

Diseño y simulación de un sistema de control de matriz dinámica multivariable

Valentina López Bautista y Sebastián David Velasco Gaona

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad: investigación

Director

Omar Andrés Benavides Prada

M.Sc. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. Estado del arte	13
3. Marco Teórico.....	15
4. Metodología.....	20
5. Resultados.....	23
5.1 Simulación y caracterización del proceso.	23
5.2 Diseño del controlador de matriz dinámica.....	26
5.3 Implementación del controlador de matriz dinámica.	29
5.4 Sintonización de un DMC tipo MIMO.	32
5.5 Control predictivo vs control <i>feedback</i>	41
6. Conclusiones.....	47
7. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	51

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama metodológico	20
Figura 2. Tanque de mezclado con agitación interna.....	21
Figura 3. Simulación del proceso: tanque de mezclado con agitación interna.	23
Figura 4. Respuesta de $c_1(t)$ y $c_2(t)$ ante el cambio escalón en $m_1(t)$	24
Figura 5. Respuesta de $c_1(t)$ y $c_2(t)$ ante el cambio escalón en $m_2(t)$	24
Figura 6. Simulación del proceso en lazo cerrado	26
Figura 7. Configuración del controlador DMC en Simulink.....	27
Figura 8. Algoritmo para la implementación de un controlador de matriz dinámica.	27
Figura 9. Comportamiento del nivel del tanque a la perturbación realizada en la referencia	29
Figura 10. Comportamiento de la temperatura a la perturbación realizada en la referencia del nivel.....	29
Figura 11. Comportamiento del nivel del tanque a la perturbación realizada en la referencia Temperatura.	30
Figura 12. Comportamiento de la temperatura a la perturbación realizada en la referencia.	30
Figura 13. Comportamiento de m_1 y m_2 al realizar la perturbación en la referencia del nivel .	31
Figura 14. Comportamiento de m_1 y m_2 al realizar la perturbación en la referencia de Temperatura.	32
Figura 15. Respuesta de nivel ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 7,5$	34
Figura 16. Respuesta de Temperatura ante el cambio en el nivel utilizando $\lambda = 7,5$	35
Figura 17. Respuesta del nivel ante el cambio en la temperatura utilizando $\lambda = 7,5$	35
Figura 18. Respuesta de la Temperatura ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 7,5$	36

Figura 19. Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en hset, con $\lambda = 7,5$	37
Figura 20. Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en T3set con $\lambda = 7,5$	37
Figura 21. Cambio de 10 % referencia de nivel.	38
Figura 22. Cambio de 10 % referencia de temperatura.	39
Figura 23. Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en hset, con $\lambda = 4,5$	39
Figura 24. Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en T3set con $\lambda = 4,5$	40
Figura 25. Esquema de la interacción de un proceso 2x2 general.	41
Figura 26. Respuesta del controlador PI ante un cambio en set point de Temperatura.	43
Figura 27. Respuesta del controlador PI ante un cambio en set point de nivel.	44
Figura 28. Comportamiento entre PI y DMC ante un cambio en C1set.	45
Figura 29. Comportamiento entre PI y DMC ante un cambio en C2set.	46

Lista de tablas

Tabla 1. Modelo matemático en estado transitorio.	21
Tabla 2. Constantes de tiempo y tiempo muerto del proceso.....	25
Tabla 3. Diseño para el control de matriz dinámica utilizando el método de Shridhar & Cooper.	34
Tabla 4. Ganancia relativa del proceso.	42
Tabla 5. Validación de parámetros para la utilización de un controlador PI.....	42
Tabla 6. Parámetros de diseño para un controlador proporcional-integral.	43

Lista de apéndices

Apendice A. Condiciones de operación para el caso de estudio	51
Apendice B. Matriz dinámica con $PH=50$, $CH=3$ y $\lambda_2 = 0$	52
Apendice C. Resultados de la simulación del primer incremento de las señales manipuladas con sus derivadas numéricas. Con cambio del 10 % en la referencia del nivel.	55
Apendice D. Resultados de la simulación del primer incremento de las señales manipuladas con sus derivadas numéricas. Con cambio del 10 % en la referencia de la temperatura.....	56
Apendice E. Resultados obtenidos utilizando el método de sintonización propuesto por Manzanera Reverter, C. (2017).....	57
Apendice E. Simulación de los dos lazos de control feedback.....	59

Glosario

Factor de supresión (λ): parámetro que penaliza los movimientos de la variable manipulada, permitiendo disminuir la agresividad de su respuesta (Shridhar & Cooper, 1998).

Horizonte de control (CH): representa al número de movimientos de la variable manipulada que el DMC computa durante el tiempo de muestreo con el fin de eliminar el error actual(Shridhar & Cooper, 1998).

Horizonte de predicción (PH): representa el número de muestras en el futuro sobre las cuales el DMC computa el perfil predicho de la variable de proceso para minimizar el error predicho (Shridhar & Cooper, 1998).

Periodo de muestreo (T): es la frecuencia con la que se toman los datos de respuesta del proceso ante un cambio en la señal de control. (Mejía, 1998)

Set point (): Es el valor de referencia en el que se desea que el controlador mantenga la variable controlada del proceso (Smith & Corripio, 2016).

Variable controlada (c): variable que se pretende mantener en un valor deseado (Smith & Corripio, 2016).

Variable manipulada (m): variable del proceso que permite mantener la variable controlada en su valor de *referencia* (Smith & Corripio, 2016).

Resumen

Título: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE MATRIZ DINÁMICA MULTIVARIABLE.

Autores: Valentina López Bautista, Sebastián David Velasco Gaona.

Palabras Clave: control de matriz dinámica, sintonización

Descripción: Industrialmente, los métodos de control predictivo han sido ampliamente utilizados porque permiten mejorar el desempeño de los procesos, al anticipar las perturbaciones en el sistema utilizando principios de funcionamiento intuitivos. Sin embargo, la cantidad de investigaciones aún es limitado, por ende, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar mediante simulación computacional, un sistema de control predictivo de matriz dinámica multivariable, implementado con el modelo de un tanque mezclador. La metodología del estudio incluye la simulación del proceso en Simulink, permitiendo la caracterización del sistema en lazo abierto y cerrado. Se realiza la implementación del controlador DMC y se exploran dos métodos de sintonización: Shridhar & Cooper, (1998) y las reglas de diseño propuestas por Manzanera Reverter, C. (2017), particularmente enfocados en el uso del factor de supresión para suavizar los movimientos de las válvulas de control, reduciendo la agresividad de la señal de control. Para evaluar el desempeño del DMC, se realiza la comparación con un sistema de control convencional tipo *feedback*, resaltando la importancia y eficacia del control predictivo.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director M.Sc. Omar Andrés Benavides Prada

Abstract

Title: DESIGN AND SIMULATION OF A MULTIVARIABLE DYNAMIC MATRIX CONTROL SYSTEM.

Authors: Valentina López Bautista, Sebastián David Velasco Gaona.

Key Words: Dynamic Matrix Control, tuning.

Description: Industrially, predictive control methods have been widely used because they allow to improve process performance by anticipating improve process performance by anticipating disturbances in the system using intuitive operating principles.

However, the amount of research is still limited; the refore, the present research work aims to design, by means of computational simulation, a dynamic matrix predictive multivariable control system, implemented with the model of a mixing tank. The methodology simulation of the process in Simulink, allowing the characterization of the system in open and closed loops. The implementation of the controller is implemented and two tuning methods are explored: Shridhar & Cooper, (1998) and the design rules proposed by Manzanera Reverter, C. (2017), particularly focused on the use of the suppression factor to smooth the movements of the control valves, reducing the aggressiveness of the control signal.

In order to evaluate the performance of the DMC, the comparison is made with a conventional feedback control system, highlighting the importance and effectiveness of the predictive control.

*Bachelor thesis.

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: M.Sc. Omar Andres Benavides Prada.

Introducción

En el ámbito industrial, el control automático es fundamental para mejorar la eficiencia de los procesos, mantener la calidad del producto y proveer seguridad. La estrategia más común es el control por retroalimentación PID (Proporcional, Integral, Derivativo), el cual compensa las perturbaciones manipulando una variable de entrada, luego de comparar la variable controlada con el valor de referencia (*set point*); sin embargo, en este escenario el sistema ya tuvo que sufrir la perturbación para poder realizar el control (Smith & Corripio, 2016). Por ello, en los últimos años han tomado gran importancia las técnicas de control avanzado como el control predictivo basado en modelos (MPC) (Restrepo et al., 2014), donde se genera una acción que prevé un comportamiento futuro del proceso a partir del instante actual y el pasado, basándose en la descripción dinámica del sistema (Urrego, 2015).

Entre los algoritmos de MPC más aplicados se encuentra el control dinámico matricial (DMC por sus siglas en inglés) (Lopera & Mejía, 2010), el cual puede clasificarse como de lazo simple, tipo SISO (Single Input, Single Output), o multivariable, tipo MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Así mismo, solo se reportan dos trabajos enfocados en DMC elaborados en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (Castillo & Guerrero, 2017) (Alcalá & Suárez, 2023), significando una oportunidad para profundizar en el desarrollo de esta línea de control de procesos. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es extender lo reportado por Alcalá & Suarez (2023) en su trabajo de grado basado en DMC tipo SISO, mostrando el diseño y la implementación computacional un control de matriz dinámica tipo MIMO.

Inicialmente, se describe el funcionamiento y los fundamentos matemáticos de diseño del DMC multivariable. Posteriormente, se toma un caso de estudio reportado en la literatura y, a partir

del modelo matemático del proceso, se presenta su caracterización dinámica mediante simulación computacional y la implementación del sistema de control MIMO. Finalmente, se evalúa el desempeño del lazo de control, evaluando diferentes estrategias de sintonización y realizando una comparación con el actuar de controladores tipo feedback.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar, mediante simulación computacional, un sistema de control predictivo de matriz dinámica multivariable.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar un controlador de matriz dinámica tipo MIMO para un caso de estudio reportado en la literatura.
- Evaluar el desempeño del controlador predictivo multivariable al implementar diferentes estrategias de sintonización.

2. Estado del arte

Al final de los años setenta se desarrollaron los primeros algoritmos del control predictivo basado en modelos (MPC), entre los cuales se destaca el controlador dinámico matricial (DMC) publicado por Cutler et al., (1980), de gran aceptación en la industria petroquímica. Dicho trabajo se enfocó en la resolución de problemas complejos de control a partir de la formulación de mínimos cuadrados, con la finalidad de que se pudiera tener comprensión de los tiempos muertos y del comportamiento dinámico inusual, incorporando el control anticipativo y multivariable (Cutler & Ramaker, 1980).

Posteriormente, Sanjuán Mejía, (1998) explicó el fundamento matemático para un controlador DMC tipo SISO y la metodología para su implementación en un caso de estudio (sistema de control de temperatura de homogenización al interior de un tanque). El autor afirma que el modelo se puede extender a una estrategia multivariable sin la necesidad de reescribir el código, teniendo presente el incremento del horizonte de predicción y la implementación de un factor de supresión (Mejía, 1998).

Luego, Gómez & Correa, (2009) emplearon la programación cuadrática para implementar un conjunto de restricciones a un algoritmo de MPC, que actúa como control supervisorio en un horno de calentamiento de crudo con un sistema PID preexistente. Concluyeron que, aunque el control PID permite mantener la variable controlada en el valor de referencia establecido, el MPC hace posible que el sistema opere cerca de las condiciones óptimas de operación (límite de restricción), incrementando la eficiencia, la carga total, el tiempo de operación y, por ende, su potencial económico (Gómez & Correa, 2009).

Respecto al desarrollo de reglas de diseño y sintonización, Manzanera Reverte, (2017) enfocó su trabajo en controladores DMC monovariantes y multivariantes sin restricciones,

basándose en el estudio de parámetros como: horizonte de predicción, horizonte de control y factor de supresión en respuesta temporal. El autor validó sus resultados con casos de estudio tomados de la literatura (columnas de destilación), comparando sus resultados con otros métodos de sintonización reportados. Así mismo, su trabajo indicó que, al seleccionar el factor de supresión, es importante considerar su rango de influencia y su efecto en cada variable controlada (Manzanera Reverter, 2017).

Finalmente, en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander se han realizado dos proyectos sobre control predictivo. Castillo & Guerrero, (2017) propusieron para una torre de destilación de crudos industrial implementar la estrategia de control DMC, evaluando su desempeño en sistemas tipo SISO y tipo MIMO, al compararlos con un control feedback en cascada. Reportaron que el control en cascada presenta un comportamiento brusco que afecta las válvulas con respecto al DMC, que muestra movimientos suaves del elemento final de control; además, reportan que la estrategia con el mejor rendimiento es la multivariable al tener una respuesta más rápida y menor demanda de energía para operar la torre. Sin embargo, no exponen el diseño ni los algoritmos requeridos para el funcionamiento de los controladores. Por otra parte, Alcalá & Suárez, (2023) presentan detalladamente el diseño de un controlador DMC tipo SISO para un tanque de calentamiento con agitación, evaluando su sintonización por medio de 3 métodos diferentes: heurístico, por ajuste para un MPC SISO no restringido, y por ecuación de ajuste para un DMC en bucles SISO; también, los autores valoraron su desempeño respecto a un controlador feedback PI, concluyendo que el control DMC presenta un menor tiempo de estabilización, no muestra sobrepaso y hace movimientos suaves de válvula (Alcalá & Suárez, 2023). En esta última referencia se recomienda extender la investigación a un escenario multivariable, siendo esto el punto de partida para el presente trabajo.

3. Marco Teórico

El MPC es una estrategia de control que se fundamenta en la utilización de un modelo para predecir el comportamiento del proceso a lo largo de un horizonte temporal especificado por el usuario, calculándose los valores requeridos en las variables manipuladas para hacer que las variables controladas permanezcan en sus valores de referencia (López & Cantero, 2010). Entre los diferentes algoritmos de control MPC que existen se encuentra el DMC, el cual se basa en el principio de superposición: como se conoce la respuesta del sistema ante una modificación en la variable manipulada, se puede encontrar la señal del controlador requerida para obtener el cambio deseado; de igual forma, al saber cómo afecta una perturbación a la variable de control, es viable calcular una señal en el controlador que neutralice la desviación registrada (Cooper, 2005). La técnica emplea una matriz dinámica que almacena los valores obtenidos a partir del modelo de respuesta del sistema a un cambio tipo escalón, y considera la perturbación constante a lo largo del horizonte de predicción.

