

CONTROL MULTIVARIABLE LINEAL CON DESACOPLES EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Linear multivariable control with decoupling in a heat exchanger

Jaime Freddy Ricardo Barrera¹, Edgar Barrios Urueña¹

¹Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica, Grupo Inv. Automatización, Instrumentación y Control, Colombia. Email: jricardo01976@hotmail.com, baredgar@gmail.com

(Recibido septiembre 19 de 2016 y aceptado 11 de noviembre de 2016)

Resumen

El presente artículo describe la validación de los diseños de control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Hysys, cuyo interés se centró en analizar las diferentes respuestas del sistema MIMO cuando se realizó el control regulatorio con diferentes desacopladores y sin desacoplador. Se usaron tres tipos de desacopladores: Simplificado de Estado Estacionario, Simplificado y Generalizado. Los valores de las consignas fueron 60 °C para la temperatura del caudal a la salida de los tubos, y 41 °C para la temperatura del caudal a la salida de la carcasa; las variables manipuladas fueron los caudales de entrada a los tubos y la carcasa, gracias a los porcentajes de apertura de las válvulas correspondientes. Se emplearon controladores PI que fueron sintonizados con la aplicación del diseño IMC. De los resultados se pudo apreciar que el desacople simplificado fue el que más disminuyó el efecto del acoplamiento.

Palabras clave: Control Multivariable, Controlador PI, Desacoplador, IMC, Intercambiador de Calor.

Abstract

This document describes the validation of linear multivariable control designs in a heat exchanger under virtual environment using Hysys, where the interest was focused on the analysis of the different responses of MIMO system when regulatory control was done with different decouplers and without decoupler. Three types of decoupling were used: Steady-State Simplified, Simplified and Generalized. The values of the set-points were 60 °C for the flow temperature at the outlet of the tubes, and 41 °C for the flow temperature at the outlet of the shell; the manipulated variables were the flows into the tubes and the shell, because percentages of opening the corresponding valves. PI controllers were tuned by IMC design and used to regulate the temperatures. By comparing the outcomes, it's evident that Simplified Decoupling is the best to reduce the effect of the disturbance by coupling.

Key words: Decoupling, Heat Exchanger, IMC, Multivariable Control, PI Control.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y manejo del control multivariable es uno de los temas importantes para procesos industriales, ya que muy frecuentemente, éstos son de naturaleza multivariable (MIMO). En las siguientes secciones se describe la validación de los diseños de control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Aspen Hysys®, en donde los valores de las Consignas para las Temperatura a las Salidas de los Tubos y la Carcasa son 60°C y 41°C respectivamente;

con un margen de error de $\pm 1\%$ en estado estacionario sobre dichas temperaturas.

Un análisis comparativo de las respuestas del sistema bajo control en lazo cerrado sin desacople y con los diferentes desacoples, arroja unos resultados en los que se puede apreciar que el desacople simplificado es el que más disminuye el efecto del acoplamiento, seguido del simplificado de estado estacionario y el desacople generalizado.

El trabajo de investigación fue financiado por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. UPB seccional Bucaramanga, kilómetro 7 vía Bucaramanga a Piedecuesta (Santander).

Cómo citar este artículo:

J.F. Ricardo Barrera, & E. Barrios Urueña, "Control multivariable lineal con desacople en un intercambiador de calor." *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 17-25, Enero, 2017.

2. ANTECEDENTES

En cuanto a publicaciones de trabajos anteriores relacionados con el control de intercambiadores de calor, como también con el control multivariable lineal, se describen sus resultados principales.

Según [1], se obtuvieron resultados de una simulación para una solución basada en el control óptimo aplicado a una red de intercambiadores de calor con derivación, los cuales mostraron que se puede lograr casi un desacoplo total entre las variables del proceso; adicionalmente, se manejó la estrategia de control H infinito.

No obstante [2], emplearon una metodología QFT en el desarrollo de un controlador multivariable robusto de un intercambiador de calor a escala de laboratorio, en el cual se tomaron en cuenta las incertidumbres y las no linealidades del proceso; con el fin de establecer robustez para el seguimiento al valor de la Consigna.

