

# Diseño y desarrollo de una plataforma experimental para evaluar estrategias de control en procesos térmicos

C. Sebastián Macías-Bejarano

Hoover Mujica-Ortega

*Facultad de Ingeniería - UNAM, Departamento de Control y Robótica, Edificio P, Lab. Automatización, C.U., 04510, México D.F. e-mail: MaciasBSNS@outlook.com, hmujica@dctrl.fi-b.unam.mx*

**Resumen:** En este artículo se presenta el proceso de diseño y construcción de un sistema térmico enfocado a la enseñanza de la ingeniería de control desde una perspectiva industrial. Se explica de manera general el principio físico asociado y el método de obtención del modelo matemático de quinto orden que describe su dinámica, la cual está fundamentada en el principio de enfriamiento de Newton y las leyes de la termodinámica. Así mismo, se muestra la implementación de dicho modelo en un *software* capaz de emular su comportamiento y que puede ser manipulado mediante un controlador industrial gracias a su capacidad de enviar y recibir información por medio de comunicación OPC. Se valida a dicho conjunto de ecuaciones diferenciales comparando los datos medidos en la plataforma experimental con los obtenidos a partir del modelo matemático, para así demostrar que ambas herramientas son utilizables en el proceso de formación de ingenieros especializados en control automático industrial, ofreciendo ventajas como la reducción de costos y mitigación de riesgos.

**Palabras clave:** Modelado de sistemas físicos, Procesos térmicos, Control automático industrial, Emulador de procesos, Dinámica de sistemas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Estadísticas publicadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, han demostrado que más del 30 % de la composición del producto interno bruto mexicano se produce a partir de las actividades económicas secundarias, las cuales están directamente ligadas al sector industrial (INEGI, 2018). Debido a la gran demanda de profesionistas altamente calificados que se requieren para satisfacer las necesidades en este sector, surge la preocupación de generar herramientas que permitan asegurar la calidad en la formación educativa, ya que como se afirma en (Reséndiz, 2011), durante la formación de ingenieros es necesaria la aplicación metodologías de enseñanza que no se limiten a la formación teórica, sino que permitan adquirir experiencia mediante la práctica tutelada y la experiencia empírica, lo que permite alcanzar objetivos educacionales más ambiciosos, tal como lo plantea la taxonomía de Bloom (Bloom et al., 1984).

En ese sentido, este desarrollo busca contribuir en la formación de ingenieros del área de control y automatización, dotando de una herramienta que permita complementar y reafirmar las habilidades técnicas que los estudiantes de ingeniería requieren. Particularmente, se enfoca en el estudio de procesos térmicos ya que son recurrentes en el ambiente industrial y se requiere que los profesionistas, que se integran al campo laboral, conozcan el principio de funcionamiento y tengan experiencia en el manejo de estos sistemas, con la finalidad de mitigar riesgos.

Una primera solución, que sería ideal para afrontar este problema, sería que las universidades pudieran contar con un equipo similar a los que se encuentran en la

industria, sin embargo esto se traduciría en costos demasiado elevados debido a su construcción y mantenimiento sin mencionar que las altas temperaturas generadas por un equipo de estas características suponen un gran riesgo tanto para los estudiantes y profesores como para las instalaciones de un laboratorio convencional, por lo cual se vuelve una opción inviable.

En años recientes, ha habido esfuerzos por parte de diversas personas e instituciones que han desarrollado trabajos con los que se abordan las distintas situaciones anteriormente citadas; un ejemplo de esto es el desarrollo (Elettronica-Veneta, 2002). Sin embargo, a pesar de que se trata efectivamente de un sistema térmico con el cual se pueden demostrar los fundamentos de la teoría de control, no está diseñado para ser utilizado desde un enfoque industrial, por lo que no es una opción que permita una transición simple y natural entre este entorno y el ambiente profesional.

Así mismo, existen trabajos que abordan diversas metodologías de modelado de sistemas térmicos, así como estrategias de validación que proponen utilizar una señal de prueba a la entrada del sistema físico y del modelo matemático propuesto, para obtener la gráfica de su salida y compararlas, verificando así la validez del modelo (Mastouri and Bouguila, 2017).

