

# CONTROL DESCENTRALIZADO ADAPTATIVO CON PI POR GANANCIA PROGRAMADA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

Manuel Lara, Juan Garrido, Francisco Vázquez

Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España,

e-mail: p12laorm@uco.es, juan.garrido@uco.es, fvazquez@uco.es

## Resumen

*Este documento aborda el problema de control de un sistema de refrigeración por compresión de vapor propuesto como benchmark para el CIC2018. Este sistema de refrigeración es un proceso no lineal multivariable que muestra interacciones y está sujeto a restricciones de entrada. En este trabajo, se propone una estructura de control descentralizado a través de dos controladores PI adaptativos por ganancia programada para diferentes modelos lineales identificados en varios puntos de operación. Dichos controladores se ajustan mediante algoritmos genéticos para minimizar un índice de rendimiento múltiple. Además, se implementa un generador de consignas óptimo para el lazo de sobrecalentamiento cuyo objetivo es lograr puntos de operación estacionarios con un coeficiente de rendimiento máximo, el cual es una medida de eficiencia generalizada en estos sistemas. Las simulaciones consideradas en el concurso muestran que el diseño propuesto logra un mejor rendimiento que el caso de referencia.*

**Palabras clave:** ciclo de refrigeración por compresión de vapor, control adaptativo, control PID, generación óptima de consignas.

## 1 INTRODUCCIÓN

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor (VCRC) es la tecnología líder en generación de frío tanto para uso doméstico y comercial como para aplicaciones industriales [11]. Procesos de refrigeración como el control de temperatura en edificios o automóviles, o los refrigeradores de supermercados para almacenamiento y transporte de alimentos implican un gran consumo de energía y tienen un importante impacto económico y ambiental, como avalan varios estudios [12]. La mejora de la eficiencia energética en dichos sistemas a través del control y optimización de su funcionamiento es un problema clave [5]. La mayoría de los sistemas VCRC constan de cuatro elementos principales: dos intercambiadores de calor (evaporador y condensador), una válvula de expansión y un compresor. El calor es transferido por

el refrigerante desde un espacio de temperatura más baja (foco frío) o desde el fluido secundario del evaporador a un ambiente de alta temperatura (foco caliente) o al fluido secundario del condensador. Generalmente, hay dos variables manipuladas para operar el sistema: la velocidad del compresor y el grado de apertura de la válvula de expansión. Los flujos máscicos secundarios y sus temperaturas de entrada en el evaporador y el condensador actúan como perturbaciones. Estos sistemas son procesos multivariables que muestran interacciones y dinámicas no lineales bajo un ancho rango de condiciones de operación. En los últimos años, muchos investigadores han prestado atención al control de los sistemas VCRC utilizando diferentes enfoques, como el control PID descentralizado [6], control multivariable por desacoplo [9], control predictivo [7] y control robusto [1], entre otros.

Este trabajo se centra en el problema de control del sistema VCRC propuesto en el benchmark CIC2018. En este caso, el proceso de refrigeración puede enfocarse como un sistema multivariable con dos variables (la temperatura de salida del flujo secundario del evaporador  $T_{e,sec,out}$  y el sobrecalentamiento del refrigerante en la salida del evaporador  $T_{SH}$ ) que puede controlarse mediante dos variables manipuladas (velocidad del compresor  $N$  y apertura de la válvula de expansión  $A_v$ ). Hay varias variables de perturbación; sin embargo, solo la temperatura de entrada del flujo secundario del evaporador  $T_{e,sec,in}$  y la temperatura de entrada en el flujo secundario del condensador  $T_{c,sec,in}$ , son tenidas en cuenta en este trabajo. La variable de entrada  $A_v$  está sujeta al rango de [10-100] %, y  $N$ , al rango de [30-50] Hz.