Además [3], utilizaron el modelo difuso Takagi-Sugeno, con el fin de diseñar controladores adecuados para el control de un intercambiador de calor de carcasa y tubo. La variable controlada fue la temperatura de la salida de la corriente de calentamiento y la variable manipulada fue el caudal volumétrico de la corriente de calentamiento. Los diseños de los controladores estuvieron probados mediante simulaciones en el entorno Matlab/Simulink, cuyos resultados, comparados con el control PID clásico, confirmaron el control exitoso del intercambiador de calor.

Así mismo [4], compararon los resultados de dos estrategias de control en una planta piloto de Intercambiador de Calor, al emplear Control Predictivo Generalizado y Control Adaptativo Predictivo Generalizado. Un modelo de entrada única salida única (SISO) se utilizó para fines de control, en donde los parámetros del modelo se calcularon en línea usando un algoritmo de identificación basado en el método de mínimos cuadrados recursivos (RLS). Los resultados obtenidos demuestran la eficacia y la superioridad del algoritmo propuesto en el Control Adaptativo Predictivo Generalizado.

Al respecto [5], en otro análisis comparativo de respuestas entre diferentes estrategias de control desacoplado para hacer la regulación del nivel en un tanque de doble proceso, utilizaron un método de control simple basado

en la división de dos lazos con controladores PID SISO, y luego se compararon las respuestas con las de otros métodos de control desacoplado, que involucraron desacoplamientos simplificado e ideal. Los controladores desacoplados diseñados fueron probados con éxito usando un PLC y MATLAB.

En tanto [6], desarrollaron un nuevo método de control centralizado PI/PID para procesos TITO, en el que se utilizó la intercomunicación descentralizada de un control con múltiples escalas no convencional. Se usaron ecuaciones de ajuste matemáticos para convertir sistemáticamente los controladores en una forma de controladores PID industriales centralizados.

De manera adicional [7], propusieron un control parcialmente descentralizado (PDC) para el problema de una caldera de referencia en el marco del cambio de carga y presión; puesto que, los sistemas de calderas son procesos multivariables no lineales que muestran grandes interacciones, como también, presentan restricciones de entrada en una amplia gama de condiciones de funcionamiento. En este trabajo se aplicó un método que combina las ventajas de un control descentralizado y las de un control centralizado multivariable, que consideró el acoplamiento de las plantas.

También [8], utilizaron dos controladores PI descentralizados para un sistema TITO que empleó desacoples, y que fueron diseñados tomando en cuenta las matrices de las funciones de transferencia del proceso y la del desacoplador, lográndose un rendimiento efectivo.

En tanto [9], diseñaron e implementaron dos controladores IMC-PI, para un proceso de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) con comportamiento no lineal, basado en cuatro tanques, de manera que el nivel del agua puede mantenerse en las posiciones deseadas en los dos tanques superiores sin tener en cuenta la interacción entre ellos. Se encontró que los controladores IMC-PI no pueden proporcionar el rendimiento satisfactorio debido a la interacción entre los tanques; por lo tanto, se usaron desacopladores que mejoraron el rendimiento del sistema bajo control en lazo cerrado.

3. METODOLOGÍA

Las etapas principales que fueron necesarias para la realización del proyecto de investigación fueron: estableci-

miento de una planta térmica, modelado de la planta térmica, sintonización de los controladores para la planta térmica, desacople simplificado de estado estacionario para la planta térmica, desacople simplificado para la planta térmica, desacople generalizado para la planta térmica, control multivariable lineal en Hysys.

3.1 Establecimiento de una planta térmica

El sistema térmico implementado en Hysys (Ver Figura 1) mediante el uso de un Intercambiador de Calor, Válvulas, caudales volumétricos para el agua que ingresa por los Tubos y la Carcasa, junto con otros elementos, poseen determinadas características (Ver Tabla 1).