Para un controlador DMC, la variable de respuesta ante un cambio tipo escalón puede expresarse como lo muestra la Ec.1:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t - i) \quad (\text{Ec.1})$$

Donde, $y(t)$ es la respuesta del sistema, g_i son los coeficientes a la respuesta escalón, Δu son los incrementos de control, y y_0 el valor en estado estable de variable controlada. Para calcular predicciones es necesario definir un número de pasos al futuro (k/t); por ende, la variable de respuesta se redefine así:

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t + k - i) + \hat{n}(t + k|t) \quad (\text{Ec.2})$$

El término $\hat{n}(t+k|t)$ es la perturbación de la predicción, mejor conocido como el error de predicción. Por lo tanto, suponiendo que la mejor estimación de los valores futuros de la perturbación $\hat{n}(t+k|t)$ es el valor actual $\hat{n}(t|t)$ (Serrano, 1994), se tiene la Ec.3.

$$\hat{n}(t+k|t) = \hat{n}(t|t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (\text{Ec.3})$$

En la Ec.3, $y_m(t)$ es la salida medida de la planta. Entonces, la Ec.2 puede ser escrita como:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + f(t+k) \quad (\text{Ec.4})$$

Donde, $f(t+k)$ es la respuesta libre del sistema, lo que significa que es la parte de la respuesta que no depende de la acción de control que se plantea a futuro:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{i+k} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (\text{Ec.5})$$

Si el proceso es autorregulado, es decir, que el mismo sistema se regula en un nuevo valor y se estabiliza a lo largo de cierto tiempo, los coeficientes g_i de la respuesta al escalón tienden a ser constantes después de M periodos de muestreo; por lo tanto:

$$g_{i+k} - g_i \approx 0, \quad i > M$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la respuesta libre se calcula como:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^M (g_{i+k} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (\text{Ec.6})$$

Ahora, las predicciones se pueden determinar a lo largo del horizonte de predicción $k = 1, 2, \dots, PH$, considerando CH acciones de control:

$$\hat{y}(t+1|t) = g_1 \Delta u(t) + f(t+1)$$

$$\hat{y}(t+2|t) = g_2 \Delta u(t) + g_1 \Delta u(t+1) + f(t+2)$$

.....

$$\hat{y}(t + PH|t) = \sum_{i=PH-CH+1}^{PH} g_i \Delta u(t + PH - i) + f(t + PH)$$

Por lo tanto, es posible definir una matriz dinámica de proceso de la siguiente forma:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{CH} & g_{CH-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{PH} & g_{PH-1} & \dots & g_{PH-CH+1} \end{bmatrix}$$

El número de columnas de G representa el horizonte de control (CH), definido por la cantidad de movimientos de válvula que realizara el controlador; típicamente, el CH se fija entre 6 y 10 (Manzanera Reverter, 2017). Por otro lado, el número de filas es el horizonte de predicción (PH), siendo este el intervalo de tiempo futuro sobre el cual se pronostica la salida del sistema, tomando, por lo general, entre 40 y 60 datos (Cedeño, 2011). La respuesta de la variable controlada se define:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t + 1|t) \\ \hat{y}(t + 2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t + PH|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{CH} & g_{CH-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{PH} & g_{PH-1} & \dots & g_{PH-CH+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + CH - 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(t + 1) \\ f(t + 2) \\ \vdots \\ f(t + PH) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.7})$$

De donde $y(t + k|t)$ es la predicción a realizar, $\Delta u(t + k)$ la acción de control, y $f(t + k)$ respuesta libre del sistema. La Ec.7 se puede escribir de forma matricial de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{y}} = G\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (\text{Ec.8})$$

Para un sistema MIMO con ne entradas y ns salidas, la matriz dinámica G se contruye de la siguiente manera:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1ne} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2ne} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{ns1} & G_{ns2} & \dots & G_{ns*ne} \end{bmatrix}$$

Cada termino G_{ij} es una matriz que contiene los coeficientes de respuesta de la j-esima salida cuando se aplica un escalón a la i-esima entrada. La representación matricial para un sistema multivariable también se puede describir, según la ecuación Ec.8, de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \widehat{y}_1(t+1|t) \\ \vdots \\ \widehat{y}_1(t+PH|t) \\ \vdots \\ \widehat{y}_{ns}(t+1|t) \\ \vdots \\ \widehat{y}_{ns}(t+PH|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1ne} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2ne} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{ns1} & G_{ns2} & \dots & G_{ns*ne} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(t) \\ \vdots \\ \Delta u_1(t+CH-1) \\ \vdots \\ \Delta u_{ne}(t) \\ \vdots \\ \Delta u_{ne}(t+CH-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(t+1|t) \\ \vdots \\ f_1(t+PH|t) \\ \vdots \\ f_{ns}(t+1|t) \\ \vdots \\ f_{ns}(t+PH|t) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.9})$$

En este caso, el vector $\Delta u(t)$, que representa los cambios realizados en las variables manipuladas, tiene una dimensión que depende del CH y de la cantidad de variables de entrada del sistema. Por otro lado, el tamaño de los vectores $y(t)$ y $f(t)$ se define por la cantidad de variables de salida y el PH.

Cuando ocurre una variación en las variables controladas, el controlador tendrá que calcular los movimientos de las válvulas requeridos para compensar la desviación experimentada; es por eso, que el cambio deseado en la señal del sensor Δy^{des} es el error registrado (ε), en donde f es la predicción para el tiempo cero y w representa los *setpoints futuros*.

$$\varepsilon = w - f = \Delta y^{des} \quad (\text{Ec.10})$$

La Ec.9 resulta en un sistema de ecuaciones sobre especificado por lo cual no hay un conjunto de valores para que $\Delta u(t)$ satisfaga el sistema algebraico ($\widehat{y} = Gu + f$), por ende, se

busca una solución que provea el menor error respecto a los valores de referencia: Esto se conoce como el problema de regresión (Sanjuán Mejía, 1998):

$$G\Delta u = \varepsilon + R \quad (\text{Ec.11})$$

La Ec.11 para este caso es la función objetivo, donde R es el vector de residuales. Como no es posible un movimiento de válvula que anule totalmente la desviación, es viable minimizar el residual. Para esta solución se aplica el método de mínimos cuadrados (Cedeño R, 2011):

$$\Delta u = (G^T G)^{-1} G^T (w - f) \quad (\text{Ec.12})$$

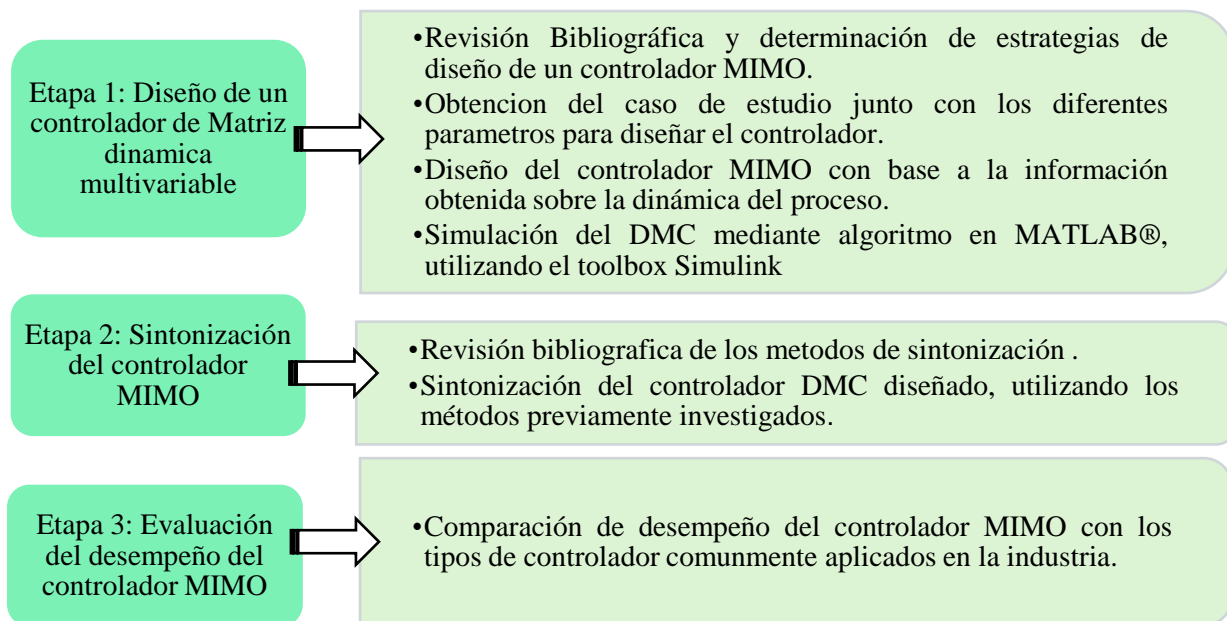
La Ec.12 define la ley de control para un control predictivo multivariable.

4. Metodología

La metodología se dividió en 3 etapas, tal y como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Diagrama metodológico



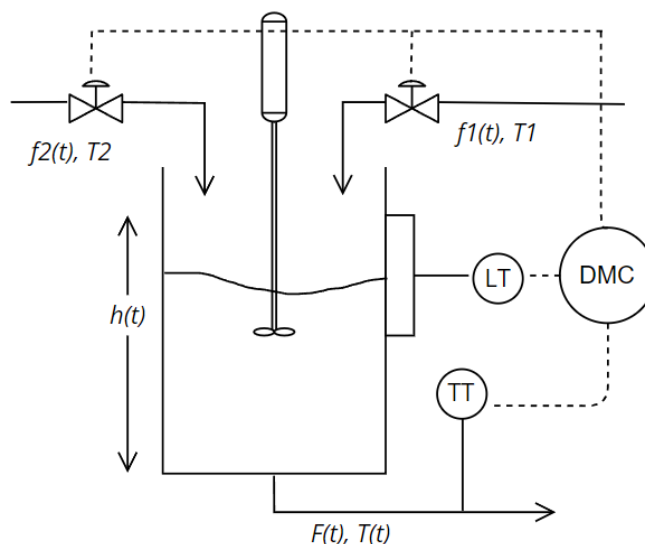
Etapa 1.

Se realizó una búsqueda bibliográfica orientada a identificar y determinar las estrategias requeridas para diseñar un controlador de matriz dinámica multivariable (DMC). El controlador DMC requiere de un modelo dinámico del proceso para su diseño; por lo tanto, se escogió el caso de estudio presentado en la Figura 2 (Iglesias et al., 2006). El motivo de su elección se debe a que los parámetros de operación están definidos y no presenta restricciones, y otorga las características de los equipos de instrumentación y control, como sensores/transmisores y válvula. El sistema es un tanque de mezclado con agitación, donde un flujo de agua caliente entra en contacto con una corriente fría para originar una salida a la temperatura deseada; además, el nivel del tanque se tiene en cuenta como variable a controlar. Para el diseño del DMC multivariable, que se presenta en la

sección de resultados, se realizó la simulación de lazo abierto en Simulink (*toolbox* de MATLAB®) con la finalidad de obtener los vectores unitarios de respuesta que conformaron la matriz dinámica multivariable.

Figura 2.

Tanque de mezclado con agitación interna



Adaptado de (Iglesias et al., 2006).

La Tabla 1 muestra el modelo matemático en estado transitorio, y en el Apéndice A se describen las condiciones de operación que se utilizaron para la simulación del proceso.

Tabla 1.

Modelo matemático en estado transitorio.

Tipo	Ecuación	
Balance de masa	$A(dh/dt) = f_1 + f_2 - C_v\sqrt{h}$	(Ec.13)
Balance de energía	$AC_v\rho\frac{d(T_3h)}{dt} = \rho f_1 C_p T_1 + \rho f_2 C_p T_2 - \rho f_3 C_p T_3$	(Ec.14)
Válvula isoporcentual	$\tau_v\left(\frac{dF}{dt}\right) + F = K_v(m - m_{\min})$	(Ec.15)
Sensor	$\tau_T\left(\frac{dc}{dt}\right) + c = K_T(PV - PV_{\min})$	(Ec.16)
Set Point	$C^{set} = K_T(PV^{set} - PV_{\min})$	(Ec.17)

Etapa 2.

Se evaluó la sintonización del controlador DMC por dos métodos: el propuesto por Shridhar & Cooper, 1998, y siguiendo las reglas de diseño para la sintonía de controladores DMC de Manzanera Reverter, C., 2017. El principal parámetro de sintonización para un control predictivo es el factor de supresión (λ), puesto que limita la señal de salida del controlador hacia las válvulas, lo cual se traduce en movimientos más suaves del elemento final de control. Para lograr la sintonización del DMC, se determinó el valor adecuado del factor de supresión; el método de Shridhar & Cooper, 1998, presenta una serie de ecuaciones para calcular los parámetros de diseño del controlador (horizonte de predicción, horizonte de control, tiempo de muestreo y λ), mientras que Manzanera Reverter, C., 2017, propone la utilización de heurísticas para encontrar el diseño del controlador, donde se evalúa cómo el factor de supresión afecta el primer incremento de las señales de salida del controlador. Los criterios para definir el mejor método de sintonización fueron: agresividad en la respuesta del controlador y tiempo de estabilización.

Etapa 3.

