización multiobjetivo. En [3] es formulada una herramienta de optimización multiobjetivos, para el control de filtros de empaque. Con la idea de incorporar el factor economico, un algoritmo multiobjetivo basado en MPC es formulado. Para obtener una solución global del MPC (Model Predictive Control), el modelo es aproximado a un modelo ARX. En [5], realizan el control de una unidad FCC (Fluid Catalytic Cracking). Usan la técnicas de MPC porque permite el manejo de restricciones en las entradas y salidas del proceso. Presenta un algoritmo de control multivariable multiobjetivo con restricciones. Hacen uso de una matriz de prioridad, en donde almacenan el conocimiento adquirido por los operadores, para la elección de los pares de variables manipuladas y controladas, de manera que seleccionan la variable manipulada que tenga mayor prioridad sobre determinada variable controlada. En [4] se hace uso de variables lógicas en restricciones lineales, y para la priorización de multiples objetivos. Al incorporar variables lógicas enteras en el algoritmo clásico de MPC, el problema de optimización resultante es un problema de progamación cuadratica entera mixta (Mixed Integer Quadratic Programs, MIQP), o en un problema de programación lineal entera mixta (Mixed Integer Lineal Programs, MILP), dependiendo de la función objetivo que se tenga.
El artículo esta estructurado de la siguiente manera, en la segunda sección se describen brevemente algunos algoritmos de optimización multiobjetivo, en la tercera sección se presenta la descripción general del funcionamiento de la planta de refrigeración solar, en la cuarta sección se realiza la descripción del algoritmo de optimización empleado, y en la quinta sección se muestran los resultados de las simulaciones, y finalmente las conclusiones.

2 Métodos de Optimización

En muy pocas ocasiones un solo objetivo sujeto a restricciones duras representa un problema bien abordado. Por lo que es necesaria la busqueda de herramientas más versatíles en ese aspecto. Es frecuente que los objetivos sean representados en forma vectorial [1]. En [1] se hace una breve descripción de los algoritmos de optimización para la solución de problemas con múltiples objetivos, destacando sus ventajas y desventajas. A continuación se describen brevemente.

2.1 Suma de Objetivos Ponderados

La suma de objetivos ponderados convierte el problema de minimización vectorial en un problema escalar, por la construcción de un solo objetivo formado por la suma de todos los objetivos (1).

$$\min_{X \in \Omega} f(x) = \sum_{i=1} w_i F_i(x)^2 \tag{1}$$

El problema de optimización es solucionado con un algoritmo estandar de optimización sin restricciones. Uno de los inconvenientes de esta formulación es que los coeficientes de ponderación w_i no siempre se corresponden con la importancia de los objetivos, es decir, el hecho de que a un objetivo le corresponda el factor de ponderación de mayor valor, no garantiza que este objetivo tenga mayor prioridad en el momento de encontrar la solución.

2.2 Método de restricción ε

Este método es empleado cuando se presentan problemas de convexidad. Consiste en realizar la minimización de un objetivo primario F_P, y expresar el resto de los objetivos en forma de restricciones con desigualdades (2).

$$\min_{X \in \Omega} F_p(x) \tag{2}$$

sujeto a

$$F_i(x) \leq \epsilon_i \quad i = 1, \ldots, m \quad i \neq p \tag{3}$$

Uno de los inconvenientes que existen con este método, es la adecuada elección de ε que garantice una solución factible. Otra desventaja es que la representación de objetivos de diseño ó control como restricciones duras, no es frecuentemente muy adecuada.

2.3 Método de satisfacción de objetivos (Goal Attainment Method)

En este método se basa en la minimización de una variable de relajación. Los objetivos de diseño son representados como un conjunto de objetivos, $F(x) = F_1(x), F_2(x), \ldots, F_m(x)$. Se expresa un vector de coeficientes de ponderación $w_i = w_1, w_2, \ldots, w_m$, y el problema es presentado como un problema de optimización estandar (4).

$$\min_{\gamma \in \mathcal{R}, X \in \Omega} \gamma \tag{4}$$

sujeto a

$$F_i(x) - w_i \gamma \leq F_i^* \quad i = 1, \ldots, m \tag{5}$$

El termino $w_i\gamma$ introduce un elemento de relajación dentro del problema, que hace que los objetivos sean satisfechos. Los elementos de ponderación w_i, indican de alguna forma el porcentaje de satisfacción de cada objetivo. En esta formulación pueden ser incluidas restricciones duras, haciendo $w_i = 0$. Se tratan de satisfacer el mayor número de objetivos posibles.