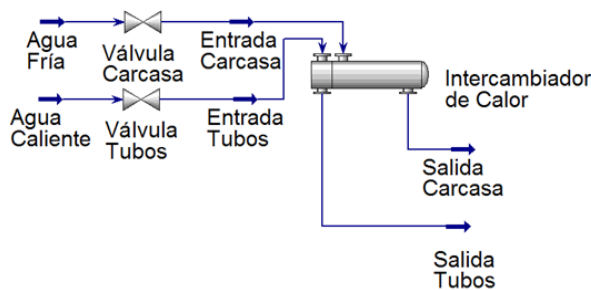


Figura 1. Sistema Térmico implementado en Hysys.

Tabla 1. Características de la Planta Térmica en Hysys.

Parámetro	Valor
Set-Point en los Tubos	60 °C
Set-Point en la Carcasa	41 °C
Perturbación en Tubos	- 8 °C
Perturbación en Carcasa	- 8 °C
Temperatura a la Entrada de los Tubos	80 °C
Presión a la Entrada de los Tubos	26.5 psia
Caudal Volumétrico en los Tubos	280 Lt/min
Temperatura a la Entrada de la Carcasa	20 °C
Presión a la Entrada de la Carcasa	26.5 psia
Caudal Volumétrico en la Carcasa	280 Lt/min

3.2 Modelado de la planta térmica

Mediante el uso de la identificación de sistemas fueron determinados los modelos de la planta térmica con Funciones de Transferencia mostradas en las cuatro ecuaciones a continuación:

$$G_{11}(s) = \frac{0.4241}{148.6s + 1} \quad (1)$$

$$G_{12}(s) = -\frac{0.214}{(142.2s + 1)(28.4s + 1)} \quad (2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{0.0695}{(126s + 1)(26.4s + 1)} \quad (3)$$

$$G_{22}(s) = -\frac{0.5}{150s + 1} \quad (4)$$

$G_{11}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia los Tubos, con la Temperatura en la Salida de los Tubos. $G_{21}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia los Tubos, con la Temperatura en la Salida de la Carcasa. $G_{12}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia la Carcasa, con la Temperatura en la Salida de los Tubos. $G_{22}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia la Carcasa, con la Temperatura en la Salida de la Carcasa.

El modelo matemático del sistema basado en las anteriores cuatro funciones de transferencia, corresponde al siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 2). U_T es el Porcentaje de Apertura de la Válvula en la entrada de los Tubos, U_S es el Porcentaje de Apertura de la Válvula en la entrada de la Carcasa, Y_T o PV_{Tubos} es la Temperatura del agua a la salida de los Tubos, Y_S o $PV_{Carcasa}$ es la Temperatura del agua a la salida de la Carcasa.

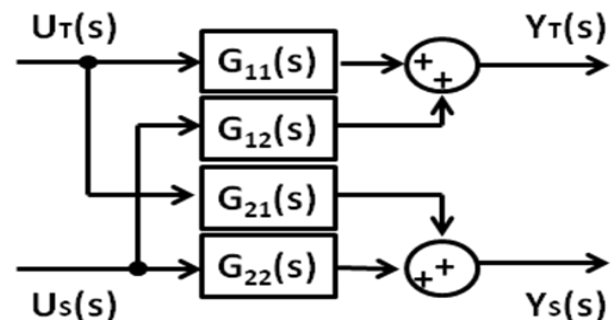


Figura 2. Modelo matemático del Sistema Térmico.

Luego se obtuvo la Matriz de Ganancias Relativas o RGA, expresada de la siguiente manera:

$$RGA[G(0)] = \begin{bmatrix} 1.075 & -0.075 \\ -0.075 & 1.075 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Según el resultado obtenido en la RGA el emparejamiento se muestra a continuación:

$$G_{TT}(s) = G_{11}(s) = \frac{0.4241}{148.6s + 1} \quad (6)$$

$$G_{SS}(s) = G_{22}(s) = -\frac{0.5}{150s + 1} \quad (7)$$

La función de Transferencia que representa el sistema de los Tubos es $G_{11}(s)$, y para la Carcasa es $G_{22}(s)$.