La metodología llevada a cabo se basa en el diseño de una estructura descentralizada de dos controladores PI adaptativos por ganancia programada y un generador óptimo de referencias de sobrecalentamiento. En primer lugar, se identifican diversos modelos lineales multivariables del proceso en diferentes puntos de operación (Sección 2). Tras ello, para cada modelo lineal se ajustan dos controladores PI minimizando una función de coste multiobjetivo que tiene en cuenta índices como el IAE o el IAU en ambos lazos. Esta optimización no

lineal se realiza mediante algoritmos genéticos. En la Sección 3 se explica esta sintonía y como los diversos controladores para cada lazo se agrupan un controlador PI adaptativo. En la Sección 4 se describe el diseño de un bloque que según las condiciones de operación genera la referencia óptima o casi óptima de sobrecalentamiento para que el proceso funcione de manera más eficiente en estado estacionario. Por último, la Sección 5 muestra los resultados de la propuesta.

## 2 MODELOS LINEALES DEL PROCESO

Para llevar a cabo el diseño propuesto y debido a la gran no linealidad del sistema VCRC, es necesario identificar varios modelos lineales, los cuales varían considerablemente según el punto de operación. En este trabajo, a partir del modelo no lineal, se obtienen doce modelos lineales para diversos valores equidistantes en las perturbaciones  $T_{e,sec,in}$  (-21, -19) °C,  $T_{e,sec,in}$  (28, 30, 32) °C y la temperatura de salida del evaporador  $T_{e,sec,out}$  (-23,5, -22, -20,5) °C. Los modelos lineales se identifican utilizando la toolbox de identificación de Matlab. Los modelos continuos finales tienen la estructura dada por (1), donde  $G(s)$  es la matriz de transferencia que relaciona el vector de variables controladas ( $T_{e,sec,out}$  y  $T_{SH}$ , respectivamente) con el vector de variables manipuladas ( $Av$  y  $N$ , respectivamente), y donde  $G_d(s)$  relaciona las variables controladas con el vector de las variables de perturbación ( $T_{e,sec,in}$  y  $T_{c,sec,in}$ , respectivamente). Las otras perturbaciones no se han considerado.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{K_{11}(s+z_{11})}{(s+p_{11})(s+p_{21})} & \frac{K_{12}}{(s+p_{12})} \\ \frac{K_{21}}{(s+p_{21})} & \frac{K_{22}(s+z_{22})}{(s+p_{12})(s+p_{22})} \end{pmatrix}$$

$$G_d(s) = \begin{pmatrix} K_{d11} & \frac{K_{d12}(s+z_{d12})}{(s+p_{d12}s+p_{2d12})} \\ K_{d21} & \frac{K_{d22}(s+z_{d22})}{(s+p_{d22}s+p_{2d22})} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Aunque los valores de los modelos obtenidos no se detallan por motivos de espacio, las dinámicas obtenidas son todas estables. Además, los elementos diagonales de la matriz de ganancias relativas (RGA) [2] de  $G(s)$  tienen un valor en torno a 0,95 en todos los puntos de operación. Esto indica que el proceso tiene una interacción leve y recomienda el emparejamiento entrada-salida en el cual la variable  $T_{e,sec,out}$  es controlada por la válvula de expansión ( $Av$ ), y el sobrecalentamiento por el compresor ( $N$ ). Este no es el emparejamiento típico en la mayoría de los sistemas VCRC, donde el sobrecalentamiento está regulado por la válvula de expansión; sin embargo, el emparejamiento recomendado se empleará en el resto del trabajo.

## 3 ESTRATEGIA DE CONTROL

### 3.1 CONTROL PI ADAPTATIVO POR GANANCIA PROGRAMADA

El control adaptativo por ganancia programada consiste en ajustar de manera previa un controlador para diversos puntos de operación, y posteriormente, actualizar los parámetros de éste a partir de dichos diseños y según el punto de trabajo en el que esté la planta. Hay diferentes esquemas de ganancia programada en la literatura. Uno de ellos equivale a tener varios controladores PI funcionando en paralelo donde solo se escoge la salida de uno ellos en función de las condiciones de operación. Por ejemplo, en la figura 1 se muestra un esquema muy simple de control PI por ganancia programada donde solo habría 3 ajustes diseñados y funcionando en paralelo y donde se selecciona el más adecuado en función del valor de la referencia de lazo. Los otros dos no seleccionados entran en modo seguimiento. En línea con dicho esquema, en este trabajo se usan dos controladores PI adaptativos donde en concreto se han ajustado 12 controladores PI, uno para cada modelo lineal identificado en el apartado anterior. Según el valor de la referencia de temperatura de secundario y de dos las perturbaciones consideradas se decide la salida de cuál de ellos debe seleccionarse.