3 Ejemplo de Aplicación: Planta de refrigeración con energía solar

El modelo de la planta de refrigeración solar empleado representa los componentes de la planta de climatización solar instalada en las instalaciones de los Laboratorios y Talleres de la Escuela Superior de Ingenieros (ESI) de la Universidad de Sevilla. Se tomo como base del modelo de la planta solar, los trabajos realizados por Delgado y Bordons [2], el modelo fue posteriormente modificado y validado con datos de funcionamiento reales de la planta solar para distintas condiciones de operación.
La figura 1 representa el esquema de la planta solar de refrigeración, a continuación se describen brevemente los componentes señalados. El sistema de captación esta formado por un conjunto de colectores encargados de aumentar la temperatura de un fluido calorportador mediante la captación de la energía solar. El acumulador solar esta compuesto por dos tanques de acumulación encargados de almacenar el fluido proveniente de los captadores, almacenando así la energía necesaria para cuando la radiación solar no sea suficiente. El sistema de energía auxiliar esta compuesto por una caldera de gas natural encargada de suplir energía cuando el abastecimiento no sea suficiente. La máquina de absorción encargada de la producción de frio, trabaja con una solucion de Br-Li, y requiere para su adecuado funcionamiento que su temperatura de entrada este comprendida entre 75-100 $^\circ C$ (producción de frío), la salida de la máquina de absorción va a los laboratorios de la ESI. Contiene tambien un intercambiador de calor y una bomba de calor que permite simular una carga para la realización de pruebas y ensayos. A continuación se describen brevemente los elementos de la planta usados en las simulaciones.

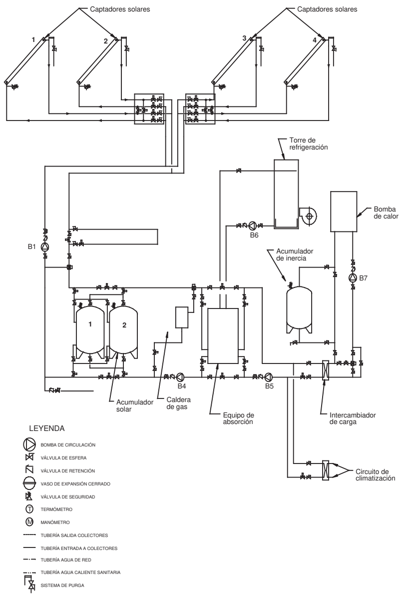

Figura 1: Esquema de la planta solar de climatización

3.1 Modelo de Captador Solar

Un colector solar es un intercambiador de calor capaz de utilizar la radiación solar para aumentar la energía interna de un fluido de trabajo. El colector presenta una superficie plana a la radiación incidente, quedando bajo la superficie de la misma los tubos de conducción del fluido calorportador. La energía incidente resulta parcialmente absorbida por la superficie captadora de modo que aumenta la temperatura de la misma y la del fluido que circula por los tubos de conducción.
La ecuación que representa modelo transitorio es obtenida mediante un balance de energía y esta dada por:

$$C_A \cdot \frac{dT_m}{dt} = F \cdot [I_G - U_L \cdot (T_m - T_{amb})] - \frac{2 \cdot \dot{m} \cdot C_p}{A_C} \cdot (T_m - T_e) \quad (6)$$

Donde,
I_G es la irradancia sobre la superficie del colector($\frac{W}{m^2}$)
C_A es la capacidad térmica del colector ($\frac{J}{m^2 \cdot {}^\circ C}$)
T_m es la temperatura media del fluido ($^\circ C$)
T_{amb} la temperatura ambiente ($^\circ C$)
U_L el coeficiente de pérdidas al ambiente
F el factor de eficiencia