3.3 Sintonización de los Controladores para la Planta Térmica

Los controladores PI para controlar las temperaturas de los Tubos y la Carcasa, fueron sintonizados con la aplicación del diseño IMC y se terminaron de ajustar a través de pruebas en Simulink. Los controladores PID según la aplicación del diseño IMC son para sistemas FOPDT y Segundo orden.

$$PI(s)_{Tubos} = 2.33 \left(1 + \frac{1}{148.6 s} \right) \quad (8)$$

$$PI(s)_{Carcasa} = 2 \left(1 + \frac{1}{150 s} \right) \quad (9)$$

3.4 Desacople Simplificado de Estado Estacionario para la Planta Térmica

El desacoplador Simplificado de Estado Estacionario, consiste en dos compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema. El teorema del valor final es aplicado a cada una de las Funciones de Transferencia usadas en la determinación de los Desacoplos o Compensadores correspondientes.

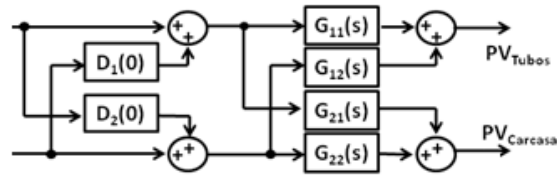


Figura 3. Ubicación del Desacoplador Simplificado de Estado Estacionario.

En la Ecuación 10 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_1(0)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_1(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_2(s)$ con la Salida 1 o $Y_1(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 2 y la Salida 1.

En la Ecuación 11 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_2(0)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_2(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_1(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 1 y la Salida 2.

A continuación se muestran las ecuaciones que permiten encontrar el desacoplador Simplificado de Estado Estacionario.

$$D_1(0) = -\frac{G_{12}(0)}{G_{11}(0)} = -\frac{-0.214}{0.4241} = 0.5 \quad (10)$$

$$D_2(0) = -\frac{G_{21}(0)}{G_{22}(0)} = -\frac{0.0695}{-0.5} = 0.139 \quad (11)$$

3.5 Desacople Simplificado para la Planta Térmica

El desacoplador Simplificado, consiste en dos compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema.

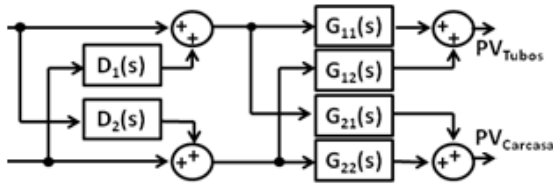


Figura 4. Ubicación del Desacoplador Simplificado.

En la Ecuación 12 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_1(s)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_T(s)$ con la Salida 2 o $Y_T(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_S(s)$ con la Salida 1 o $Y_T(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 2 y la Salida 1.

En la Ecuación 13 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_2(s)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_S(s)$ con la Salida 2 o $Y_S(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_T(s)$ con la Salida 2 o $Y_S(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 1 y la Salida 2.

A continuación se muestran las ecuaciones que permiten encontrar el desacoplador Simplificado.

$$D_1(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = 0.5 \frac{(148.6s + 1)}{(142.2s + 1)(28.4s + 1)} \quad (12)$$

$$D_2(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = 0.139 \frac{(150s + 1)}{(126s + 1)(26.4s + 1)} \quad (13)$$

3.6 Desacople Generalizado para la Planta Térmica

El desacoplador Generalizado (Ver Figura 5), consiste en cuatro compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema. A diferencia de los desacopladores Simplificado de Estado Estacionario y Simplificado, el desacoplador Generalizado posee cuatro compensadores, y cada uno de ellos hace uso de las cuatro funciones de transferencia del sistema $G(s)$, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones matriciales.

$$D(s) = G(s)^{-1} G_R(s) \quad (14)$$

$$G_R(s) = \text{Diagonal}(G(s)) \quad (15)$$

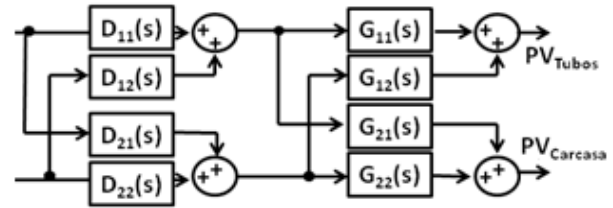


Figura 5. Ubicación del Desacoplador Generalizado.