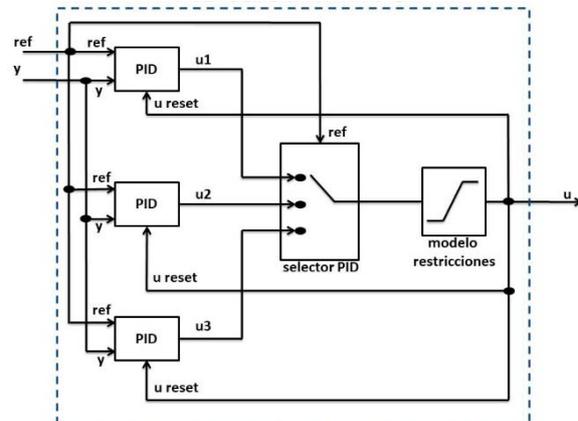


Figura 1: Esquema PID Adaptativo

Para que la transición entre controladores sea suave y sin cambios bruscos en la señal de control, todos deben trabajar con seguimiento integral actualizando su acción integral para que la salida de los no seleccionados coincida con la del controlador activo. Es similar al mecanismo usado para conseguir anti-windup y cambio de modo sin salto que se implementa en los controladores PID [3].

### 3.2 CONTROLADOR I-P

El controlador PI utilizado para cada lazo se implementa con una estructura I-P para evitar

cambios bruscos en la señal de control ante cambios en la referencia. El controlador I-P no interactivo viene dado por la siguiente función de transferencia:

$$u(s) = K_p \left( -y(s) + \frac{r(s) - y(s)}{T_i s} \right) \quad (2)$$

donde  $u(s)$  es la señal de control,  $r(s)$  la referencia,  $y(s)$  señal controlada,  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  es la constante de tiempo integral. Esta ley de control continuo se implementa en una aproximación de tiempo discreto usando el algoritmo de Tustin. Las acciones proporcionales  $P(k)$  e integral  $I(k)$  de esta implementación en la  $k$ -ésima iteración son:

$$\begin{aligned} P(k) &= K_p (-y(s)) \\ I(k) &= I(k-1) + K_{pi} (e(k) + e(k-1)) \end{aligned} \quad (3)$$

La constante  $K_{pi}$  viene dada por:

$$K_{pi} = K_p \frac{T}{2 \cdot T_i}, \quad (4)$$

donde  $T$  es el tiempo de muestreo. La señal de control es la suma de estas dos acciones. Por lo tanto, la señal de control viene dada por  $u(k) = P(k) + I(k)$ .

Para hacer frente a las restricciones de las señales de control, se implementa un mecanismo anti-windup utilizando un modelo de restricción donde se consideran sus saturaciones. Cuando la señal de control final  $u(k)$  está fuera de sus límites, este mecanismo actualiza el término integral  $I(k)$  para que la salida del controlador no exceda dicho límite. El mecanismo se muestra en (5). Además, para asegurar el seguimiento del resto de controladores a la señal final de control  $u(k)$ , hay que considerar que las variables  $P(k)$ ,  $I(k)$  y  $U(k)$  son señales vectoriales de 12 elementos, uno por cada controlador del control adaptativo. Es por eso por lo que en la sentencia *else* se actualiza la señal  $I(k)$  de tal forma que el resto de controladores no activos sigan a la señal  $u(k)$

$$\begin{aligned} u(k) &= P(k) + I(k) \\ \text{if } u(k) > u_{max} & \\ & \quad I(k) = u_{max} - P(k) \\ \text{elseif } u(k) < u_{min} & \\ & \quad I(k) = u_{min} - P(k) \\ \text{else} & \\ & \quad I(k) = u(k) - P(k) \\ \text{end} & \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.3 SINTONÍA USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