La temperatura de salida del colector, T_S, se obtiene asumiendo que la distribución de la temperatura es lineal y esta dada por,

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (7)$$

3.2 Sistema Auxiliar de Energía

Los sistemas de climatización solar precisan de un sistema auxiliar de aporte de energía que supla las carencias energéticas del sistema de captación solar, debido a condiciones ambientales adversas que impidan obtener un nivel térmico suficiente, en este caso, es una caldera de gas natural [2].
Las principales funciones de una caldera son las de convertir la energía química presente en el combustible en energía térmica mediante un proceso de combustión, y la de transferir esta energía térmica a un fluido de trabajo.
El modo de controlar el suministro de potencia es un control ON/OFF. Consiste en una señal de realimentación del quemador por un termostato denominado ÁQUASTAT', que mantiene la temperatura del agua aproximadamente constante a la salida de la caldera.
Las ecuaciones que describen el comportamiento de la caldera a través de la evolución de dos temperaturas, la temperatura de salida de los gases procedentes de la combustión (T_{ch}), y, la temperatura exhausta del agua en la caldera (T_{exa}), y son las siguientes,

$$C_g \cdot \frac{dT_{ch}}{dt} = AU_{ge} \cdot (T_{amb} - T_{ch}) + AU_{ga} \cdot (T_{exa} - T_{ch}) + \dot{Q}_b \quad (8)$$

$$C_a \cdot \frac{dT_{exa}}{dt} = AU_{ae} \cdot (T_{amb} - T_{exa}) + AU_{ga} \cdot (T_{ch} - T_{exa}) + \dot{m_C} \cdot C_p \cdot (T_{ent} - T_{exa}) \quad (9)$$

Donde,
T_{ent} es la temperatura de entrada del agua a la caldera ($^\circ C$)
C_a es la capacidad térmica del agua ($\frac{W}{^\circ C}$)
C_g es la capacidad térmica de los gases de combustión ($\frac{W}{^\circ C}$)
AU_{ge} es el coeficiente de transferencia de calor entre los gases y el ambiente ($\frac{W}{^\circ C}$)
AU_{ae} coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el ambiente ($\frac{W}{^\circ C}$)
AU_{ga} coeficiente de transferencia de calor entre los gases y el agua ($\frac{W}{^\circ C}$)
$\dot{Q}_b$ es la potencia en el quemador

La regulación de los ciclos se obtiene controlando el caudal de gas que se inyecta a la caldera. Si la temperatura exhausta del agua supera una determinada consigna ($68^\circ C$) el caudal se hace cero, y la temperatura comenzará a decaer, una vez que la temperatura cae por debajo de esa consigna se inyecta el caudal nominal.

3.3 Sistema de Acumulación

El sistema de acumulación de la planta está compuesto por dos depósitos de 2500 l cada uno, que trabajan en paralelo. El modelo de los acumuladores fue realizado a partir de los datos reales de funcionamiento, y es un modelo simplificado del mismo, un modelo de primer orden más tiempo muerto. El modelo es el siguiente:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{11}}{dt} &= \frac{e^{-t_{0,11}s}}{\tau_{11}}(K_{11}T_h - T_{11}(t)) \\
\frac{dT_{12}}{dt} &= \frac{e^{-t_{0,12}s}}{\tau_{12}}(K_{12}T_l - T_{12}(t)) \\
\frac{dT_{21}}{dt} &= \frac{e^{-t_{0,21}s}}{\tau_{21}}(K_{21}T_h - T_{21}(t)) \\
\frac{dT_{22}}{dt} &= \frac{e^{-t_{0,22}s}}{\tau_{22}}(K_{22}T_l - T_{22}(t)) \\
T_{sh} &= T_{11} + T_{12} \\
T_{sl} &= T_{21} + T_{22}
\end{aligned} \tag{10}$$

Donde,
T_{sh} es la temperatura de salida del acumulador que va al circuito captador
T_{lh} es la temperatura de salida que va al circuito de carga
T_s es la temperatura del fluido que viene de el circuito captador
T_l es la temperatura del fluido que viene de la carga