Para el modelo matemático de la Planta Térmica $G(s)$ hecho con las cuatro Funciones de Transferencia $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, y $G_{22}(s)$, los compensadores $D_{11}(s)$, $D_{12}(s)$, $D_{21}(s)$, y $D_{22}(s)$ son los siguientes:

$$D_{11}(s) = 1 \frac{(142s + 1)(28s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (16)$$

$$D_{12}(s) = 0.5 \frac{(148s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (17)$$

$$D_{21}(s) = 0.138 \frac{(150s + 1)(142s + 1)(28s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (18)$$

$$D_{22}(s) = 1 \frac{(142s + 1)(28s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (19)$$

3.7 Control Multivariable Lineal en Hysys

Se realizó en Hysys los controles multivariable lineales basados en PI para manejar el sistema modelado con RGA (Ver Figura 6), Funciones de Transferencia y Desacoplador Simplificado de Estado Estacionario (Ver Figura 7), Funciones de Transferencia y Desacoplador Simplificado (Ver Figura 8), y Funciones de Transferencia y Desacoplador Generalizado (Ver Figura 9).

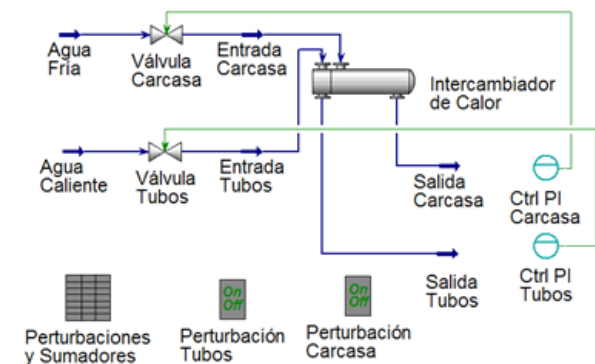


Figura 6. Control en Lazo Cerrado sin Desacople.

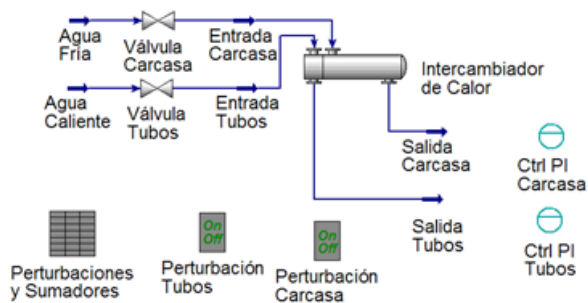


Figura 7. Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado de Estado Estacionario.

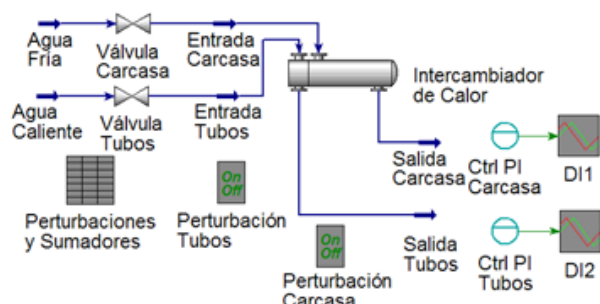


Figura 8. Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado.