Por otro lado, existen herramientas de software como *EmulSis* cuyo propósito es reunir un conjunto de procesos físicos de distintas naturalezas y resolver sus modelos matemáticos en tiempo real, con la finalidad de poder ser controlados mediante un PLC (*Programmable Logic Controller*) o cualquier controlador con capaci-

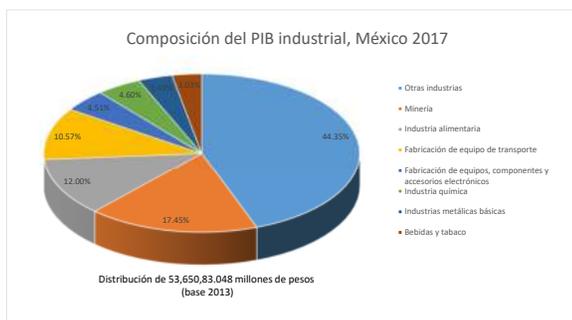


Figura 1. Composición producto interno bruto industrial

dad de comunicación OPC (*OLE for Process Control*). Convirtiéndose así, en una herramienta auxiliar en la enseñanza del control industrial (Mendoza, 2018).

Por lo tanto, en este artículo se presenta el diseño y desarrollo de una plataforma experimental capaz de simular el principio de funcionamiento de los procesos térmicos que se encuentran habitualmente en la industria, proporcionando un medio de evaluación práctica, fácil de desmontar y mantener, compacto y que la magnitud de su constante de tiempo no implique que sea un sistema excesivamente lento de modo que sea implementable en sesiones de clase.

Así mismo, se presenta el modelo matemático que describe el fenómeno de transferencia de calor asociado al sistema, cuya respuesta debe aproximarse al comportamiento observado en el proceso térmico real. Para validar dicho modelo se realizan pruebas experimentales que permiten comparar su respuesta con la del sistema físico, con lo cual se garantiza la correcta implementación en un nuevo módulo de *EmulSis* y con esto emular el proceso térmico en tiempo real.

## 2. PROCESOS TÉRMICOS

Tal como se muestra en la Figura 1, en México actualmente predominan industrias como la minera y la alimentaria; en las cuales es recurrente encontrar equipos como hornos de fundición, calderas e intercambiadores de calor; este tipo de equipos debido a la magnitud del volumen de producción que manejan a diario suponen muchos riesgos y es necesario que tanto los operadores como los ingenieros encargados de controlarlos y automatizarlos conozcan este fenómeno físico a profundidad y tengan experiencia con su manejo.

Como es sabido, el fenómeno de transferencia de calor ocurre mediante tres mecanismos básicos: *conducción*, *convección* y *radiación*. La transferencia por conducción ocurre cuando dos o más cuerpos se encuentran en contacto, puede ser fácilmente identificado por ejemplo, en disipadores. El fenómeno de convección existe únicamente cuando alguno de los materiales involucrados es un fluido; cuando las moléculas de dicho fluido se calientan tienden a reordenarse debido a los cambios en su densidad; esto provoca que las más calientes fluyan hacia el exterior mientras que las más frías lo hagan hacia el interior; al repetirse este proceso el resultado son corrientes y flujos internos de recirculación. Y finalmente, la transferencia por radiación es la que se da cuando un cuerpo se encuentra a una temperatura



Figura 2. Ensamble del proceso térmico

muy elevada lo que provoca emisiones de ondas electromagnéticas en el espectro de los infrarrojos; cuando esta radiación incide sobre un segundo cuerpo sus moléculas son excitadas y sus átomos chocan entre sí, lo que provoca un incremento en la temperatura (Çengel, 2011).