4 Formulación del algoritmo de control

El control de una planta solar es un problema complejo, en el que intervienen un número significativo de variables, y cuyas condiciones de operación están sujetas a las condiciones climatologicas, y en el que juega un papel importante la adecuada selección de las estrategias de control aplicadas para obtener el máximo rendimiento de la misma.
El algoritmo desarrollado busca satisfacer los objetivos establecidos, mediante la selección del modo de funcionamiento de la planta solar. Los modos de funcionamiento se refieren a la selección de los componentes de la planta (captadores solares, caldera de gas, tanques de acumulación) que van a proporcionar la energía necesaria para mantener la temperatura de entrada a la máquina de absorción al valor deseado. Los modos de funcionamiento son los siguientes,

1. Sistema de captación solar
2. Sistema de acumulación
3. Sistema de acumulación y sistema auxiliar de energía
4. Sistema de captación solar y sistema auxiliar de energía

Los objetivos pueden clasificarse en objetivos economicos, de calidad y/o control, y de seguridad. Las restricciones garantizan el funcionamiento de los elementos finales de control y de las variables de operación este dentro del rango nominal de funcionamiento. A continuación se describen las funciones objetivos y las variables manipuladas,

1. Objetivos económicos:
   (a) El caudal de gas natural de la caldera,
2. Objetivos de control:
   (a) Temperatura de entrada a la máquina de absorción ($T_{e,ma}$)
3. Variables manipuladas:
   (a) Válvulas de apertura variable (V_v)
   (b) Válvulas de apertura o cierre (V_l)(ON/OFF)(Variables lógicas)
4. Configuración de funcionamiento:
   (a) Número de colectores activos
   (b) Conexión de los colectores, serie y/o paralelo
5. Restricciones:
   (a) Elementos finales de control
   (b) Rango de funcionamiento de las variables

El algoritmo de optimización realizado esta basado en el método de satisfacción de objetivos *(Goal Attainment Method)* y hace uso de variables lógicas. Los objetivos son, por razones económicas, el de minimizar el uso de la caldera de gas natural, y, el de controlar la temperatura de entrada a la máquina de refrigeración por absorción para la producción de frio.

En (11) se muestra la formulación del algoritmo realizado, destacando la incorporación de variables lógicas y de las restricciones en los rangos de actuación de las válvulas.

$$\min_{\gamma \in \mathcal{R}, T \in \Omega} \gamma \tag{11}$$

sujeto a

$$\begin{aligned}
-T_{e,maq}(t) - w_1\gamma &\leq -75°C \\
T_{exa}(t) - w_2\gamma &\leq 68°C
\end{aligned} \tag{12}$$

$$0 \leq V_v \leq 1$$
$$V_l \in [0, 1]$$

La $T_{e,ma}$ debe satisfacer la desigualdad a partir del instante de tiempo t_1 en el que la máquina de absorción se ponga en marcha. El algoritmo utiliza los valores de T_{amb} y de IG y realiza el cálculo de la configuración de funcionamiento cada hora aproximadamente.

5 Resultados de las simulaciones

En la figura 2, se muestran las condiciones ambientales, se representa la temperatura ambiente y la radiación solar. Las muestras son tomadas cada 5 min, durante 12 horas a partir de las 9:00 am. Desde el punto de vista de control las condiciones ambientales son perturbaciones del sistema, ya que son variables no manipulables y de la que es función directa la configuración de la planta.

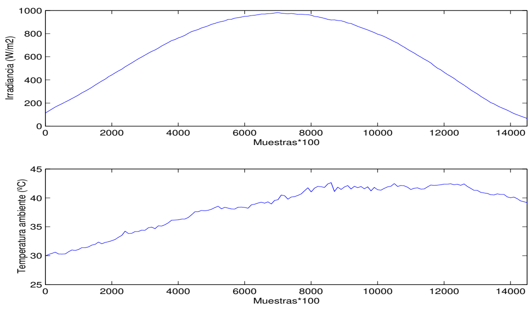

Figura 2: Condiciones ambientales

En la figura 3, se muestra la evolución de las temperaturas para la configuración inicial, solo acumuladores, y la apertura de las válvulas al 0.5. Se puede observar que con esta configuración la temperatura de entrada a la máquina de absorción no esta en el rango de funcionamiento para la producción de frio. La caldera de gas no esta puesta en marcha.