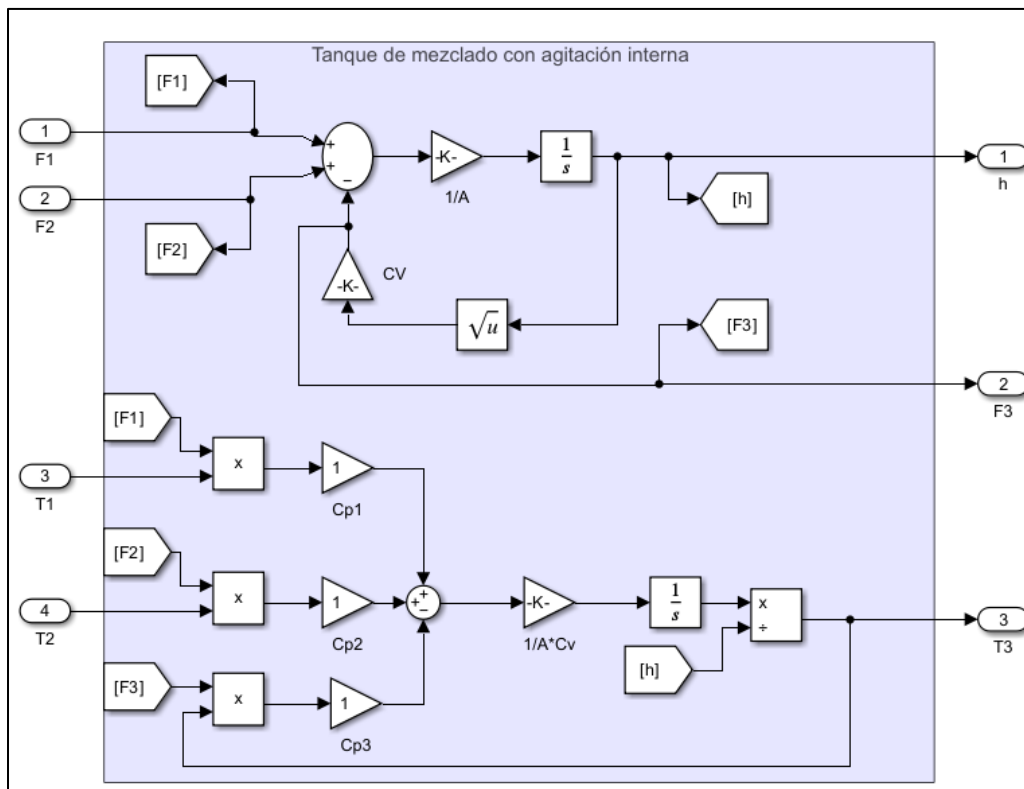
Se comparó el desempeño del controlador DMC con un controlador PID siguiendo criterios como el tiempo de estabilidad, sobrepaso y el comportamiento de la respuesta. Se evaluaron 2 diseños para el controlar PID utilizando métodos de sintonización ampliamente estudiados: Ziegler y Nichols (Smith & Corripio, 2016) e integral del error (Pillajo et al., 2016). Se hicieron las respectivas simulaciones para el controlador PI y los resultados se evaluaron respecto a los registrados por DMC.

5. Resultados

5.1 Simulación y caracterización del proceso.

Figura 3.

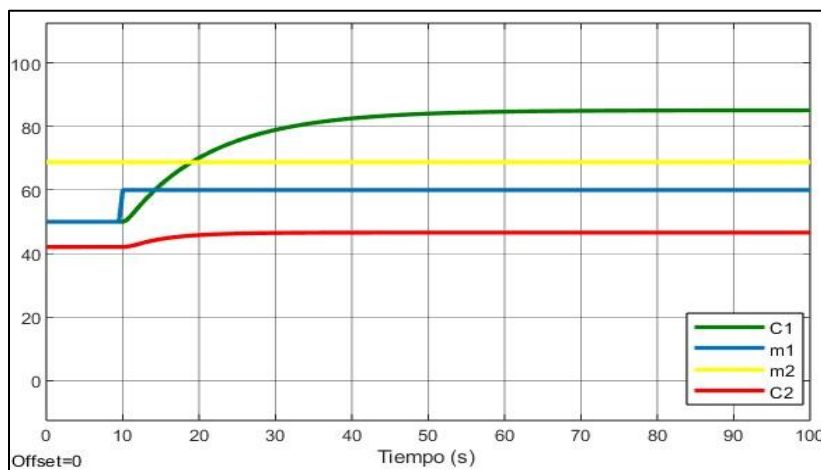
Simulación del proceso: tanque de mezclado con agitación interna.



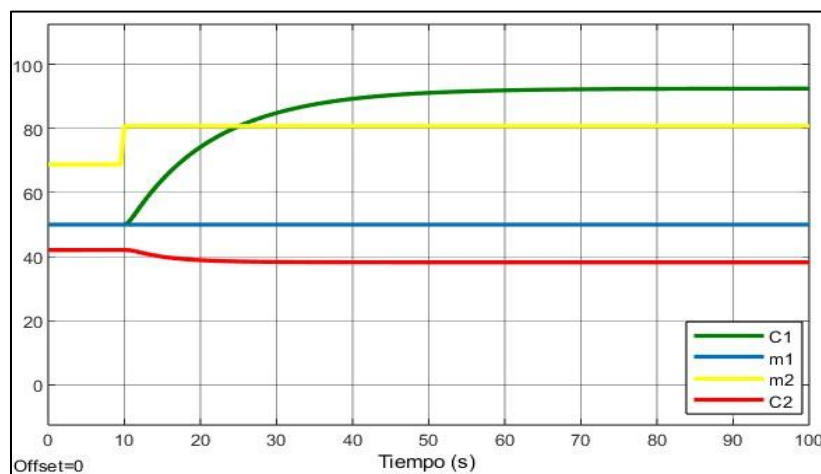
En la Figura 3 se muestra la simulación del proceso en lazo abierto en Simulink. La simulación permite evidenciar el comportamiento de las variables controladas $c1(t)$ y $c2(t)$ cuando se manipulan $m1(t)$ o $m2(t)$; al ser un sistema MIMO, cualquier perturbación en las señales de entrada afecta las dos variables de control (temperatura del tanque y el nivel de líquido). La Figura 4 presenta el comportamiento de las variables controladas (en términos de señal porcentual) ante un cambio escalón del 10 % en $m1(t)$, mientras que la Figura 5 muestra el comportamiento de las variables de control ante un cambio del 10 % en $m2(t)$.

Figura 4.

Respuesta de $c1(t)$ y $c2(t)$ ante el cambio escalón en $m1(t)$.

**Figura 5.**

Respuesta de $c1(t)$ y $c2(t)$ ante el cambio escalón en $m2(t)$.



De acuerdo con la simulación de lazo abierto, se pueden definir las constantes de tiempo y, por ende, el horizonte de predicción para el diseño del DMC. La dinámica del proceso se aproxima mediante una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto (Smith & Corripio, 2016):

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (\text{Ec.18})$$

Donde $C(s)$ y $M(s)$ son las señales que entrega sensor y controlador, respectivamente, en el dominio de Laplace y como variables de desviación; K es la ganancia del proceso, definida como el cambio de la variable de respuesta (Δc) dividido por el escalón (Δm); τ es la constante de tiempo; y t_0 el tiempo muerto. Estos dos últimos parámetros se calculan como lo indican las ecuaciones 19 y 20.

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (\text{Ec.19})$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (\text{Ec.20})$$

En la Tabla 2 se muestran las constantes de tiempo, ganancias y tiempos muertos para todas las funciones de transferencia presentes en el sistema:

Tabla 2.

Constantes de tiempo y tiempo muerto del proceso.

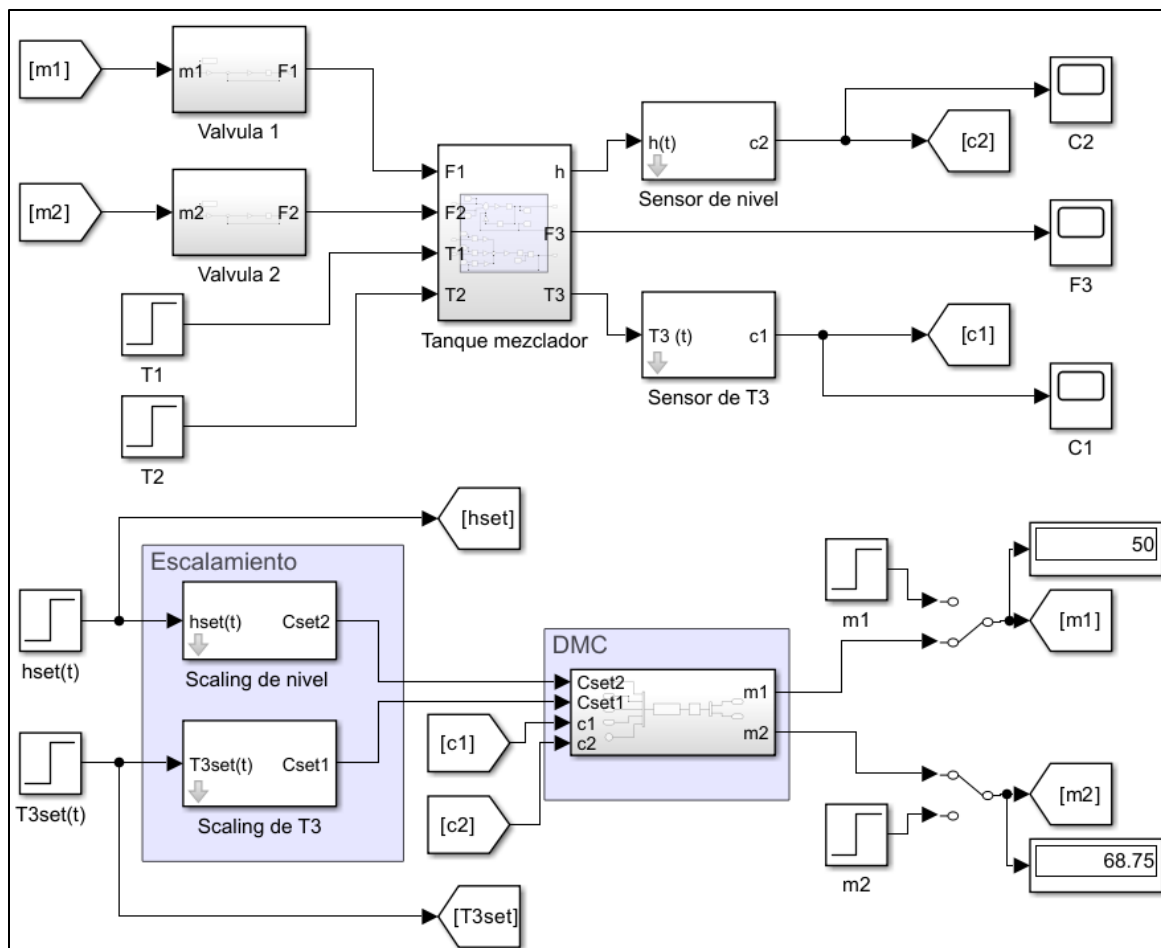
	$\frac{C_1(s)}{M_1(s)}$	$\frac{C_2(s)}{M_1(s)}$	$\frac{C_1(s)}{M_2(s)}$	$\frac{C_2(s)}{M_2(s)}$
$\tau(s)$	5,103	11,193	5,092	11,317
$t_0(s)$	0,980	0,449	0,937	0,447
$K(\%TO/\%CO)$	0,449	3,508	-0,323	3,535

De acuerdo con Cooper, 2005, para el diseño de un controlador DMC se recomienda un periodo de muestreo igual a un 10 % de la constante de tiempo, fijando un horizonte de predicción de 50 (el tiempo de estabilización es, aproximadamente, 5 veces la constante de tiempo). Como se tienen 4 constantes de tiempo, se tomará el valor de τ más corto (4,68 s). Con esta información se determinó un periodo de muestreo de 0,5 s con un PH de 50. En el Apéndice B se puede observar los vectores de respuesta unitaria que se obtuvieron.

5.2 Diseño del controlador de matriz dinámica

Figura 6.

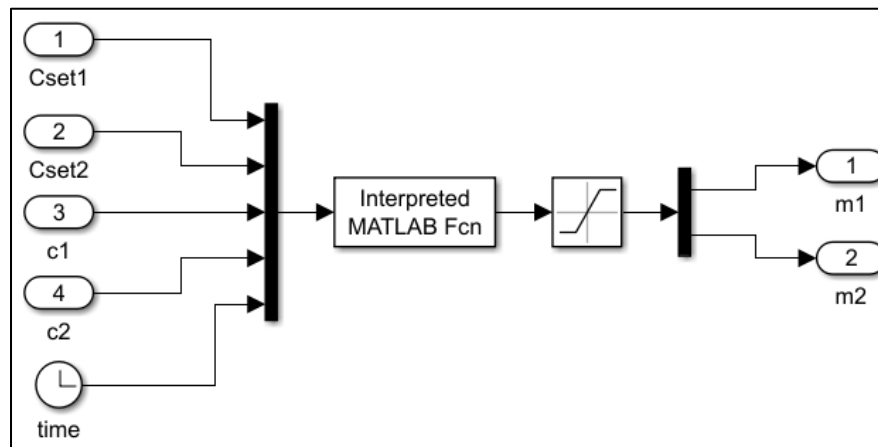
Simulación del proceso en lazo cerrado



La Figura 6 muestra la simulación de lazo cerrado. El valor de referencia de altura y temperatura de salida entran una zona de escalamiento, donde las unidades de ingeniería se convierten a señal, pues el controlador arroja señales $m1$ y $m2$ a las válvulas de control. El subsistema que se nombró como DMC tiene la configuración presentada en la Figura 7, en donde el bloque llamado *Interpreted MATLAB Fcn* representa el controlador. Dicho bloque interpreta el código fuente escrito como una función de MATLAB®, que se encarga de realizar la predicción de movimientos de válvula y la posterior acción de control.

Figura 7.

Configuración del controlador DMC en Simulink.



La matriz dinámica utilizada para el diseño del controlador es mostrada en el Apéndice B. Esta matriz presenta un horizonte de control de 3 y un horizonte de predicción de 50, lo que termina dando una matriz A de tamaño 106×6 . La Figura 8, muestra el algoritmo de predicción del controlador, cuyos datos de entrada son el valor de referencia de las dos variables de control ($Cset1$ y $Cset2$), las señales que entregan los sensores ($c1$ y $c2$) y el tiempo transcurrido (t).

Figura 8.