El proceso de sintonía de los controladores PI se realiza por medio de algoritmos genéticos (GA), simulando cada uno de los doce modelos lineales en (1) en unas condiciones similares a las del ensayo descrito en el Benchmark. Para la evaluación, el benchmark propone un índice global de evaluación

compuesto por la suma de tres índices cuya función es evaluar el transitorio, la violación de la restricción de mínimo sobrecalentamiento y la eficiencia energética en régimen permanente. El benchmark establece para la evaluación del transitorio de los controladores en la categoría 2 del concurso CIC2018 un índice compuesto de otros cuatro individuales: el primero es la Razón de Error Absoluto Integrado (RIAE) de la variable controlada  $T_{e,sec,out}$  con respecto al controlador base. El segundo es la Razón del Error Absoluto multiplicado por tiempo integrado (RITAE) para  $T_{e,sec,out}$ , teniendo en cuenta que la simulación estándar solo incluye un cambio repentino en su referencia. Los índices tercero y cuarto son las Razones de la Variación Absoluta Integrada de la señal de control (RIAVU) para las dos variables manipuladas  $Av$  y  $N$ . Para la evaluación de la eficiencia energética en régimen permanente, el benchmark evalúa el COP del controlador propuesto respecto al de referencia en los dos últimos minutos de cada punto de operación.

Para el ajuste de los controles PI con los modelos lineales se ha propuesto minimizar un índice global que tenga en cuenta aspectos similares a los valorados por la función de coste del benchmark (la cual es inaccesible). La función de coste propuesta se obtiene como índice combinado del valor medio de cinco índices individuales utilizando un factor de ponderación para cada uno. El primer índice es el Error Absoluto Integrado (IAE) de la variable controlada  $T_{e,sec,out}$  con respecto al controlador base. El segundo es la el Error Absoluto multiplicado por tiempo integrado (ITAE) para  $T_{e,sec,out}$ , teniendo en cuenta que la simulación estándar solo incluye un cambio repentino en su referencia. Los índices tercero y cuarto son la Variación Absoluta Integrada de la señal de control (IAVU) para las dos variables manipuladas  $Av$  y  $N$ . El quinto es el IAE del sobrecalentamiento  $T_{sh}$ .

Debido a la no linealidad de este índice de rendimiento combinado, el ajuste de los parámetros de los controladores PI se ha formulado como un problema de optimización no lineal que se ha resuelto usando algoritmos genéticos [4], [10]. En cada controlador PI, hay dos parámetros para ajustar:  $K_p$  y  $T_i$ . El rango de búsqueda de los parámetros está limitado a [10-4, 100]. Para la ganancia  $K_p$  del controlador de  $T_{e,sec,out}$ , este rango es negativo. Las principales opciones configuradas en el algoritmo genético son: un tamaño de población de 5000, un recuento de élite de 0,05 veces el tamaño de la población para la reproducción con una fracción de cruce de 0,8. Después de múltiples simulaciones, los parámetros PI resultantes que logran el mejor índice combinado se recopilan en la Tabla 1, donde  $K_{p1}$ - $T_{i1}$  corresponden al lazo  $T_{e,sec,out}$ - $Av$  y  $K_{p2}$ - $T_{i2}$  al lazo  $T_{sh}$ - $N$ .

Tabla 1: Parámetros PI para los diferentes puntos de operación dados en formato tupla Kp1-Ti1-Kp2-Ti2.

$T_{e,sec,out}$ (°C)		-20,5	-22		-23,5
$T_{e,sec,in}$ (°C)		-19	-19	-21	-21
$T_c$ (°C)	28	-11,25	-12	-10,09	-15,06
		0,975	0,787	1,77	0,93
		33,88	1,08	49,04	8,89
		20,72	2,67	2,61	12,1
	30	-12,63	-13,21	-12,13	-15,3
		1,09	0,71	1,34	0,94
		37,06	1,57	46,27	2,55
		7,34	3,61	5,21	7,3
	32	-11,13	-19,32	-12,95	-15,83
		0,84	0,71	0,94	0,65
		20,78	49,48	22,32	34,14
		11,14	40,56	7,65	3,13

Usando el modelo lineal se obtienen unos índices finales que empeoran cuando se utiliza el modelo no lineal original. Por ello se añade un filtro de primer orden a la salida del controlador de cada lazo con una constante de tiempo de 0,5 s y 20 s para los lazos  $T_{e,sec,out}$ -Av y  $T_{sh}$ -N, respectivamente, con los que se consigue suavizar más la señal de control y evitar cambios bruscos. Ello reduce los índices IAVU y reduce el índice global.