Partiendo de las condiciones iniciales mostradas en la figura 3, el algoritmo realiza un barrido, desde $t = 0$, por los modos de operación de la planta para obtener la configuración de la planta que satisfaga los objetivos, los valores de configuración obtenidos son usados como condiciones iniciales en el instante t de simulación, y así sucesivamente hasta llegar a t_f. Los resultados de la simulación son los mostrados en la figura 4.

Puede observarse como la temperatura de entrada a la máquina de absorción supera el valor de $75°C$

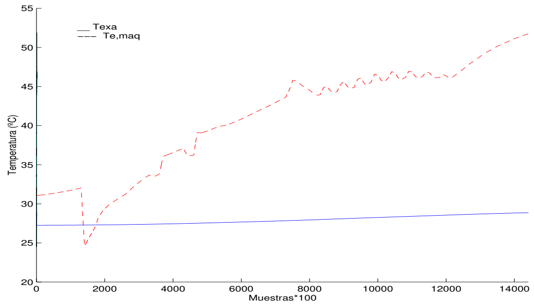

Figura 3: Temperaturas de salida para las condiciones iniciales

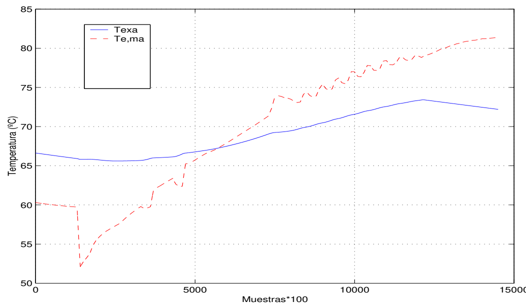

Figura 4: Temperatura de salida para la solución final

que permiten su funcionamiento. También se minimiza el uso de la caldera de gas, excediendo los $68°C$ al final del día, cuando la energía acumulada y la radiación solar no son capaces de alcanzar dicho valor de temperatura.
Es apropiado mencionar que el tiempo de cálculo es elevado, por lo que es una rutina que tiene que no puede ser ejecutada en línea. Debido al elevado tiempo de cálculo el número de iteraciones que realiza el algoritmo fue limitado. Es apropiado la realización de la misma en un lenguaje de programación y en un sistema operativo que minimize el tiempo de cálculo.

6 Conclusiones

Se realizó un algoritmo de optimización multiobjetivo, para la selección del modo de funcionamiento de una planta de refrigeración con energía solar, y el control de la temperatura de entrada a la máquina de absorción, y, para la minimización de costos. El algoritmo se muestra como una herramienta util en el manejo de procesos con un considerable número de variables, variables enteras y continuas, y de relativa complejidad. Una de sus desventajas es el elevado tiempo de cálculo, que debe ser reducido para poder aplicarlo en línea. Otra desventaja, aunque no tan marcada, es la selección basada en al heuristica de los factores de ponderación de los objetivos, pero es un

paso que se hace intuitivamente.
En futuros trabajos de investigación se realizaran los cambios necesarios para minimizar el tiempo de cálculo, y se propondran nuevas estrategias en esta línea de investigación.

Referencias

[1] Thomas Coleman, Mary Ann Branch, and Andrew Grace. *Optimization Toolbox User's Guide*. The Math Works Inc, 1999.

[2] Juan Delgado. Modelado y simulacion de una planta solar de climatizacion. Universidad de Sevilla, 2000.

[3] Jun Ju, Min-Sen Chiu, and Chi Tien. Multiple-objective based model predictive control of pulse jet fabric filters. *Trans IChemE*, 78:581–589, may 2000.

[4] Matthew Tyler and Manfred Morari. Propositional logic in control and monitoring problems. *Proceedings of European Control Conference '97*, 1(1):623–628, Dec 1996.

[5] S.H. Yang, P.W.H. Chung, X.Z. Wang, and C. McGreavy. Multi-objective constraint control for fcc reactor-regenerator system. *Computers Chemical Engineering*, 22(1):831–834, 1998.