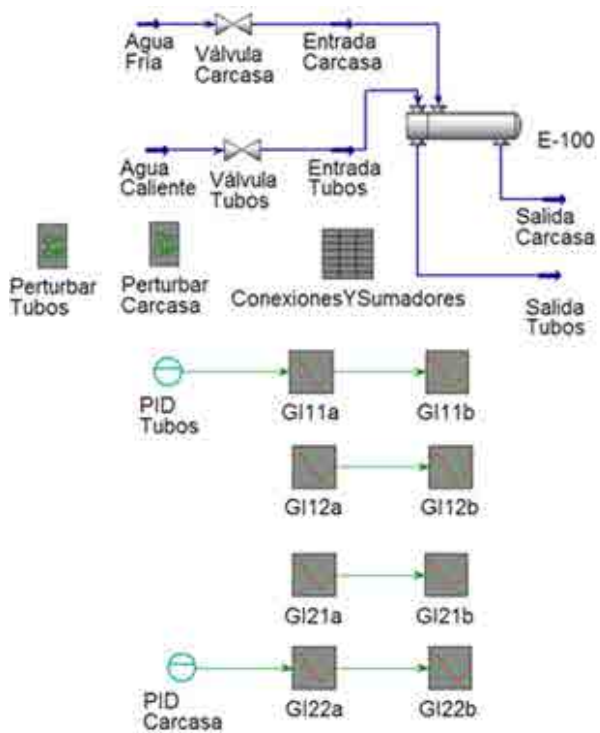


Figura 9. Control en lazo cerrado con desacople generalizado.

4. RESULTADOS

En los siguientes párrafos se realiza un análisis comparativo al implementarse los diseños de control multivariable lineal, mediante mediciones de las respuestas transitorias y de estado estacionario, frente a perturbaciones en las salidas del sistema. El sistema completo bajo control en lazo cerrado con desacoplos o sin éstos se representa en el siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 10).

Los valores de Consigna (SP) para las temperaturas a las salidas de los Tubos y de la Carcasa son 60°C y 41°C respectivamente, las perturbaciones cuando son aplicadas directamente sobre una de las dos salidas, hacen que ésta baje 8°C.

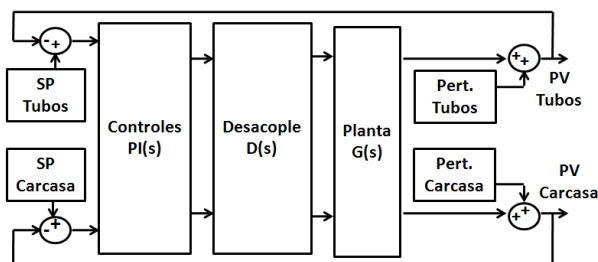


Figura 10. Diagrama de Bloques que representa al sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacoplos o sin éstos.

En las siguientes cuatro Figuras desde la 11 hasta la 14, se pueden apreciar los valores de las Temperaturas a las salidas de los Tubos (Color Rojo) y de la Carcasa (Color Azul). Cuando una salida es perturbada se puede apreciar el efecto de la perturbación sobre la otra salida, bajo control en lazo cerrado sin desacoplos y con éstos.

Durante la realización de una prueba bajo control en lazo cerrado sin desacople en Hysys, en la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de la Carcasa (Color Azul) y luego la de los Tubos (Color Rojo), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la gráfica a continuación (Ver Figura 11).

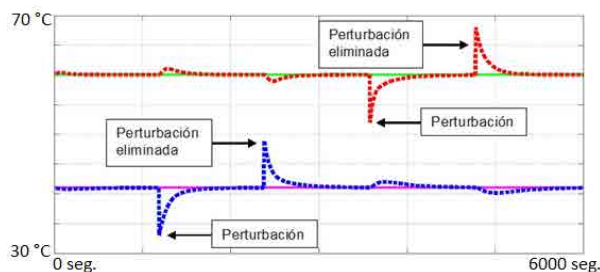


Figura 11. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado sin desacople.

En otra prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Simplificado de Estado Estacionario en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 12).

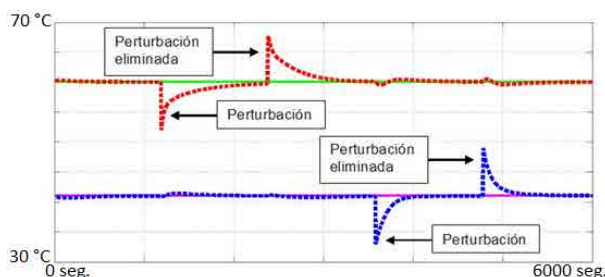


Figura 12. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacople simplificado de estado estacionario.