Algoritmo para la implementación de un controlador de matriz dinámica.

```
function [m] = dmcprog ( Cset1 , Cset2 , c1 , c2 , time)
global PH CH A Kips m1 m2 tprev Ts cpred
%Inicialización
if time == 0
    load controldmc.mat;
    [PH,CH] = size (A);
    cpred=[c1*ones(PH/2,1);c2*ones(PH/2,1)];
    Kips=Kips5;
    m1= 50;
    m2= 68.75;
    Ts= 0.5;
    tprev=time;
end
```

```

%ejecución
if rem(time,Ts)==0 && tprev~=time
    %Actualización de la predicción
    em=[c1*ones(PH/2,1);c2*ones(PH/2,1)]-[cpred(1)*ones(PH/2,1);cpred(PH/2+1)*ones(PH/2,1)];
    %Vector de predicción actualizado y corregido
    cpred_u=[cpred(2:PH/2);cpred(PH/2);cpred(PH/2+2:PH);cpred(PH)]+em;
    %Error que se observa en el lazo de control
    E=[Cset1*ones(PH/2,1);Cset2*ones(PH/2,1)]-cpred_u;
    %Utiliza el error para calcular los movimientos de la valvula
    DM= Kips*E;
    dmV1=DM(1);
    dmV2=DM(CH/2+1);
    if m1+dmV1 > 100
        dmV1=100-m1;
    elseif m1+dmV1 < 0
        dmV1=-m1;
    end
    if m2+dmV2 > 100
        dmV2=100-m2;
    elseif m2+dmV2 < 0
        dmV2=-m2;
    end
    m1= m1 + dmV1;
    m2= m2 + dmV2;
    m=[m1,m2];
    DM_c=[DM(1);zeros(CH/2-1,1);DM(CH/2+1);zeros(CH/2-1,1)];
    cpred=A*DM_c+cpred_u; %Nueva predicción
    tprev=time;
else
    m1=m1;
    m2=m2;
    m= [m1,m2];
end
end

```

Según lo descrito por López & Cantero, 2010, el algoritmo comienza la predicción con el vector $Cpred$, que almacena la medición de la señal del sensor para cada variable controlada antes de que ocurra la perturbación. Posteriormente, para la ejecución, actualiza y corrige $Cpred$ sumándole un vector de errores del modelo (diferencia entre la señal del sensor y el primer valor proyectado), que representa lo que les sucederá a las variables controladas sino hay un cambio en la señal de las válvulas. Luego, calcula el error (E) comparando los valores de referencia ($Cset1$ y $Cset2$) con $Cpred_u$, que es utilizado para hallar el incremento requerido de la variable manipulada. Finalmente, se realiza la nueva predicción después de accionar las válvulas y se repite la iteración del algoritmo cada periodo de muestreo.

5.3 Implementación del controlador de matriz dinámica.

Una vez diseñado el controlador, se analizó la dinámica de las variables controladas al cambiar los valores de referencia en un 10 %. Cabe recalcar que el controlador aun no cuenta con los parámetros sintonizados, pues se quiso tener una primera vista de los resultados arrojados por el DMC. Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados obtenidos al realizar un cambio en el *set-point* del nivel de líquido. En la Figura 9 se observa cómo, al aumentar la referencia en 0,58 m, el controlador intenta llegar al nuevo punto de estabilización en un tiempo aproximado de 250 s, pero se presenta ruido en la señal. Por otro lado, al ser un sistema multivariable, cada cambio realizado en una de las variables de control tendrá efecto en la otra; la Figura 10 muestra ese comportamiento, ya que la temperatura presenta oscilaciones hasta aproximadamente los 200 s, tiempo en el cual se estabiliza.

Figura 9.

Comportamiento del nivel del tanque a la perturbación realizada en la referencia

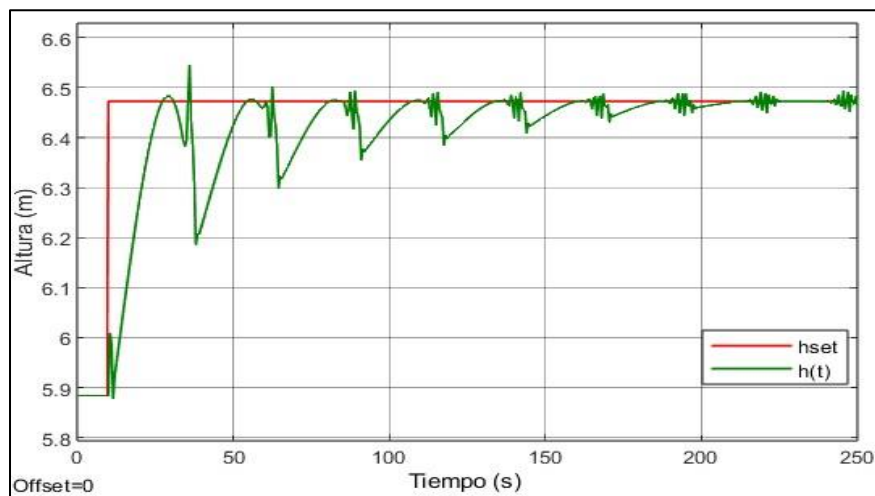
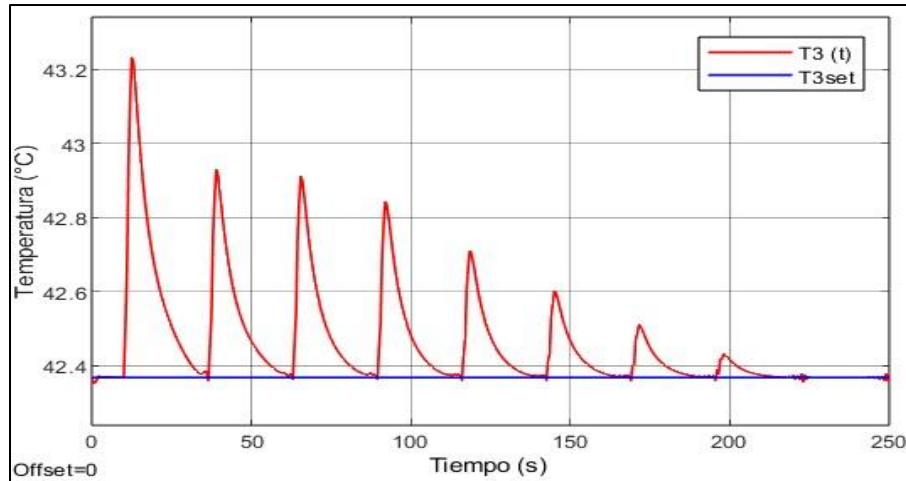


Figura 10.

Comportamiento de la temperatura a la perturbación realizada en la referencia del nivel.



Las figuras 11 y 12 muestran el comportamiento de las dos variables de control ante el cambio realizado al *set-point* de la temperatura del tanque. La respuesta del sistema presenta menos oscilaciones respecto al cambio en la referencia de nivel; esto se puede explicar observando el comportamiento de las señales que el controlador (m_1 y m_2) emite a las válvulas, el cual se presenta en las figuras 13 y 14.

Figura 11.

Comportamiento del nivel del tanque a la perturbación realizada en la referencia Temperatura.

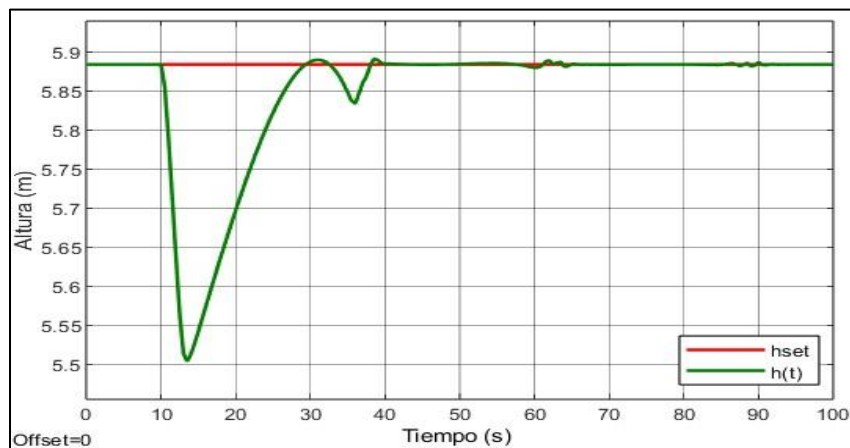
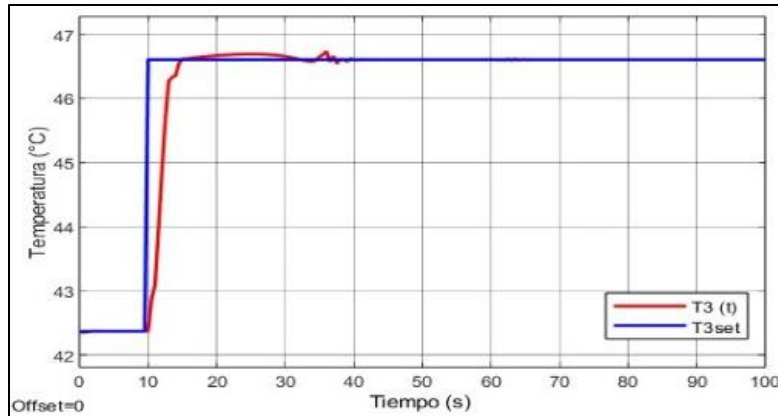


Figura 12.

Comportamiento de la temperatura a la perturbación realizada en la referencia.



Las señales arrojadas por el controlador DMC muestran una respuesta agresiva. Esto se debe a que el método de mínimos cuadrados busca una solución exacta sin tener en cuenta la cantidad de acciones que se deben realizar, llegando a fuertes movimientos de la válvula y ocasionando saturación, lo que implica llevar a los elementos finales de control a su límite máximo o mínimo de ajuste, derivando en oscilaciones, inestabilidad y desgaste (Cooper, 2005). La Figura 13 muestra que las oscilaciones son permanentes en $m1$ y $m2$, no se llegan a estabilizar y produce que el tiempo de respuesta del sistema al realizar un cambio en la referencia del nivel sea mayor en comparación cuando el cambio es realizado en el *setpoint* de temperatura, el cual presenta menores movimientos de válvula y llega a estabilizarse cerca de los 100 s (Figura 14).

Figura 13.

Comportamiento de $m1$ y $m2$ al realizar la perturbación en la referencia del nivel

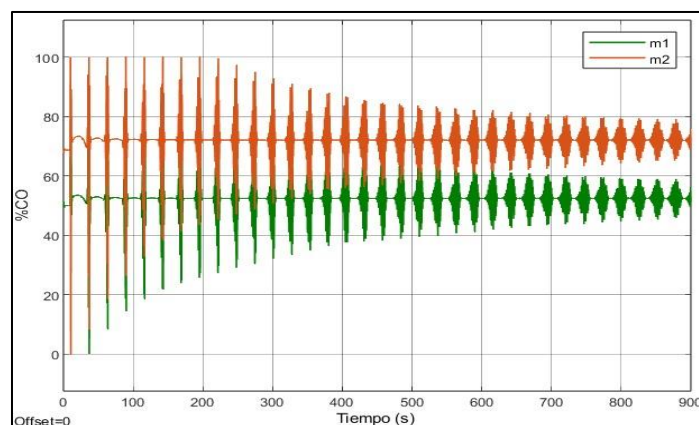
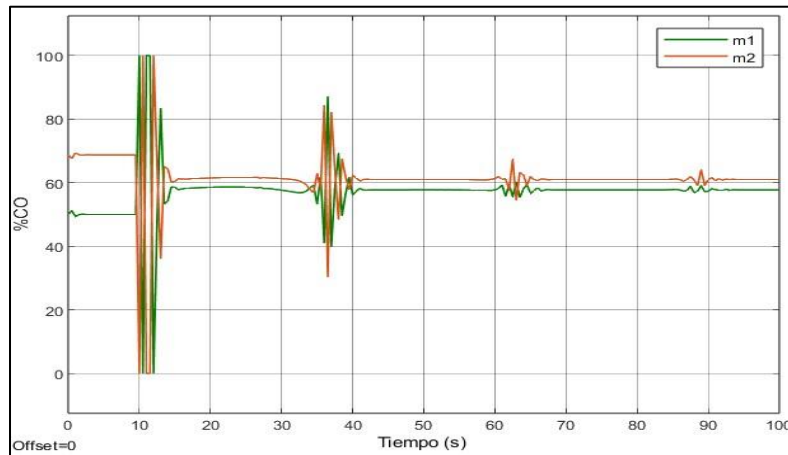


Figura 14.

Comportamiento de m1 y m2 al realizar la perturbación en la referencia de Temperatura.



5.4 Sintonización de un DMC tipo MIMO.

Para regular la agresividad del controlador, como parámetro de ajuste se emplea el factor de supresión (λ). La función de este parámetro es realizar una acción de mitigación y condicionamiento de la matriz dinámica, introduciendo nuevas ecuaciones que permitan la reducción de Δm cuando se hace la solución mediante el método de mínimos cuadrados y, por ende, suavizar los movimientos de la válvula (Iglesias et al., 2006). Por lo tanto, para una estrategia de control 2x2 se presenta la Ecuación 21.

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ \lambda_1 I & 0 \\ 0 & \lambda_2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.21})$$

De forma matricial:

$$\begin{bmatrix} G \\ - \\ \lambda I \end{bmatrix} \Delta m = \begin{bmatrix} \Delta y \\ - \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.22})$$

Donde, I es la matriz identidad y Z es una matriz de ceros. Efectuando el debido procedimiento matemático de mínimos cuadrados se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta u = \left([G^T \lambda I] \begin{bmatrix} G \\ - \\ \lambda I \end{bmatrix} \right)^{-1} [G \lambda I] \begin{bmatrix} \Delta y \\ - \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.23})$$

$$\Delta u = (G^T G + \lambda^2 I)^{-1} G^T \Delta y \quad (\text{Ec.24})$$

El termino $(G^T G + \lambda^2 I)^{-1} G^T$ se define como la matriz de ganancia inversa de proceso suprimida (K_{ips}). Para encontrar el valor del factor de supresión adecuado en sistemas MIMO se utilizan reglas heurísticas y estrategias de prueba y error (De Almeida et al., 2009), debido a que hay muy pocos métodos que derivan una ecuación analítica (Manzanera Reverter, 2017); el más representativo se describe a continuación.

Método 1: Shridhar & Cooper, (1998) aproximan la dinámica del proceso (pares de variable controlada y manipulada) a un modelo de primer orden más tiempo muerto.

$$\frac{y_j(s)}{u_i(s)} = \frac{k_{ij} e^{-\theta_{ij}s}}{\tau_{ij}s+1} \quad (\text{Ec.25})$$

Seleccionando el tiempo de muestreo de mayor proximidad al obtenido con la ecuación:

$$T = \min[\max(0.1\tau_{ij}, 0.5\theta_{ij})] \quad (\text{Ec.26})$$

Además, recomiendan calcular el horizonte de predicción con la Ec.27 y el horizonte de control igual a 63,2 % del tiempo de asentamiento del subprocesso más lento del sistema (Ec.28)

$$PH = \text{Max} \left(\frac{5\tau_{ij}}{T} + k_{ij} \right), \text{ donde } k_{ij} = \left(\frac{5\theta_{ij}}{T} + 1 \right) \quad (\text{Ec.27})$$

$$CH = \text{Max} \left(\frac{\tau_{ij}}{T} + k_{ij} \right) \quad (\text{Ec.28})$$

El factor de supresión se determina con la siguiente expresión, donde j es la variable manipulada:

$$\lambda_j^2 = \frac{CH}{500} \sum_{i=1}^N \left[k_{p_{ij}} \left(PH - k_{ij} - \frac{3\tau_{ij}}{2} + 2 - \frac{(CH-1)}{2} \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{Ec.29})$$

Este estudio contempla un sistema 2x2; por ello, y según la Ec.29, se tendrán dos factores de supresión λ_1 y λ_2 . Los resultados se observan en la Tabla 3, donde $\lambda_1 = \lambda_2$ según los cálculos realizados. Así mismo, las Figuras 15 y 16 muestran la respuesta del sistema cuando se realizó un cambio del 10 % en la referencia de nivel (altura), utilizando los parámetros de sintonización encontrados.