## 3. DISEÑO DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL

El dispositivo propuesto es un sistema cerrado en cuyo interior está contenido un volumen cúbico de aire de  $20.8[cm]$  en cada una de sus aristas, cuenta con un sensor modelo TD2231 colocado en la parte superior de la cámara, se utiliza una fuente conmutada a  $15[V]$  con una capacidad máxima de  $2.7[A]$ . Se instaló un foco de halógeno modelo G4 capaz de entregar una potencia máxima de  $20[W]$  ante una excitación a  $12[V]$  a modo de fuente de calor el cual ha sido dispuesto sobre un micrómetro de profundidad con el cual es posible modificar la distancia existente entre el foco y el sensor con el objetivo de que la dinámica del sistema pueda ser más rápida o lenta según se necesite. En las Figuras 2 y 3 se muestra la disposición general de los componentes utilizados. Para hacer funcionar al sistema se implementó un circuito electrónico compuesto por un par de amplificadores de potencia modelo L165ST conectados en configuración no inversora; estos amplificadores tienen como propósito dar la ganancia necesaria a la señal de control que será generada a partir del controlador industrial utilizado. Así mismo, se integró una resistencia de  $250[\Omega]$  entre la terminal no inversora y tierra, con lo que se asegura que se cumpla con el estándar industrial  $0 \sim 20[mA]$ . Por otro lado, la tarjeta de circuito impreso se diseñó considerando una distribución de componentes de modo que ambos amplificadores se situaran en el centro de la tarjeta y a una cierta distancia que permitiera que se colocara un ventilador auxiliar sobre sus disipadores, lo que ayuda a mantener a los circuitos integrados bajo condiciones de operación óptimas. Finalmente se buscó que todos los



Figura 3. Vista superior del sistema



Figura 4. Circuito electrónico

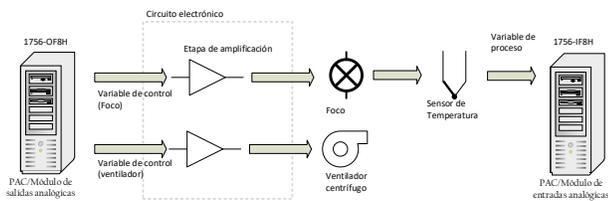


Figura 5. Diagrama general del proceso

componentes que tuvieran alguna terminal conectada a tierra se situaran en la región más externa lo que permite un plano de masa de dimensiones apropiadas y ayude a mantener la calidad de las señales. El principio de operación se presenta en la Figura 5 y consiste en la generación de una señal de control por medio del módulo de salidas de un controlador industrial que ingresará al circuito electrónico del sistema, esto enciende la fuente de calor, luego la temperatura generada es leída por el sensor de temperatura que a su vez devuelve una señal al controlador por medio de su módulo de entradas analógicas. En este caso, se utilizó un controlador industrial de la familia ControlLogix de Rockwell Automation que tiene la propiedad de poder implementar nativamente algoritmos de control continuo, no lineal y en tiempo discreto, tales como: el control por lógica difusa, PID, PIDE (*Enhanced* PID), IMC entre otros. Esto beneficia ampliamente la aplicación del proceso



Figura 6. Proceso térmico implementado

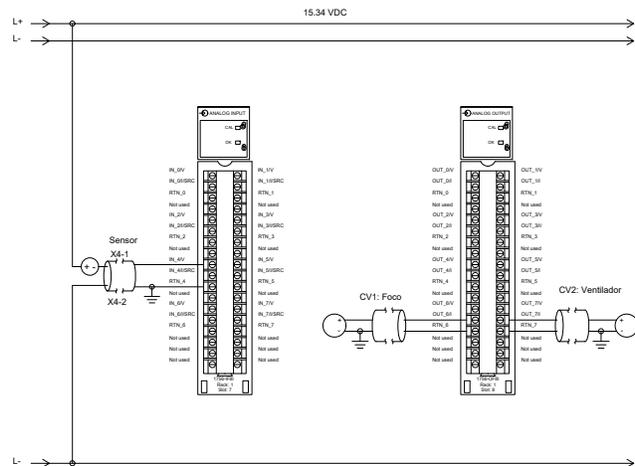


Figura 7. Diagrama de conexiones al controlador

desarrollado, ya que se vuelve posible implementar distintas estrategias de control y evaluar su desempeño controlando a este sistema; propiedad que, en una clase orientada al control industrial, de manera práctica, aporta un gran valor (Rockwell-Automation, 2016). En la figura 7 se muestra el diagrama de conexiones al controlador utilizado durante la fase de experimentación del proyecto.