Así mismo, en otra prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Simplificado en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 13).

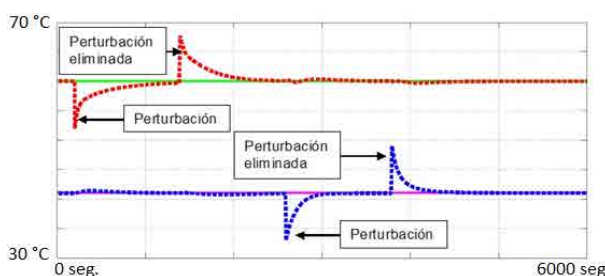


Figura 13. Respuesta del Sistema Térmico bajo Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado.

De igual manera, una última prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Generalizado en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 14).

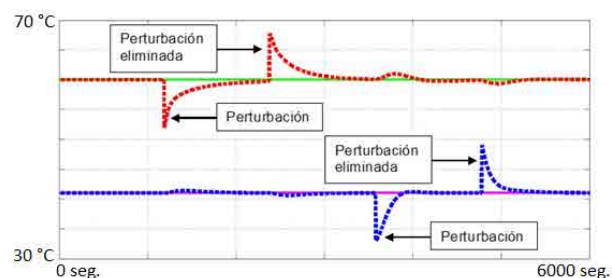


Figura 14. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacople generalizado.

En las siguientes cuatro Tablas desde la 2 hasta la 5, se pueden apreciar los tiempos que requiere la salida que no es perturbada directamente, bajo el control en lazo cerrado con desacoples y sin éstos.

Tabla 2. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en la carcasa cuando se aplica la perturbación en los tubos.

Tipo de Desacople	Tiempo
Sin Desacople (Ninguno)	484
Simplificado de Estado Estacionario	73
Simplificado	0
Generalizado	0

Tabla 3. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en la Carcasa cuando se remueve la Perturbación en los Tubos.

Tipo de Desacople	Tiempo
Sin Desacople (Ninguno)	508
Simplificado de Estado Estacionario	0
Simplificado	0
Generalizado	77

Tabla 4. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en los Tubos cuando se aplica la Perturbación en la Carcasa.

Tipo de Desacople	Tiempo
Sin Desacople (Ninguno)	175
Simplificado de Estado Estacionario	0
Simplificado	0
Generalizado	232

Tabla 5. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en los tubos cuando se remueve la perturbación en la carcasa.

Tipo de Desacople	Tiempo
Sin Desacople (Ninguno)	164
Simplificado de Estado Estacionario	0
Simplificado	0
Generalizado	101

En las siguientes cuatro Tablas desde la 6 hasta la 9, se pueden apreciar los máximos porcentajes de error relativos que sufre la salida que no es perturbada directamente, bajo el control en lazo cerrado con desacoples y sin éstos.

Tabla 6. Máximo Porcentaje de error relativo en la temperatura de la carcasa cuando se aplica la perturbación en los tubos.

Tipo de Desacople	% de Error Relativo
Sin Desacople (Ninguno)	1.022 %
Simplificado de Estado Estacionario	0.951 %
Simplificado	0.926 %
Generalizado	1.024 %

Tabla 7. Máximo porcentaje de error relativo en la temperatura de la carcasa cuando se remueve la perturbación en los tubos.

Tipo de Desacople	% de Error Relativo
Sin Desacople (Ninguno)	2.146 %
Simplificado de Estado Estacionario	0.609 %
Simplificado	0.585 %
Generalizado	1.048 %

Tabla 8. Máximo porcentaje de error relativo en temperatura de los tubos cuando se aplica la perturbación en la carcasa.

Tipo de Desacople	% de Error Relativo
Sin Desacople (Ninguno)	1.650 %
Simplificado de Estado Estacionario	0.866 %
Simplificado	0.550 %
Generalizado	1.600 %

Tabla 9. Máximo porcentaje de error relativo en la temperatura de los tubos cuando se remueve la perturbación en la carcasa.