Tabla 3.

Diseño para el control de matriz dinámica utilizando el método de Shridhar & Cooper.

Parámetro	Diseño
T	0,5 s
PH	114
CH	24
λ_1, λ_2	7,5

Figura 15.

Respuesta de nivel ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 7,5$

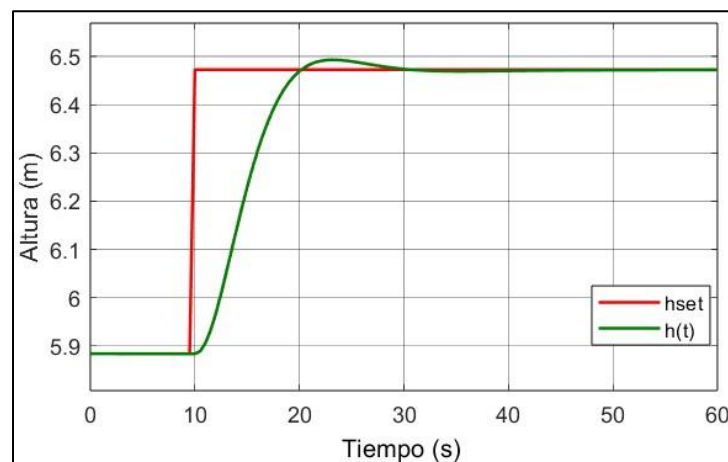
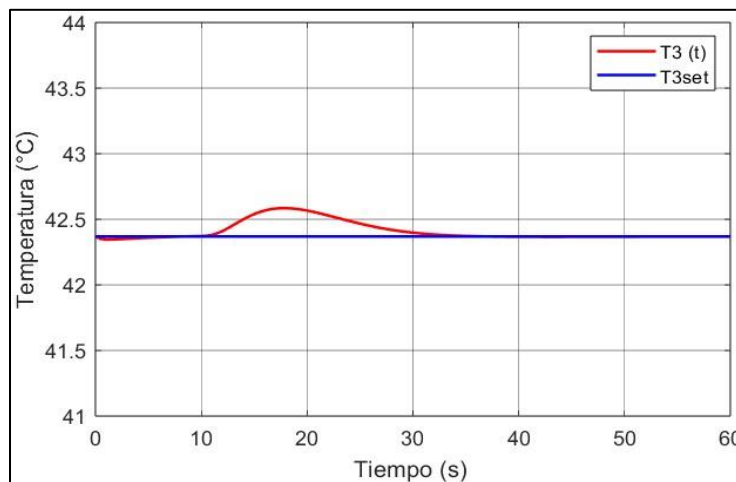


Figura 16.

Respuesta de Temperatura ante el cambio en el nivel utilizando $\lambda = 7,5$



Las simulaciones se realizaron considerando un cambio en el *set point* igual al efectuado para el controlador sin sintonizar. Las respuestas evidencian que, al emplear parámetros más adecuados para el controlador, el tiempo de estabilización disminuye considerablemente, pasando de 250 a, aproximadamente, 35 s para las dos variables controladas (*c1* y *c2*). Por otro lado, la respuesta del controlador DMC sintonizado no presenta ruido a lo largo del tiempo.

Para una variación en la referencia de la temperatura, se obtiene el registro mostrado en las Figuras 17 y 18. La Figura 17 presenta un comportamiento constante ante el cambio en la referencia de la temperatura; esto se debe a que el controlador está enviando señales a las válvulas en una misma proporción: mientras hace la apertura de una, cierra la otra en el mismo porcentaje, manteniendo el nivel del tanque en la misma referencia, tal y como se evidencia en la Figura 20. Por otro lado, la Figura 18 expone que el controlador lleva el sistema al nuevo valor de referencia sin ruido ni sobrepaso.

Figura 17.

Respuesta del nivel ante el cambio en la temperatura utilizando $\lambda = 7,5$

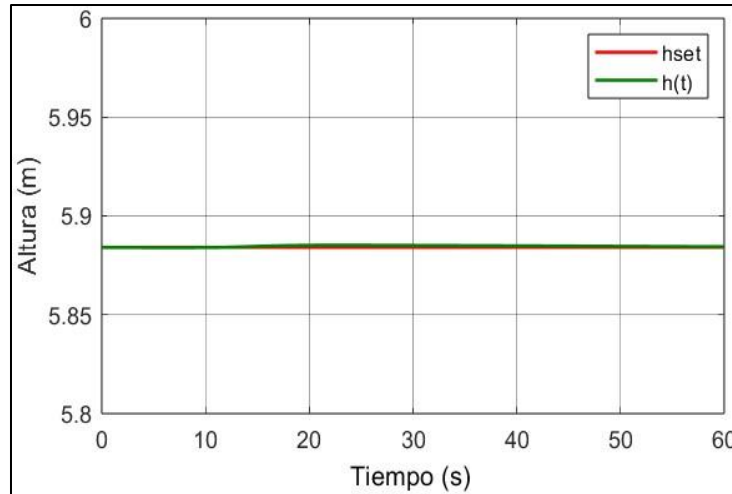
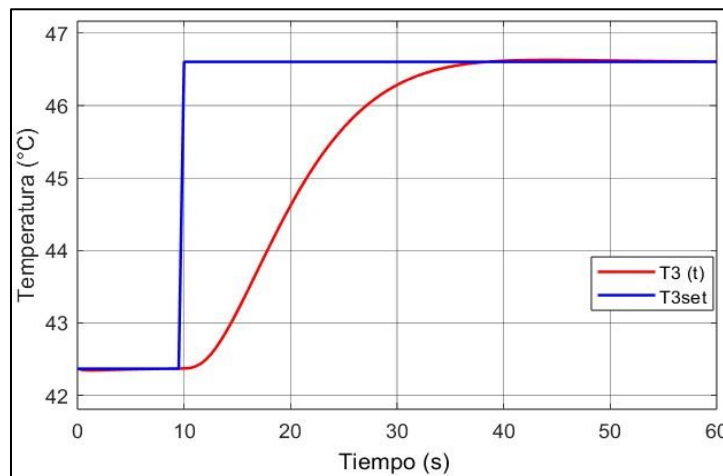


Figura 18.

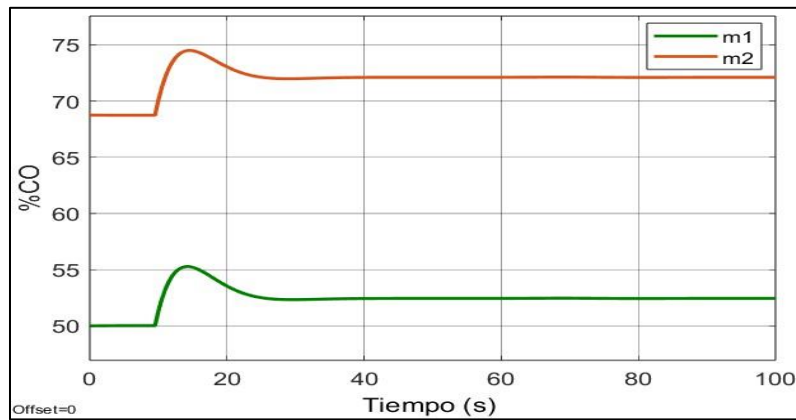
Respuesta de la Temperatura ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 7,5$



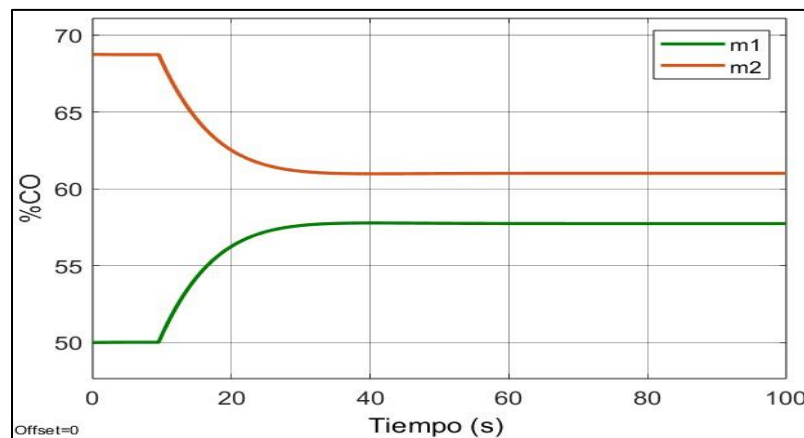
Las Figuras 19 y 20 muestran una significativa diferencia respecto al comportamiento de las señales $m1$ y $m2$ con $\lambda = 0$ (Figuras 13 y 14). Se observa claramente el efecto del factor de supresión al no presentarse una respuesta agresiva, lo cual implica un movimiento suave de las válvulas. Además, el primer incremento cuando se hace el cambio en la referencia de nivel es, aproximadamente, solo un 5 %CO por encima del estado estable para $m1$ y $m2$; para el caso donde cambia la referencia de temperatura, $m1$ incrementa un 7 %CO mientras $m2$ disminuye en el mismo porcentaje.

Figura 19.

Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en $hset$, con $\lambda = 7,5$

**Figura 20.**

Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en $T3set$ con $\lambda = 7,5$

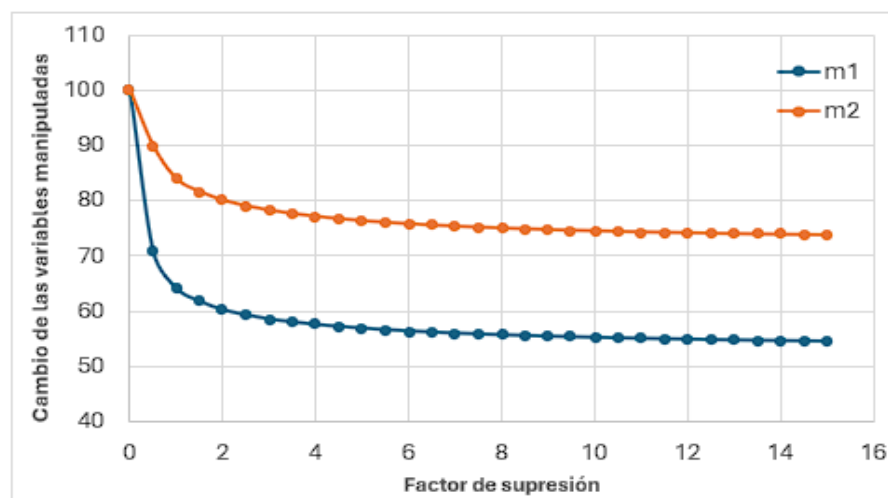


Método 2: Manzanera Reverter, C. (2017) propone relacionar el factor de supresión con el primer incremento de la señal de control ($m1$ y $m2$). Para ello se tomaron PH y CH igual a los presentados en la Tabla 3; además, el autor sugiere que la elección del periodo de muestreo puede ser el mismo que el realizado en el método anterior. Por lo tanto, se modificó λ de 0 a 15 en intervalos de 0,5 y se registra el primer incremento Δm predicho por el DMC; al ser un sistema

multivariable, realizando cambios en las referencias de $c1$ y $c2$ se obtendrán dos valores del factor de supresión.

Figura 21.

Cambio de 10 % referencia de nivel.



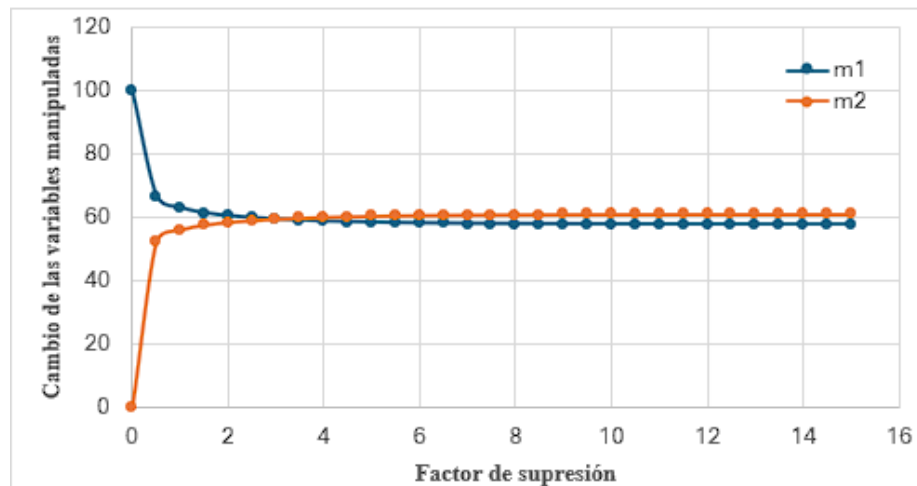
En la Figura 21 se observa que para valores pequeños de λ se presenta un incremento muy alto de Δm , provocando una respuesta inicial inestable por el movimiento agresivo de las válvulas. Conforme se va aumentando el factor de supresión, el Δm disminuye hasta que su respuesta tiende a ser constante. Teniendo en cuenta esto, se calculó la derivada numérica para los datos arrojados por las simulaciones (Apendice C). Para un cambio de 10 % realizado en el nivel, la derivada numérica no cambia considerablemente (menos del 1 %) a partir de 4,5. Este será el primer valor del factor de supresión.

Al cambiar la referencia de la temperatura en un 10 %, la derivada numérica (Apendice D) no cambia apreciablemente a partir de 3, tal y como se evidencia en la Figura 22; por lo tanto, este será el segundo valor del factor de supresión. Así mismo, el método sugiere que la elección de λ tiene que ser válida para los dos escenarios planteados, por lo cual se toma el valor más elevado (4,5). Para un $\lambda = 4,5$ se tiene un comportamiento prácticamente igual al registrado para el DMC

sintonizado con el Método 1; la única diferencia apreciable es que, al cambiar la referencia de la temperatura (Figura E4), se presenta un leve sobrepaso en la señal de 0.1 °C. Los resultados se muestran en el Apendice E.