#### 4 FUNCIONAMIENTO EFICIENTE DEL SISTEMA

Uno de los principales problemas en la operación de los sistemas de refrigeración consiste en lograr las condiciones de operación deseadas mientras se minimiza el consumo de energía [8]. En el benchmark, se supone que la referencia del lazo de control de  $T_{e,sec,out}$  no se puede modificar, ya que se considera un requisito de demanda impuesto. Sin embargo, podría haber otras referencias diferentes de  $T_{sh}$  que operan la planta en las mismas condiciones ambientales y de demanda aunque consuman diferente potencia. En esta sección, se describe el diseño del bloque generador de consignas óptimos sobre el  $T_{sh}$ , el cual se lleva a cabo de manera similar al presentado en [3].

La información del estado estacionario proporcionada por el modelo no lineal bajo diferentes condiciones en  $T_{e,sec,out}$ ,  $T_{e,sec,in}$  y  $T_c$ , se usa para determinar la consigna óptima  $T_{SH}$  que logra la demanda de enfriamiento trabajando en las mismas condiciones impuestas y minimizando el consumo de energía eléctrica del sistema. Tradicionalmente, la eficiencia se mide por medio del coeficiente de rendimiento (COP), que se define como el cociente  $Q_e/W_{com}$ , donde  $Q_e$  es la tasa de transferencia de energía en el evaporador y  $W_{comp}$  es el consumo de

energía del compresor. Para la misma demanda de potencia de enfriamiento, valores de COP más altos implican operar la planta con menores consumos de energía eléctrica.

Como ejemplo, se explica la base del procedimiento de generación del set-point para las condiciones particulares de perturbación de  $T_{e,sec,en} = -20$  °C y  $T_c = 30$  °C. Lo primero que se realiza es generar la región de operación nominal empleando un barrido en Av y los valores extremos de N. Los resultados están recogidos en las siguientes figuras, donde se puede apreciar como para aperturas grandes de la válvula se alcanzan menores valores de sobrecalentamiento  $T_{SH}$ , y se llega a saturar al valor nulo, provocando un cambio importante de tendencia en la temperatura de evaporación  $T_{e,sec,out}$ . La frontera Nmin para valores de apertura de válvula grande es un factor limitante para las temperaturas de evaporación. De esta manera, temperaturas de evaporación que son alcanzables con otra combinación de variables manipuladas, dejan de serlo con velocidades mínimas en el compresor.

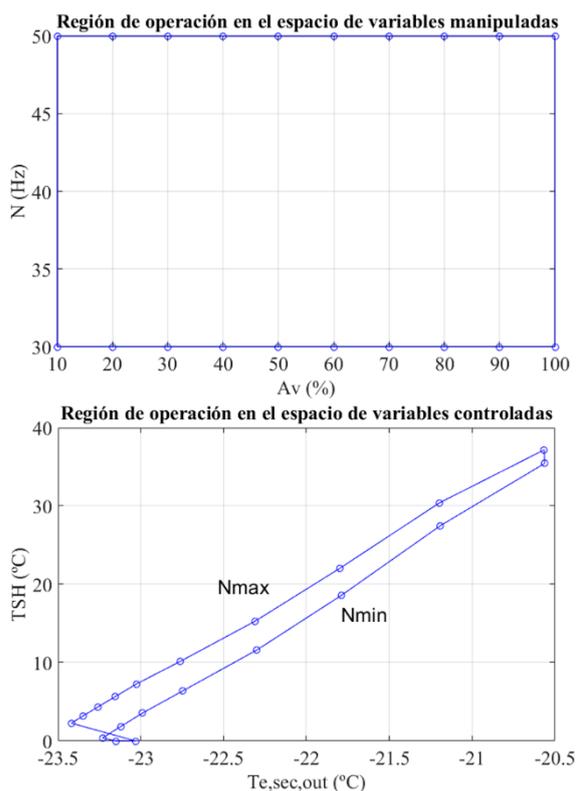


Figura 2: Espacio de variables manipuladas (arriba) y región factible en el espacio de variables controladas (abajo)

Además, teniendo en cuenta que el CIC2018 impone como limitación que el sobrecalentamiento debe estar siempre por encima de los 2° C, hay ciertos puntos de la frontera que no estarían permitidos y se pueden eliminar de cara a la generación de consignas. La frontera  $T_{SHmin}$  que tiene asociada el máximo COP

(operación eficiente del sistema de refrigeración) incorpora en su mayoría, los puntos de la frontera  $N_{\min}$  pero también algunos puntos con valores de  $N$  intermedios.