Tipo de Desacople	% de Error Relativo
Sin Desacople (Ninguno)	1.800 %
Simplificado de Estado Estacionario	0.766 %
Simplificado	0.500 %
Generalizado	1.100 %

Debido a que el modelo del sistema es nuevo, y por lo tanto, no hay antecedentes de controladores sobre el sistema trabajado, solo se pueden tomar en cuenta los datos registrados en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, que son los resultados obtenidos del análisis del comportamiento del sistema frente a perturbaciones para los diferentes tipos de desacoples que se emplearon. Según éstos datos, se puede apreciar que el desacople simplificado es el que más disminuye el efecto del acoplamiento, seguido del desacople simplificado de estado estacionario; lo que conlleva a que, el desacople generalizado es el más complejo para calcular y es el que menos ayuda a disminuir el efecto del acoplamiento.

Los tipos de desacoples recomendados para ser usados son el Simplificado y el Simplificado de Estado Estacionario, que pueden ser implementados en controladores lógicos con capacidad para realizar cálculos mediante las cuatro operaciones aritméticas a números de punto flotante, ya que el Simplificado requiere el uso de Ecuaciones en Diferencias, mientras que el Simplificado de Estado Estacionario necesita las multiplicaciones por constantes y las sumas.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo matemático de una planta térmica basada en un intercambiador de calor de tubos y carcasa bajo ambiente virtual en Hysys, cerca de las temperaturas de operación, dado que el sistema posee temperaturas constantes en los caudales entrantes a los tubos y la carcasa.

Los desacoples se calcularon sobre un modelo matemático lineal de la planta obtenido para las temperaturas de operación.

Se implementaron controladores PI para regular las temperaturas a las salidas de los tubos y la carcasa en Hysys, sintonizados mediante la aplicación del diseño.

Según los resultados al analizar el comportamiento del sistema en Hysys frente a perturbaciones para los diferentes tipos de desacoples empleados, el compensador que presentó mejor desempeño fue el Simplificado, seguido del Simplificado de Estado Estacionario y el Generalizado

Los resultados obtenidos en Hysys son debidos a que se emplean modelos no lineales que dan mayor aproximación al comportamiento de un sistema real.

El Desacople Generalizado al usar las cuatro funciones de transferencia de la planta identificada, requirió un procedimiento matemático complejo como también lo fue su implementación en Hysys.

El compensador usado para el Desacople Generalizado en Hysys necesitó ser ajustado de manera empírica después de haber sido calculado.

REFERENCIAS

- [1] F. Delatore, F. Leonardi, L. Novazzi, J. Da Cruz, Multivariable H-Infinity model matching control of a heat exchanger network (HEN) with bypasses. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/icca.2011.6138094>.
- [2] J. Rico, M. Gil-Martinez, Multivariable QFT robust control of a heat exchanger. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983125>.
- [3] A. Vasičkaninová, M. Bakošová, Control of a heat exchanger using Takagi-Sugeno fuzzy model. IEEE Xplore Digital Library, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2014.6843684>.
- [4] Z. Zidane, M. Lafkih, M. Ramzi, Adaptive Generalized Predictive Control of a heat exchanger pilot plant. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/icmcs.2011.5945715>.
- [5] D. Kajzr, M. Diblík, L. Beran, L. Hubka, The possibilities for design and implementation of multivariate control for a level control in a double tank process. IEEE Xplore Digital Library, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2016.7501112>.
- [6] J. Nandong, Synthesis of multivariable PID controllers via inter-communicative decentralized multi-scale control for TITO processes. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ascc.2015.7244403>.
- [7] C. Fu, W. Tan, Partially decentralized control based on IMC for a benchmark boiler. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ccdc.2015.7161662>.
- [8] M. Sirsat, B. Parvat, C. Kadu, Design of decentralized PI controller for two-input, two-output processes. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/icesa.2015.7503390>.
- [9] S. Datta, U. Nath, C. Dey, Design and implementation of decentralized IMC-PI controllers for real time coupled tank process. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2015.1613>.