Figura 22.

Cambio de 10 % referencia de temperatura.



Por otra parte, se evidencia en las Figuras 23 y 24 cómo con un factor de supresión de 4,5 se obtiene un incremento en %CO mayor que el obtenido en las Figuras 19 y 20. En el primer escenario, cuando se cambia el *setpoint* de nivel un 10 %, las curva de *m1* y *m2* presentan un incremento de 7,95 %CO; por otro lado, en el segundo escenario, cambiando un 10 % el *setpoint* de temperatura, la señal *m1* tiene un incremento de 8,5%CO mientras que *m2* decrece este mismo porcentaje.

Figura 23.

Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en hset, con $\lambda = 4,5$

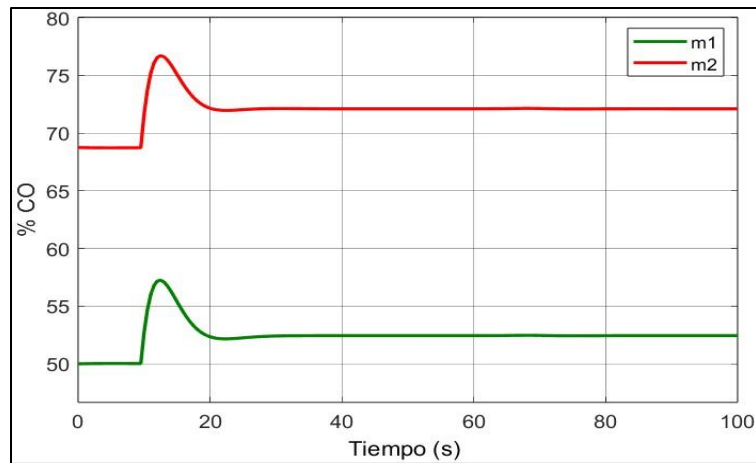
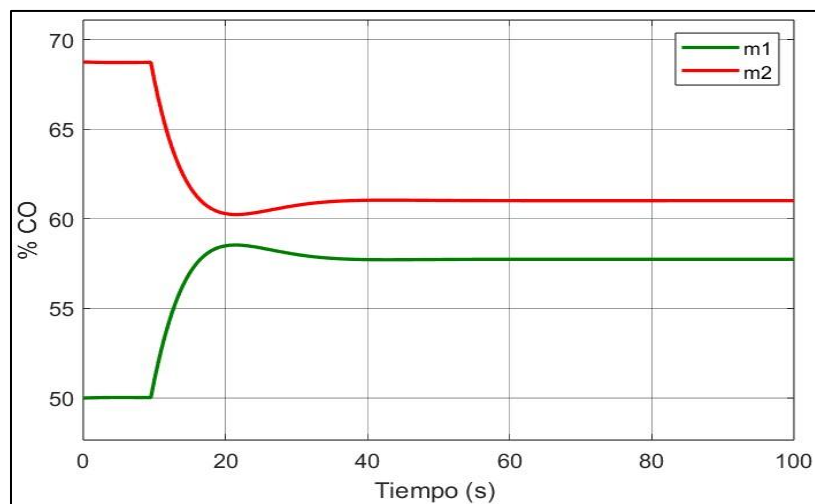


Figura 24.

Comportamiento en la señal de las válvulas ante el cambio realizado en $T3set$ con $\lambda = 4,5$



En resumen, los dos métodos brindaron factores de supresión que proporcionan comportamientos adecuados en el sistema, puesto que los dos logran estabilizar las señales de control en los nuevos puntos de referencia y no generan acciones agresivas al elemento final de control. Según Manzanera Reverter, C., 2017, mediante el Método 2 se consiguen tiempos de estabilización similares o menores al método de Shridhar & Cooper, 1998, pero presenta oscilaciones ligeramente superiores. Esto se debe a que el Método 1 utiliza factores de supresión

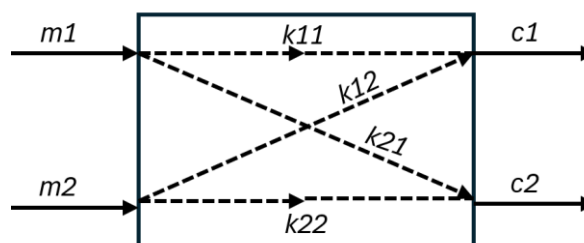
más elevados, que se requieren para compensar las oscilaciones que se presentan cuando el horizonte de predicción es demasiado alto.

5.5 Control predictivo vs control *feedback*.

En un sistema multivariable se presenta una interacción entre todas las variables presentes en el sistema (manipuladas y controladas), tal como se puede observar en la Figura 25.

Figura 25.

Esquema de la interacción de un proceso 2x2 general.



Adaptado de (C.A. Smith & Corripio, 2015).

Como se busca el par de variables que disminuya la influencia con las demás, existe un parámetro que sirve como una medición cuantitativa de las interacciones para un lazo de control multivariable: la ganancia relativa (μ), la cual relaciona las ganancias de lazo abierto y lazo cerrado para un sistema, y se define como muestra la Ec.30:

$$\mu_{ij} = \frac{K_{ij}}{K'_{ij}} \quad (\text{Ec.30})$$

En donde K_{ij} es la ganancia de lazo abierto y K'_{ij} es la ganancia de lazo cerrado (Smith & Corripio, 2016). La ganancia relativa para los pares $c_1 - m_1$ y $c_2 - m_2$ son iguales ($\mu_{11} = \mu_{22}$), lo mismo ocurre para $\mu_{12} = \mu_{21}$. La matriz de ganancia relativa se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4.*Ganancia relativa del proceso.*

	Flujo caliente	Flujo frio
Temperatura (°C)	0.5839	0.4160
Nivel (m)	0.4160	0.5839

Los dos pares de variables (controlada y manipulada) que se toman para realizar el lazo de control *feedback* son los que están más cerca de la unidad, pues presentan una mayor influencia entre ellos. El Apéndice F muestra la ejecución de los dos lazos de control *feedback* en Simulink. Esta simulación se realizó en el dominio de Laplace, pues la no linealidad del proceso no se tiene en cuenta para aproximar el comportamiento dinámico mediante una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto.

Por otra parte, un controlador PID se recomienda implementarlo si $t_0 > \tau/4$ (Smith & Corripio, 2016). Sin embargo, como se puede evidenciar en la Tabla 5, no se cumple dicha condición para G_{11} y G_{22} ; por ende, se optó por un controlador PI.

Tabla 5.*Validación de parámetros para la utilización de un controlador PI*

Función de transferencia	τ	t_0	t_0/τ
G_{11}	5.102	0,980	0,192
G_{22}	11.317	0,447	0,039

Para los dos métodos de sintonización empleados, la relación t_0/τ debe estar entre 0,05 a 1 (Smith & Corripio, 2016). Como la función de transferencia G_{22} se encuentra fuera de este rango, se aplica el método propuesto por Moore et al., 1969: cuando el tiempo de muestreo (T) se encuentra en el orden de, aproximadamente, una décima parte de la constante de tiempo, se puede sumar la mitad del tiempo de muestreo al tiempo muerto para obtener un valor corregido (t_{0c}).

$$t_{0c} = t_0 + \frac{T}{2} \quad (\text{Ec.29})$$

Siendo t_{0c} el tiempo muerto corregido, t_0 el tiempo muerto del proceso y T el tiempo de muestreo. Por tanto, el valor de tiempo muerto para G_{22} es 0,697 s, con $T = 0,5$ s. Para encontrar los parámetros de sintonización del controlador PI se evaluaron dos métodos ampliamente conocidos: Ziegler-Nichols e integral del error. Según las correlaciones reportadas en la literatura (Smith & Corripio, 2016) (Pillajo et al., 2016), los valores para k_c y τ_I se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6.

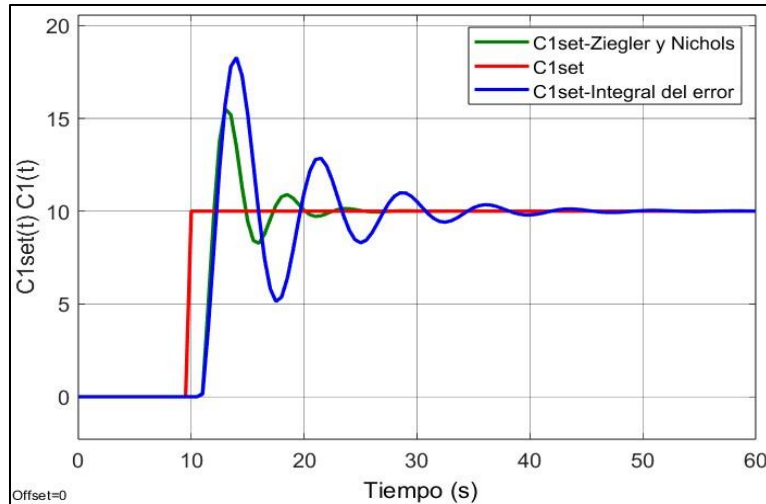
Parámetros de diseño para un controlador proporcional-integral.

Método de sintonización	K_c (%/%)		τ_I (s)	
	G_{11}	G_{22}	G_{11}	G_{22}
Ziegler y Nichols	10.4356	4.1330	3.2639	2.3227
Integral del error	6.9879	4.3458	5.3268	2.5942

Las Figuras 26 y 27 muestran el comportamiento de las variables controladas ante un cambio en la referencia del 10 % en el lazo de control feedback.

Figura 26.

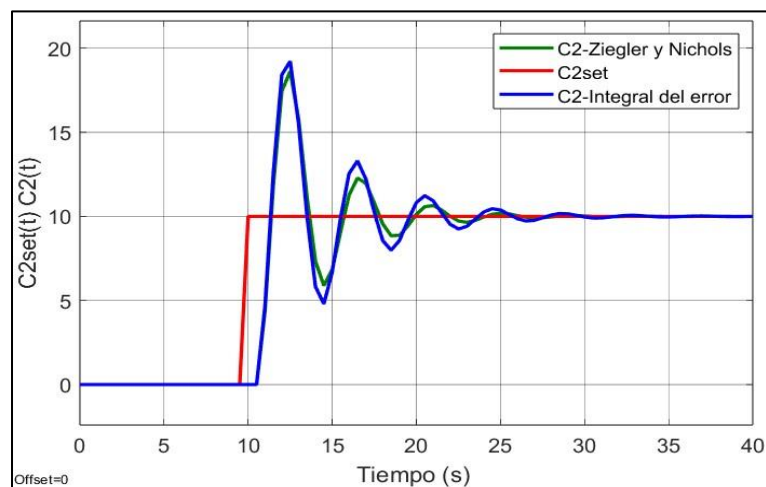
Respuesta del controlador PI ante un cambio en set point de Temperatura.



Se puede observar cómo los dos métodos de sintonización hacen que el controlador PI logre llevar las variables de control al nuevo punto de referencia, aunque también los dos presentan oscilaciones y sobrepaso. El método que mejor comportamiento muestra es Ziegler y Nichols; ya que muestra un tiempo integral menor que el calculado por el método de la integral del error, presenta menos sobrepaso y oscilaciones en $c1$ y $c2$, tal como se observa en las Figuras 26 y 27.

Figura 27.

Respuesta del controlador PI ante un cambio en set point de nivel.

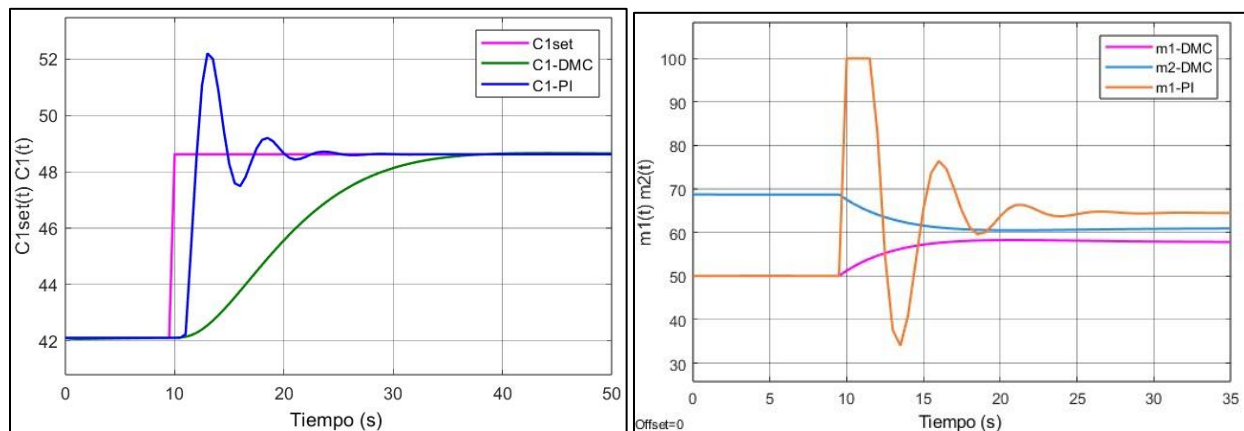


Finalmente, el desempeño del controlador PI, sintonizado mediante el metodo de Ziegler y Nichols, fue comparado con el DMC diseñado en la seccion anterior, considerando cambios en el set point de las dos variables controladas. Las Figuras 28 y 29 muestran los resultados que se obtuvieron.

Para un cambio en los *setpoints* ($c1set$ y $c2set$) se observa que los dos sistemas de control llevan a $c1(t)$ y $c2(t)$ al nuevo valor de referencia en un tiempo similar, aunque el controlador PI acciona de manera fuerte el elemento final de control y presenta oscilaciones considerables. Por otro lado, DMC proporciona un movimiento suave de las válvulas luego del primer incremento y no presenta sobrepasos. Respecto a las señales $m1$ y $m2$, hay que tener en cuenta que, al implementar el DMC, cada variable de proceso depende simultáneamente de ambas señales, mientras que en un control *feedback* los lazos de control son previamente identificados por separado, teniendo para cada variable controlada una manipulada.

Figura 28.

Comportamiento entre PI y DMC ante un cambio en C1set.