En la experiencia descrita en el CIC2018, se observan cuatro puntos de operación, todos ellos alcanzables. Se puede comprobar que los dos primeros puntos quedan fuera del rango de  $T_{e,sec,out}$  alcanzable con  $N_{\min}$ . Por todo lo anterior, se realiza un barrido aún más fino en  $Av$  (10% hasta 100% en incrementos de 1%) y  $N$  (30 rpm hasta 50 rpm en incrementos de 2 rpm). Los resultados están recogidos en la figura 3, donde se aprecian las curvas  $T_{e,sec,out}$  frente al COP y  $T_{sh}$  frente al COP para cada  $N$ . Dado un  $T_{e,sec,out}$  deseado, el COP máximo alcanzable se identifica en la Fig. 3 superior. Se coloca en la curva obtenida de puntos de operación con velocidad óptima del compresor  $N$ . Para un  $T_{e,sec,out} = -23^\circ\text{C}$ , el COP máximo alcanzable es de aproximadamente 1,13, como se representa en la figura 3 superior con una línea negra. Luego, el punto correspondiente en el espacio  $T_{SH}$ -COP indica la referencia de sobrecalentamiento que se debe proporcionar al sistema de control para operar con este COP máximo en estado estacionario, que en el caso de la figura 3 inferior, es de aproximadamente  $5^\circ\text{C}$ .

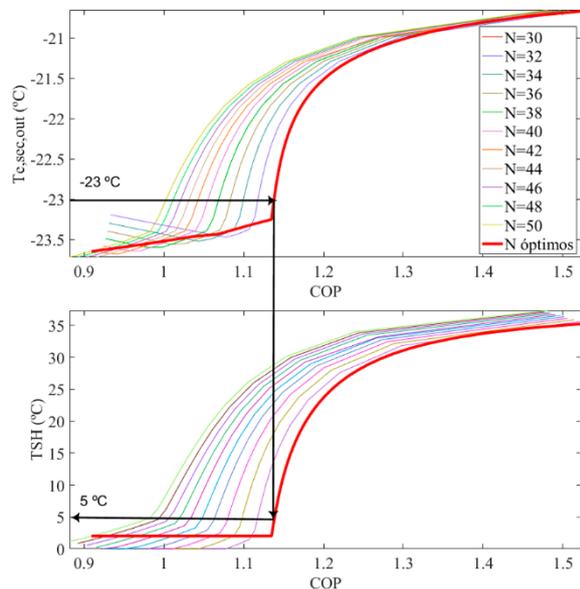


Figura 3: Región factible en el espacio COP- $T_{e,sec,out}$  (arriba) y en el correspondiente en el espacio COP- $T_{SH}$ .

El mismo proceso se puede realizar trabajando bajo diferentes condiciones de perturbación con resultados similares. Por ejemplo, la figura 4 muestra las curvas de funcionamiento en el espacio de variables controladas  $T_{e,sec,out}$ - $T_{SH}$  correspondientes a diferentes casos de perturbación y donde se resalta la curva de puntos con máximo COP. Usando estos datos, para

los valores dados de las dos perturbaciones, la curva óptima se calcula por interpolación. Luego, el set-point  $T_{SH}$  óptimo se obtiene de la interpolación en esta curva previamente calculada para una referencia especificada de  $T_{e,sec,out}$ .