#### 4. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Debido a que se requiere un modelo en ecuaciones diferenciales, este estará dado en función de las temperaturas asociadas a cada uno de los cuerpos que lo componen, las cuales se consideran como sus variables de estado; dichas temperaturas son las asociadas al gas xenón dentro del foco, del vidrio que lo recubre, de la sección más sensible del sensor, del volumen de aire dentro de la cámara y de las paredes de MDF con las

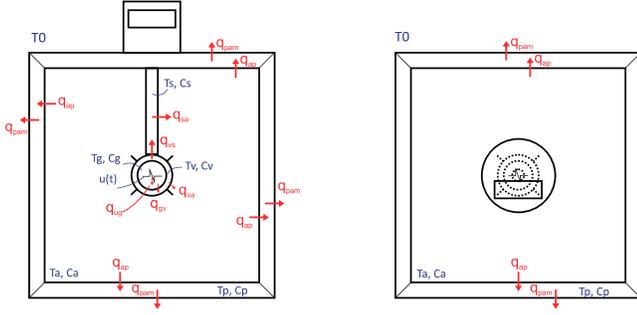


Figura 8. Flujos calóricos considerados en el modelo que la estructura fue construida. Tales variables están expresadas mediante la notación:  $T_g$ ,  $T_v$ ,  $T_s$ ,  $T_a$  y  $T_p$  y el subíndice expresa la variable respectiva a la que se refieren.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [T_p \ T_a \ T_s \ T_v \ T_g]^T$$

La Figura 8 muestra los flujos calóricos considerados, así como las variables asociadas a este tipo de dinámica denominadas resistencia y capacitancia térmica que se calculan mediante  $R = \frac{L}{sA}$  y  $C = mc$  respectivamente, donde  $A$  es el área de la superficie de contacto en la cual incide el calor,  $L$  es el espesor de dicho material,  $s$  es el coeficiente de conductividad térmica dado en  $[\frac{W}{mK}]$ ,  $m$  es la masa de la sustancia en  $[kg]$  y  $c$  el calor específico del material dado en  $[\frac{kcal}{kg^\circ C}]$  (Ogata, 2003). La metodología utilizada toma como base la ley de enfriamiento de Newton, expresada matemáticamente mediante la expresión:

$$q_{ab} = \frac{T_a - T_b}{R} \quad (1)$$

donde el numerador expresa al flujo calórico producto de la diferencia de temperaturas, mientras que el denominador la resistencia térmica  $R$  inherente a la transferencia de calor entre distintos materiales, dada en  $[\frac{K}{W}]$ . Así mismo, se considera el efecto de radiación para la transferencia de calor entre el vidrio que cubre al foco y el sensor, mediante la expresión  $q = (E_1\sigma A_1)(T_1^4 - T_2^4)$ , donde  $E$  es la emitancia y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann. Al expresar cada uno de los flujos de calor en términos de la ley de enfriamiento de Newton se obtienen las expresiones:

$$\begin{aligned} q_{ug} &= \frac{u(t) - T_g}{R_g} \\ q_{gv} &= \frac{T_g - T_v}{R_v} \\ q_{va} &= \frac{T_v - T_a}{R_{ca}} \\ q_{vs} &= \frac{T_v - T_s}{R_s} + (E_v\sigma A_v)(T_v^4 - T_s^4) \\ q_{sa} &= \frac{T_s - T_a}{R_a} \\ q_{ap} &= 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p} \right) \\ q_{pam} &= 6 \left( \frac{T_p - T_0}{R_{ca}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Posteriormente, para poder agrupar al conjunto de ecuaciones obtenidas se toma como base el principio de conservación de la energía, conocido específicamente en esta área de la física como la primera ley de la