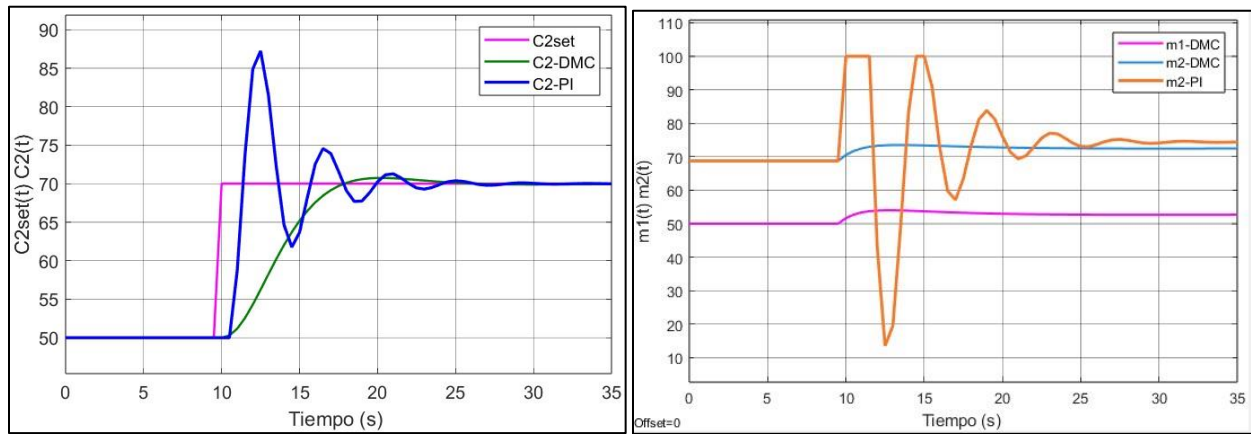


a). Variable C1 (Temperatura)

b). Señal del controlador

Figura 29.

Comportamiento entre PI y DMC ante un cambio en $C2_{set}$.



a). Variable C2 (Nivel)

b). Señal del controlador

6. Conclusiones

Mediante algebra matricial se describió el diseño de un DMC multivariable, cuya validación se realizó para un caso de estudio tomado de la literatura. Se identificó que un buen comportamiento de este tipo de controlador requiere de un modelo matemático que represente claramente el proceso a controlar, pues las funciones de transferencia determinan cómo es la interacción entre las variables controladas y manipuladas involucradas. Se fijaron los parámetros de diseño (PH, CH y T) según lo reportado en trabajos previos y se implementó un DMC MIMO no suprimido en primera instancia, donde el lazo cerrado presentó tiempo de estabilización alto, ruido en las señales, y agresividad y saturación de los elementos finales de control.

Al incluir el factor de supresión se modera la respuesta del controlador y se evita la saturación. Para encontrar el mejor valor de este parámetro se probaron 2 métodos de sintonización, los cuales arrojaron resultados muy similares en cuanto a la estabilización de las variables de control, pero presentando diferencias en las señales que el DMC envía a las válvulas. Al implementar la estrategia propuesta por Shidhar & Cooper, 1998, se encontró un valor para el factor de supresión más adecuado, logrando cero oscilaciones en las señales hacia los elementos finales de control. Para el caso de estudio valorado, el diseño del controlador DMC MIMO es: $CH = 24$, $PH = 114$, $T = 0,5$ s y $\lambda = 7,5$.

Finalmente, el DMC brinda mejor desempeño en comparación con un controlador PI para un lazo tipo *feedback*. Cuando se realizan cambios en los *setpoints*, el DMC estabiliza el sistema en tiempos cortos, no presenta sobrepasos y los movimientos a las válvulas son ligeros. Acciones que por el contrario suceden al implementar el PI, donde se evidencia la agresividad en la ejecución de las acciones del controlador.

7. Recomendaciones

Profundizar en otras estrategias de control predictivo como: control algorítmico por modelo, control predictivo generalizado, control predictivo heurístico por modelo, QDMC y control mediante lógica difusa.

Realizar en futuras investigaciones simulando procesos químicos con ayuda de software como Aspen Hysys, donde se puede obtener un modelo dinámico más realista de los sistemas y determinar si un DMC puede ser una buena opción como estrategia de control multivariable.

Referencias Bibliográficas

- Alcalá, D. A., & Suárez, C. M. (2023). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO TIPO DMC (DYNAMIC MATRIX CONTROL)*.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15410>
- Castillo, L., & Guerrero, C. (2017). *Proposición y análisis de un esquema de control dmc para una torre de destilación de crudos industrial*. Universidad Industrial de Santander.
- Cedeño, C. A. (2011). *Diseño e implementación de controladores DMC con mecanismo de adaptación*. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/570736>
- Cooper, D. J. (2005). *Practical Process Control using Loop-Pro Software*.
www.controlstation.com
- Cutler, C. R., & Ramaker, B. L. (1980). Dynamic matrix control??A computer control algorithm. *Joint Automatic Control Conference, 17*, 72. <https://doi.org/10.1109/JACC.1980.4232009>
- De Almeida, G. M., Salles, J. L. F., & Filho, J. D. (2009). Optimal tuning parameters of the dynamic matrix predictive controller with constraints. *Latin American applied research, 39*(1), 33-40.
- Gómez, M. A., & Correa, C. R. (2009). *Implementacion de un sistema de control predictivo multivariable en un horno*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/24037>
- Iglesias, E. J., Sanjuán, M. E., & Smith, C. A. (2006). Tuning equation for dynamic matrix control in siso loops. *Ingeniería y Desarrollo, 19*, Article 19.
- Lopera, E. H., & Mejía, D. A. (2010). Implementación de un control predictivo basado en modelo aplicado a un sistema de control de caudal de agua didáctico. *TecnoLógicas, 109-130*.
<https://doi.org/10.22430/22565337.124>

- López, M. E., & Cantero, K. M. (2010). *Diseño y simulación de un control de modelo predictivo tipo DMC (dynamic matrix control) en un proceso continuo de producción de biodiesel* [masterThesis, Pregrado en Ingeniería Mecánica]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/2127>
- Manzanera Reverter, C. (2017). *Reglas de diseño para la sintonía de controladores predictivos dynamic matrix control (DMC)*. <http://hdl.handle.net/10317/7019>
- Mejía, M. S. (1998). Control Dinámico Matricial Fundamentación y estrategias de implementación. *Ingeniería y Desarrollo*, 3_4, Article 3_4.
- Pillajo, C., Bonilla, P., & Hincapié, R. (2016). Algoritmo genético para sintonización de pid basado en la integral del error absoluto. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 15, Article 15.
- Restrepo, N. L. P., Urrego, J. A. R., & Rodríguez, D. A. Á. (2014). Aplicación de Diseño y Simulación de DMC para plantas de primer orden con tiempo muerto y dinámica lenta. *Revista Educación en Ingeniería*, 9(18), Article 18. <https://doi.org/10.26507/rei.v9n18.335>
- Serrano, J. (1994). Aspectos de implementación y análisis de robustez en CPBM [Ph.D. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/3061>
- Shridhar, R., & Cooper, D. J. (1998). *A Tuning Strategy for Unconstrained Multivariable Model Predictive Control*.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2016). *Control automático de procesos: Teoría y práctica* (Segunda edición). Limusa.
- Urrego, J. A. R. (2015). Un algoritmo genético para sintonización de una estructura de control mpc (dmc) aplicado a una planta de presión. *Revista Politécnica*, 11(20), Article 20.

Apéndices

Apéndice A.

Condiciones de operación para el caso de estudio

Parámetro	Valor en estado estable	Unidades
F_1	0.8	m^3/s
F_2	1.1	m^3/s
F	1.9	m^3/s
T_1	80	$^{\circ}C$
T_2	15	$^{\circ}C$
T	42.36	$^{\circ}C$
ρ	1000	kg/m^3
V	10	m^3
C_v	1	$\frac{kcal}{kg^{\circ}C}$
C_p	1	$\frac{kcal}{kg^{\circ}C}$
CV	0.783	$m^3/m^{0.5}$
τ_{v1}	0.5	s
τ_{v2}	0.5	s
K_{v1}	0.016	$\frac{m^3/s}{\%CO}$
K_{v2}	0.016	$\frac{m^3/s}{\%TO}$
$K_T \text{ sensor } T$	1.25	$\frac{\%CO}{\%TO}$
$\tau_T \text{ sensor } T$	0.5	$^{\circ}C$
$K_T \text{ sensor } h$	33.99	$\frac{s}{\%TO}$
		m

Apéndice B.

Matriz dinámica con $PH=50$, $CH=3$ y $\lambda^2 = 0$

1	2	3	1	2	3
0.0078	0.0000	0.0000	-0.0055	0.0000	0.0000
0.0243	0.0078	0.0000	-0.0174	-0.0055	0.0000
0.0520	0.0243	0.0078	-0.0375	-0.0174	-0.0055
0.0844	0.0520	0.0243	-0.0608	-0.0375	-0.0174
0.1170	0.0844	0.0520	-0.0843	-0.0608	-0.0375
0.1479	0.1170	0.0844	-0.1064	-0.0843	-0.0608
0.1762	0.1479	0.1170	-0.1268	-0.1064	-0.0843
0.2020	0.1762	0.1479	-0.1452	-0.1268	-0.1064
0.2253	0.2020	0.1762	-0.1618	-0.1452	-0.1268
0.2463	0.2253	0.2020	-0.1768	-0.1618	-0.1452
0.2653	0.2463	0.2253	-0.1903	-0.1768	-0.1618
0.2824	0.2653	0.2463	-0.2025	-0.1903	-0.1768
0.2979	0.2824	0.2653	-0.2135	-0.2025	-0.1903
0.3119	0.2979	0.2824	-0.2234	-0.2135	-0.2025
0.3245	0.3119	0.2979	-0.2324	-0.2234	-0.2135
0.3360	0.3245	0.3119	-0.2405	-0.2324	-0.2234
0.3464	0.3360	0.3245	-0.2478	-0.2405	-0.2324
0.3558	0.3464	0.3360	-0.2545	-0.2478	-0.2405
0.3643	0.3558	0.3464	-0.2605	-0.2545	-0.2478
0.3720	0.3643	0.3558	-0.2660	-0.2605	-0.2545
0.3790	0.3720	0.3643	-0.2709	-0.2660	-0.2605
0.3854	0.3790	0.3720	-0.2754	-0.2709	-0.2660
0.3912	0.3854	0.3790	-0.2795	-0.2754	-0.2709
0.3965	0.3912	0.3854	-0.2832	-0.2795	-0.2754
0.4012	0.3965	0.3912	-0.2866	-0.2832	-0.2795
0.4056	0.4012	0.3965	-0.2896	-0.2866	-0.2832
0.4095	0.4056	0.4012	-0.2924	-0.2896	-0.2866
0.4131	0.4095	0.4056	-0.2949	-0.2924	-0.2896
0.4164	0.4131	0.4095	-0.2972	-0.2949	-0.2924
0.4194	0.4164	0.4131	-0.2994	-0.2972	-0.2949
0.4221	0.4194	0.4164	-0.3013	-0.2994	-0.2972
0.4246	0.4221	0.4194	-0.3030	-0.3013	-0.2994
0.4268	0.4246	0.4221	-0.3046	-0.3030	-0.3013
0.4289	0.4268	0.4246	-0.3061	-0.3046	-0.3030
0.4307	0.4289	0.4268	-0.3074	-0.3061	-0.3046
0.4324	0.4307	0.4289	-0.3086	-0.3074	-0.3061
0.4340	0.4324	0.4307	-0.3097	-0.3086	-0.3074
0.4354	0.4340	0.4324	-0.3107	-0.3097	-0.3086

0.4367	0.4354	0.4340	-0.3116	-0.3107	-0.3097
0.4379	0.4367	0.4354	-0.3124	-0.3116	-0.3107
0.4390	0.4379	0.4367	-0.3132	-0.3124	-0.3116
0.4400	0.4390	0.4379	-0.3139	-0.3132	-0.3124
0.4409	0.4400	0.4390	-0.3145	-0.3139	-0.3132
0.4417	0.4409	0.4400	-0.3151	-0.3145	-0.3139
0.4424	0.4417	0.4409	-0.3157	-0.3151	-0.3145
0.4431	0.4424	0.4417	-0.3161	-0.3157	-0.3151
0.4437	0.4431	0.4424	-0.3166	-0.3161	-0.3157
0.4443	0.4437	0.4431	-0.3170	-0.3166	-0.3161
0.4448	0.4443	0.4437	-0.3174	-0.3170	-0.3166
0.4453	0.4448	0.4443	-0.3177	-0.3174	-0.3170
0.4457	0.4453	0.4448	-0.3180	-0.3177	-0.3174
0.4453	0.4457	0.4453	-0.3177	-0.3180	-0.3177
0.4453	0.4453	0.4457	-0.3177	-0.3177	-0.3180
0.0520	0.0000	0.0000	0.0521	0.0000	0.0000
0.1711	0.0520	0.0000	0.1712	0.0521	0.0000
0.3079	0.1711	0.0520	0.3079	0.1712	0.0521
0.4461	0.3079	0.1711	0.4461	0.3079	0.1712
0.5805	0.4461	0.3079	0.5806	0.4461	0.3079
0.7096	0.5805	0.4461	0.7097	0.5806	0.4461
0.8331	0.7096	0.5805	0.8333	0.7097	0.5806
0.9511	0.8331	0.7096	0.9514	0.8333	0.7097
1.0638	0.9511	0.8331	1.0642	0.9514	0.8333
1.1714	1.0638	0.9511	1.1719	1.0642	0.9514
1.2741	1.1714	1.0638	1.2748	1.1719	1.0642
1.3722	1.2741	1.1714	1.3730	1.2748	1.1719
1.4660	1.3722	1.2741	1.4669	1.3730	1.2748
1.5555	1.4660	1.3722	1.5567	1.4669	1.3730
1.6410	1.5555	1.4660	1.6424	1.5567	1.4669
1.7227	1.6410	1.5555	1.7243	1.6424	1.5567
1.8007	1.7227	1.6410	1.8026	1.7243	1.6424
1.8753	1.8007	1.7227	1.8775	1.8026	1.7243
1.9465	1.8753	1.8007	1.9490	1.8775	1.8026
2.0147	1.9465	1.8753	2.0174	1.9490	1.8775
2.0797	2.0147	1.9465	2.0829	2.0174	1.9490
2.1420	2.0797	2.0147	2.1454	2.0829	2.0174
2.2014	2.1420	2.0797	2.2052	2.1454	2.0829
2.2583	2.2014	2.1420	2.2624	2.2052	2.1454
2.3126	2.2583	2.2014	2.3171	2.2624	2.2052
2.3646	2.3126	2.2583	2.3694	2.3171	2.2624
2.4142	2.3646	2.3126	2.4195	2.3694	2.3171
2.4617	2.4142	2.3646	2.4674	2.4195	2.3694