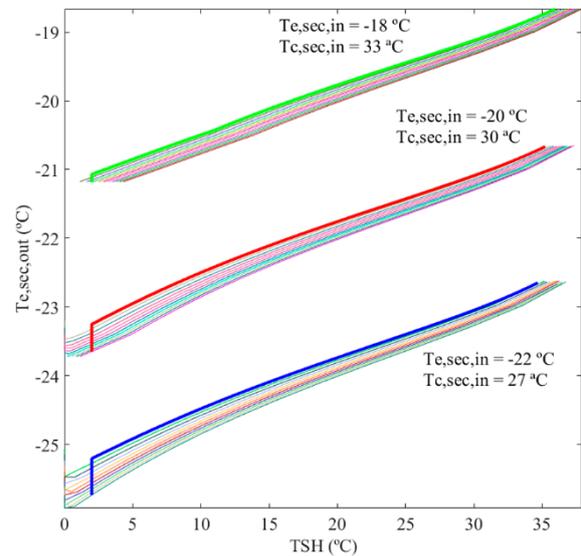


Figura 4: Curvas  $N$  óptimas para perturbaciones

## 5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En esta sección, se evalúa el rendimiento del controlador propuesto con el modelo no lineal. Los índices de rendimiento individuales se enumeran en la Tabla 2. El control propuesto mejora el índice global (no se muestra en la Tabla 2) con un valor de 0,2505. Todos los índices relacionados con los errores se mejoran a expensas de las señales de control, donde se obtienen valores ligeramente más altos en los índices asociados.

Tabla 2: Índices de desempeño

Índice	RIAE <sub>1</sub>	RITAE <sub>1</sub>	RIAVU <sub>1</sub>	RIAVU <sub>2</sub>
Control propuesto	<b>0,1953</b>	<b>0,1293</b>	<b>1,4147</b>	<b>0,7432</b>
Índice	RITSH			
Control propuesto	<b>-0,8078</b>			
Índice	ICOP <sub>v1</sub>	ICOP <sub>v2</sub>	ICOP <sub>v3</sub>	ICOP <sub>v4</sub>
Control propuesto	<b>0,0005</b>	<b>0,0084</b>	<b>-0,0006</b>	<b>-0,5133</b>

Las respuestas temporales de las salidas, así como de las señales de control se muestran en las figuras 5 y 6, respectivamente. El control propuesto alcanza las referencias y rechaza las perturbaciones muy rápido en comparación con el caso de referencia. Las referencias de sobrecalentamiento son diferentes de las definidas en la prueba estándar porque hay un bloque que genera los puntos de referencia para operar el sistema más eficientemente. Ello queda

reflejado en la figura 7 donde se muestra el COP alcanzado, que muestra unos valores superiores al caso de referencia, lo que implica ahorros de energía.