Parámetros físicos					
Parámetro	MDF	Aire	Acero inoxidable	Vidrio	Xenón
$A$ $[m^2]$	0.043	0.017	$26.8 \times 10^{-6}$	$52 \times 10^{-6}$	$49 \times 10^{-6}$
$L$ $[m]$	0.003	0.104	0.0255	0.000581	0.0091
$s$ $[\frac{W}{mK}]$	0.095	0.02	15.1	0.6	0.00569
$c$ $[\frac{J}{kgK}]$	490	1012	480	876	158

Tabla 1. Parámetros del sistema

termodinámica, expresada matemáticamente mediante la expresión:

$$C_T \dot{T} = \Sigma q_e - \Sigma q_s \quad (3)$$

Con lo cual, al considerar que dicha ley enuncia que toda la energía que ingresa a un sistema sale de él puede plantearse el conjunto de ecuaciones que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} C_p \dot{T}_a &= q_{ap} - q_{pam} \\ C_a \dot{T}_a &= q_{va} + q_{sa} - q_{ap} \\ C_s \dot{T}_s &= q_{vs} - q_{sa} \\ C_v \dot{T}_v &= q_{gv} - q_{vs} + q_{va} \\ C_g \dot{T}_g &= q_{ug} - q_{gv} \end{aligned} \quad (4)$$

Ahora es posible realizar la sustitución de 2 en 4 tras lo cual, y al dividir entre el valor de la capacitancia térmica asociada a cada una de las expresiones se obtiene el modelo matemático en ecuaciones diferenciales 5, capaz de describir a la dinámica del sistema propuesto (Çengel, 2011).

$$\begin{aligned} \dot{T}_p &= 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_p} \right) - 6 \left( \frac{T_p - T_0}{R_a C_p} \right) \\ \dot{T}_a &= \frac{T_v - T_a}{R_a C_a} + \frac{T_s - T_a}{R_a C_a} - 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_a} \right) \\ \dot{T}_s &= \frac{T_v - T_s}{R_s C_s} - \frac{T_s - T_a}{R_a C_s} \\ \dot{T}_v &= \frac{T_g - T_v}{R_v C_v} - \frac{T_v - T_s}{R_s C_v} - \frac{T_v - T_a}{R_a C_v} + (E_v\sigma A_v) \left( \frac{T_v^4}{C_v} - \frac{T_s^4}{C_v} \right) \\ \dot{T}_g &= \frac{T_0 + u(t) - T_g}{R_g C_g} - \frac{T_g - T_v}{R_v C_g} \end{aligned} \quad (5)$$

En la Tabla 1 se muestran los valores asociados a los parámetros correspondientes de los materiales utilizados, los cuales dependen directamente de su composición química.

## 5. PROCESO EMULADO EN TIEMPO REAL

Para implementar este sistema como un nuevo módulo en *EmulSis*, fue necesaria la realización de una animación descriptiva que se muestra en su interfaz, para esto se diseñaron y utilizaron modelos de cada componente en *SolidWorks* con lo que se buscó darle una máxima similitud con el sistema construido.

Una vez teniendo este ensamble, se realizó la animación del efecto de encendido del foco en la cual se hizo variar el parámetro de irradiancia desde cero hasta un valor máximo de  $1.5 [\frac{W}{cm^2}]$ . Para un mejor acabado en este proceso, se generaron una serie de fotogramas independientes mediante una herramienta de renderizado, los cuales fueron recopilados y agrupados para producir una animación para visualizar los efectos de la variable de control en el sistema.