2.5071	2.4617	2.4142	2.5132	2.4674	2.4195
2.5506	2.5071	2.4617	2.5570	2.5132	2.4674
2.5921	2.5506	2.5071	2.5989	2.5570	2.5132
2.6318	2.5921	2.5506	2.6390	2.5989	2.5570
2.6698	2.6318	2.5921	2.6774	2.6390	2.5989
2.7061	2.6698	2.6318	2.7141	2.6774	2.6390
2.7408	2.7061	2.6698	2.7492	2.7141	2.6774
2.7740	2.7408	2.7061	2.7829	2.7492	2.7141
2.8058	2.7740	2.7408	2.8150	2.7829	2.7492
2.8362	2.8058	2.7740	2.8458	2.8150	2.7829
2.8653	2.8362	2.8058	2.8753	2.8458	2.8150
2.8931	2.8653	2.8362	2.9035	2.8753	2.8458
2.9197	2.8931	2.8653	2.9305	2.9035	2.8753
2.9451	2.9197	2.8931	2.9564	2.9305	2.9035
2.9694	2.9451	2.9197	2.9811	2.9564	2.9305
2.9927	2.9694	2.9451	3.0048	2.9811	2.9564
3.0150	2.9927	2.9694	3.0274	3.0048	2.9811
3.0363	3.0150	2.9927	3.0491	3.0274	3.0048
3.0567	3.0363	3.0150	3.0699	3.0491	3.0274
3.0762	3.0567	3.0363	3.0898	3.0699	3.0491
3.0949	3.0762	3.0567	3.1088	3.0898	3.0699
3.1127	3.0949	3.0762	3.1270	3.1088	3.0898
3.1298	3.1127	3.0949	3.1445	3.1270	3.1088
3.1127	3.1298	3.1127	3.1270	3.1445	3.1270
3.1127	3.1127	3.1298	3.1270	3.1270	3.1445

Apéndice C.

Resultados de la simulación del primer incremento de las señales manipuladas con sus derivadas numéricas. Con cambio del 10 % en la referencia del nivel.

Landa	Landa cuadrado	Cambio de nivel 10 %		Derivada m1	Derivada m2
		m1	m2		
0	0	100	100		
0.5	0.25	70.77946586	89.90352255	-58.4411	-20.1930
1	1	64.1319174	83.912618	-13.2951	-11.9818
1.5	2.25	61.80408758	81.62868907	-4.6557	-4.5679
2	4	60.260486	80.07196784	-3.0872	-3.1134
2.5	6.25	59.33515725	79.03094358	-1.8507	-2.0820
3	9	58.57132204	78.23833295	-1.5277	-1.5852
3.5	12.25	58.06698248	77.62706558	-1.0087	-1.2225
4	16	57.60070348	77.11196778	-0.9326	-1.0302
4.5	20.25	57.24873732	76.70949464	-0.7039	-0.8049
5	25	56.94048397	76.33162118	-0.6165	-0.7557
5.5	30.25	56.65623135	76.04994558	-0.5685	-0.5634
6	36	56.4399095	75.78050718	-0.4326	-0.5389
6.5	42.25	56.23104755	75.54896575	-0.4177	-0.4631
7	49	56.0424136	75.35156582	-0.3773	-0.3948
7.5	56.25	55.88882319	75.16288345	-0.3072	-0.3774
8	64	55.7402154	75.0059868	-0.2972	-0.3138
8.5	72.25	55.60169947	74.86300318	-0.2770	-0.2860
9	81	55.48892841	74.72553843	-0.2255	-0.2749
9.5	90.25	55.37915291	74.61002409	-0.2196	-0.2310
10	100	55.27273057	74.50273087	-0.2128	-0.2146
10.5	110.25	55.18375788	74.39864307	-0.1779	-0.2082
11	121	55.09978044	74.30753263	-0.1680	-0.1822
11.5	132.25	55.01754655	74.22408608	-0.1645	-0.1669
12	144	54.94054656	74.14232461	-0.1540	-0.1635
12.5	156.25	54.87418072	74.06652937	-0.1327	-0.1516
13	169	54.80855976	73.99939364	-0.1312	-0.1343
13.5	182.25	54.74376248	73.93299388	-0.1296	-0.1328
14	196	54.68559494	73.86749401	-0.1163	-0.1310
14.5	210.25	54.63174953	73.81181849	-0.1077	-0.1114
15	225	54.57813186	73.75630804	-0.1072	-0.1110

Apéndice D.

Resultados de la simulación del primer incremento de las señales manipuladas con sus derivadas numéricas. Con cambio del 10 % en la referencia de la temperatura

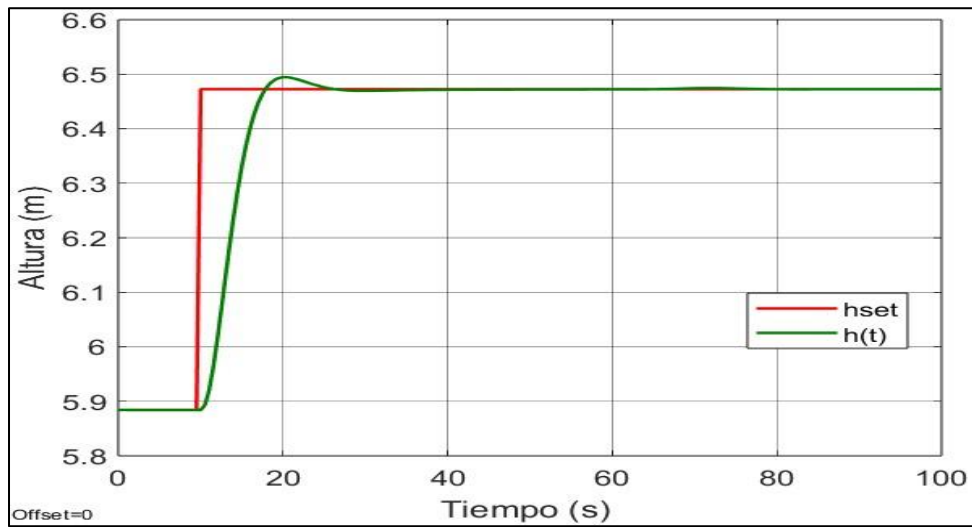
Landa	Landa cuadrado	Cambio de Temperatura 10 %			
		m1	m2	Derivada m1	Derivada m2
0	0	100	0		
0.5	0.25	66.78885531	52.36512291	-66.4222894	104.7302458
1	1	63.02447274	56.02510285	-7.52876514	7.319959887
1.5	2.25	61.37950745	57.58149897	-3.28993059	3.11279224
2	4	60.43088977	58.46602014	-1.89723536	1.769042345
2.5	6.25	59.8126518	59.04159834	-1.23647594	1.151156404
3	9	59.36056038	59.46353001	-0.90418284	0.843863335
3.5	12.25	59.01555066	59.78397629	-0.69001945	0.640892565
4	16	58.74934899	60.03683573	-0.53240333	0.505718864
4.5	20.25	58.53810987	60.23730622	-0.42247825	0.400940981
5	25	58.36987342	60.39904721	-0.33647289	0.323481985
5.5	30.25	58.23625138	60.52920904	-0.26724409	0.260323668
6	36	58.12960337	60.63381384	-0.21329601	0.209209604
6.5	42.25	58.04421763	60.71781808	-0.17077148	0.168008475
7	49	57.9763062	60.78525222	-0.13582286	0.13486828
7.5	56.25	57.92197257	60.839372	-0.10866727	0.108239565
8	64	57.87858595	60.88260999	-0.08677325	0.086475962
8.5	72.25	57.84427428	60.91688083	-0.06862333	0.068541684
9	81	57.81719976	60.9438093	-0.05414905	0.053856941
9.5	90.25	57.79598408	60.96469568	-0.04243136	0.041772762
10	100	57.77962701	60.98072337	-0.03271412	0.032055378
10.5	110.25	57.76709922	60.99268437	-0.02505559	0.023921999
11	121	57.75786654	61.0013331	-0.01846536	0.017297461
11.5	132.25	57.75116191	61.00732722	-0.01340926	0.01198825
12	144	57.74656754	61.01094698	-0.00918874	0.00723952
12.5	156.25	57.74357892	61.01234897	-0.00597725	0.002803974
13	169	57.74176863	61.01248124	-0.00362056	0.000264542
13.5	182.25	57.74051015	61.01295314	-0.00251697	0.000943807
14	196	57.74051015	61.01295314	0	0
14.5	210.25	57.74051015	61.01295314	0	0
15	225	57.74051015	61.01295314	0	0

Apendice E.

Resultados obtenidos utilizando el método de sintonización propuesto por Manzanera Reverter, C. (2017)

Figura E1.

Respuesta de nivel ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 4,5$

**Figura E2.**

Respuesta de Temperatura ante el cambio en el nivel utilizando $\lambda = 4,5$

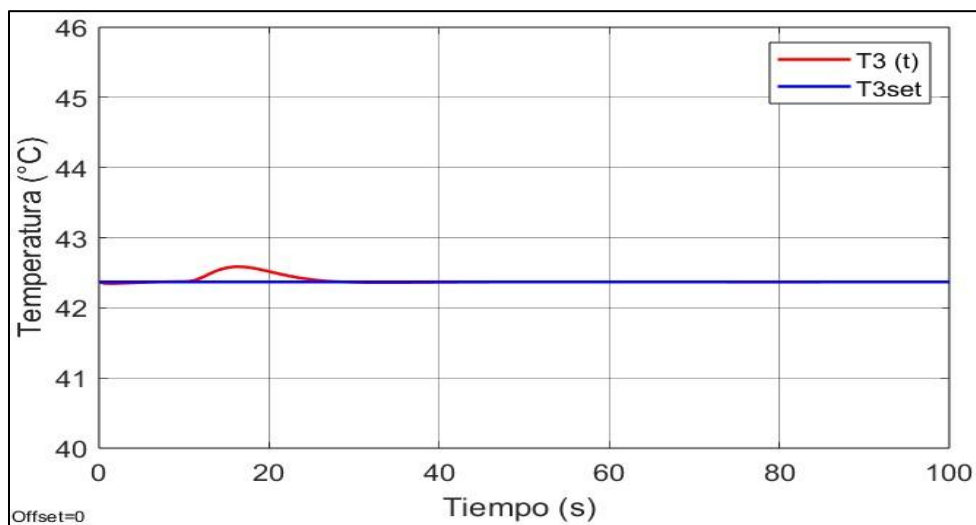
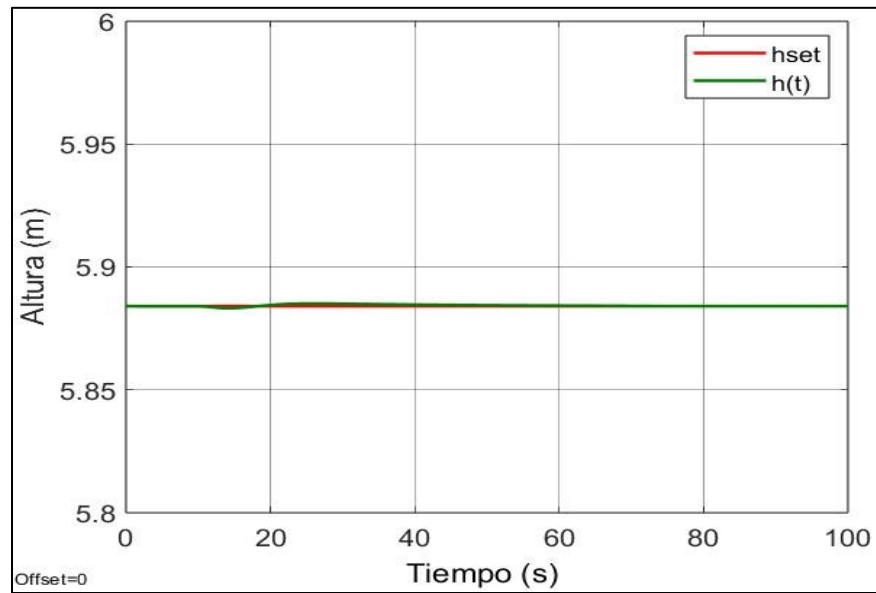
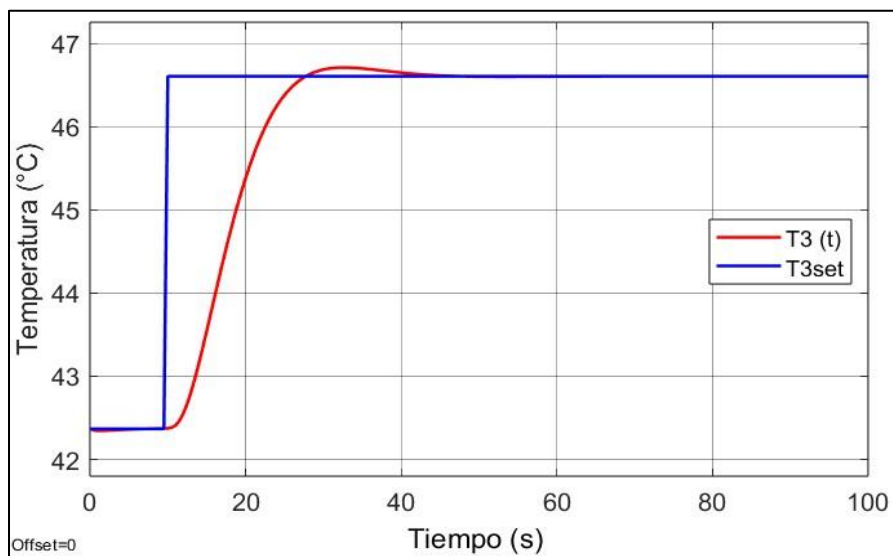


Figura E3.

Respuesta del nivel ante el cambio en la temperatura utilizando $\lambda = 4,5$

**Figura E4.**

Respuesta de la Temperatura ante el cambio en su referencia utilizando $\lambda = 4,5$



Apendice F.

Simulación de los dos lazos de control feedback