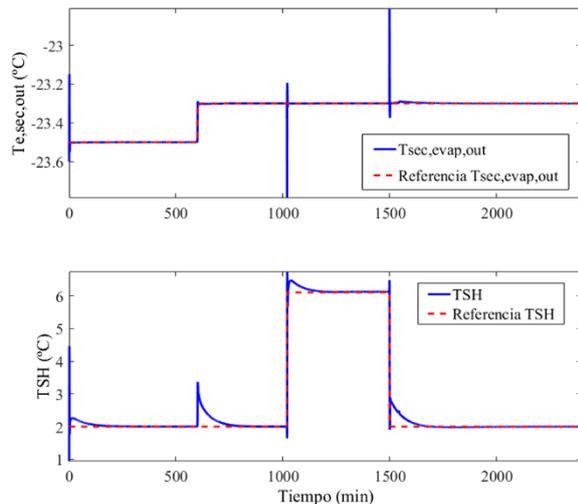


Figura 5: Variables controladas

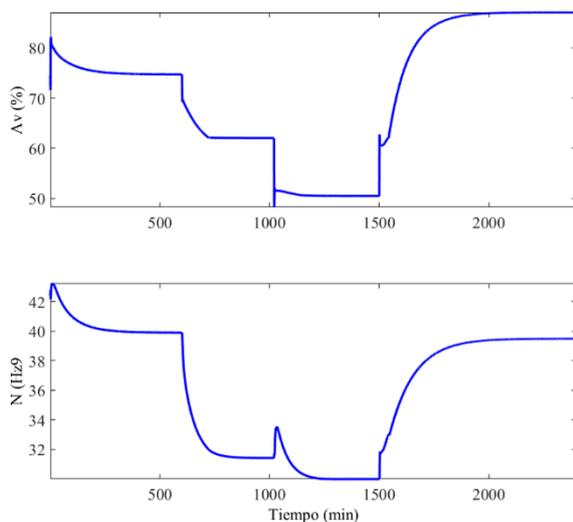


Figura 6: Variables manipuladas

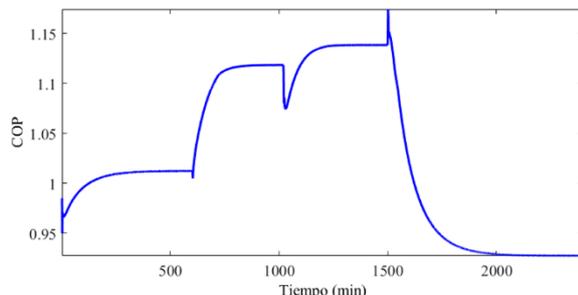


Figura 7: COP

#### Agradecimientos

A la Universidad de Córdoba por el contrato PIF concedido a Manuel Lara.

#### English summary

### ADAPTIVE DECENTRALIZED PI CONTROL BY GAIN SCHEDULING FOR A VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION CYCLE SYSTEM

#### Abstract

*This paper deals with the control problem of a refrigeration vapor compression system proposed as a benchmark for the CIC2018. This refrigeration system is a nonlinear multivariable process that shows interactions and is subjected to input constraints. In this work, an adaptive decentralized PI control by gain scheduling is proposed as control structure for several linear models identified at different operation points. Then, the PI controllers are tuned by genetic algorithms to minimize a multiple performance index. In addition, a superheat set-point generation is developed to obtain stationary operation points with maximum coefficient of performance which is a widespread efficiency measurement in these systems. Simulations considered in the benchmark show that the proposed design achieves better performance than the reference case.*

**Keywords:** Vapor compression refrigeration cycle, decoupling control, adaptive control, PID control, optimum set-point generation.

#### Referencias

- [1] Bejarano, G., Alfaya, J.A., Ortega, M.G. and Rubio, F.R. (2015). Multivariable analysis and  $H_\infty$  control of a one-stage refrigeration cycle. *Appl. Therm. Eng.*, 91, 1156-1167.
- [2] Bristol, E.H. (1966). On a new measure of interaction for multivariable process control, *IEEE Trans*, 11, 133-134
- [3] Garrido, J., Lara, M., Ruz, M., Vázquez, F., Alfaya, J. A., Morilla, F. (2018). Decentralized PID control with inverted decoupling and superheating reference generation for efficient operation: Application to the Benchmark PID 2018. 3rd IFAC Conference on Advances in PID Control. Ghent, Belgium, pp. 710-715.
- [4] Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley.

- [5] Kim, M.H., Kim, J.H., Choi, A.S. and Jeong, J.W. (2011). Experimental study on the heat exchange effectiveness of a dry coil indirect evaporation cooler under various operating conditions. *Energy*, 36, 6479-6489.
- [6] Marcinichen, J., del Holanda, T., and Melo, C. (2008). A dual SISO controller for a vapor compression refrigeration system. In 12th Int. Refrig. and Air Cond. Conf., at Purdue, West Lafayette-IN, USA.
- [7] Ricker, N.L. (2010). Predictive hybrid control of the supermarket refrigeration benchmark process. *Control Eng. Pract.*, 18(6), 608-617.
- [8] Ruz, M.L., Garrido, J., Vázquez, F., and Morilla, F. (2017). A hybrid modeling approach for steady-state optimal operation of vapor compression refrigeration cycles. *Appl. Therm. Eng.*, 120, 74-87.
- [9] Shen, Y., Cai, W.J., and Li, S. (2010). Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems. *Control Eng. Pract.*, 18(6), 652-664.
- [10] Wang, P., Kwok, D.P. (1994). Optimal design of PID process controllers based on genetic algorithms, *Control Eng. Pract.*, 2(4), 641-648.
- [11] Wark, k., Richards, D.E. (2000). *Thermodynamics* (6th ed.), William C Brown Pub (2000).
- [12] Zhao, L., Cai, W., Ding, X., Chang, W. (2013) Model-based optimization for vapor compression refrigeration cycle *Energy*, 55, 392-402.



© 2018 by the authors.  
 Submitted for possible  
 open access publication  
 under the terms and conditions of the Creative  
 Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license  
 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).