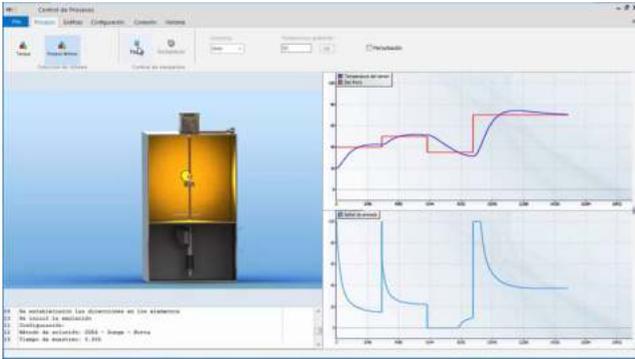


Figura 9. Emulador de procesos

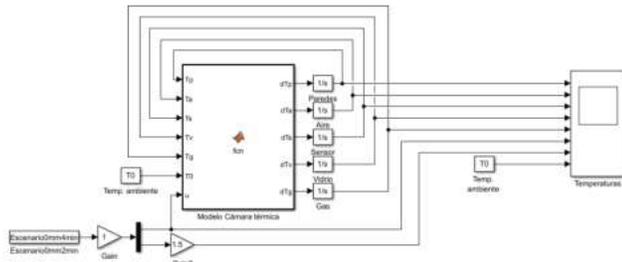


Figura 10. Programa en Matlab/Simulink

Aprovechando la capacidad que *EmulSis* posee de resolver sistemas de ecuaciones diferenciales de orden  $n$  mediante métodos numéricos iterativos, se implementó el modelo matemático obtenido, de modo que al resolverlo en tiempo real *EmulSis* es capaz de emular su comportamiento y con ayuda de su capacidad de comunicación mediante OPC es posible conectarse a un controlador industrial real y realizar lectura y escritura de variables como si se tratara de un sistema dinámico conectado físicamente por lo que este emulador se convierte en una herramienta auxiliar más para los propósitos que se pretendían alcanzar.

## 6. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Para realizar la validación del modelo matemático es necesario aplicar una serie de pruebas que permitan verificar que su respuesta es similar a la que se obtiene con el sistema físico; para esto se excita a ambos sistemas con la misma señal de entrada  $u(t)$  en cada experimento.

En la primera prueba, se utiliza una señal escalón de amplitud máxima y cuatro minutos de duración, por un lado, fue necesaria la implementación del programa en *Matlab/Simulink* que se muestra en la Figura 10, lo que permitió la excitación del modelo matemático. Por otro lado, se diseñó un programa en lenguaje *LD 61131-3*, en el entorno de programación *Studio 5000 Logix Designer* en el cual se genera la señal de excitación para el sistema físico y mediante la implementación de un diagrama de tendencias interno se realizó la captura de todos los datos leídos por el sensor a lo largo de la prueba. Estos datos fueron exportados a Simulink y comparados con la respuesta generada por el modelo matemático, tras lo cual se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 11. Aunque se observa que ambas respuestas son similares es posible notar que no son del todo iguales, esto se

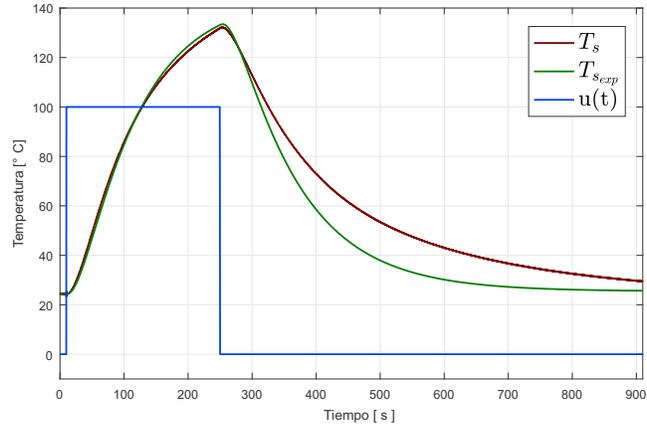


Figura 11. Prueba 1: Comparación de respuesta del sensor ante entrada escalón

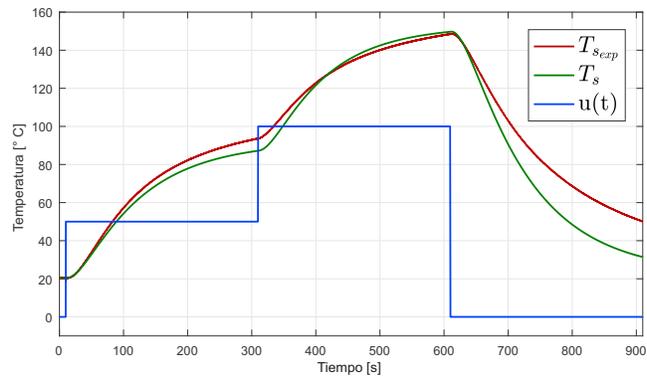


Figura 12. Prueba 2: Comparación de respuesta del sensor ante entrada de escalones variables

atribuye a varias razones: a que durante la aplicación de la metodología para proponer el modelo matemático se omitieron algunas dinámicas que están involucradas en el sistema, ya que los fenómenos térmicos presentan un comportamiento no lineal y, para este caso, fueron despreciadas; a que el método supone la utilización de ciertas aproximaciones con la finalidad de volverse más sencillo de entender y aplicar pero, aunque pequeño, dicho error por simplificación se hace presente cuando se realiza una comparación con una dinámica física real; y finalmente, se puede atribuir esto a errores en la medición y/o estimación de los parámetros asociados a los materiales, dicho lo cual; aunque ambas gráficas no son idénticas muestran características dinámicas muy similares por lo que esta prueba sirve para observar en primera instancia que el modelo es aplicable mas no preciso.

En el segundo experimento, se utiliza una señal compuesta por tres escalones consecutivos de diferentes amplitudes, Con lo cual se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura 12. Puede observarse que tras la excitación con una señal un tanto más compleja, una vez más se tiene una respuesta de características similares aunque se observa también que existe una cierta diferencia entre sus magnitudes, lo cual es causado por el cierto grado de error que se observa desde el primer experimento en la zona de descarga de la curva que se genera a partir del modelo matemático. La evaluación de estas pruebas permiten concluir que este modelo, aunque perfectible, sirve para ser implementado en el emulador de procesos



Figura 13. Análisis termográfico del proceso

y que describe de manera cercana a la dinámica del sistema real. Finalmente, en la Figura 13 se muestra la realización de un análisis termográfico que permitió visualizar la evolución del sistema y el comportamiento del intercambio de calor entre los distintos elementos que lo componen, corroborando así, que se cumple el comportamiento descrito por el modelo matemático.

## 7. CONCLUSIONES

Como resultado de la evaluación experimental, en la que se utilizaron herramientas como la implementación de control en lazo abierto, es posible observar que se cumplió con el objetivo primordial de diseñar, construir e implementar una plataforma experimental que resultara en una herramienta auxiliar en la enseñanza de la ingeniería de control automático industrial. Así mismo, se considera que el alcance de este desarrollo excede a esta premisa, pues fácilmente podría ser utilizado para demostrar ciertos fenómenos y principios físicos en otras áreas que no se limitan a la transferencia de calor sino que podría utilizarse para análisis de materiales, diseño mecánico, instrumentación electrónica, entre muchas otras; ya que su simplicidad de manejo y bajo costo permiten que sea posible adaptarlo o modificarlo en cierta medida según convenga, por lo que abre la puerta a una gran diversidad de trabajos futuros que tomen como base esta propuesta, la cual es perfectible en muchos aspectos.

Por otro lado, los distintos experimentos que se planearon tuvieron como objetivo conocer la dinámica y evolución de los estados del sistema y cumplieron efectivamente con su propósito ya que al utilizar una señal de prueba como es un escalón de amplitud máxima, las gráficas obtenidas ofrecen una descripción general del fenómeno y al ingresar una señal más compleja, se esperaría observar que la respuesta sigue el mismo

comportamiento aunque con sus respectivas variaciones, lo cual pudo verificarse exitosamente.

La comparación con los datos medidos permite observar que, aunque el modelo propuesto está fundamentado en las leyes de la física, se siguió una metodología válida y en estructura es correcto; existe un cierto grado de error, el cual se debe a diversas consideraciones en el proceso de modelado, por lo que también es válido concluir que un modelo más acertado requiere de la mayor cantidad de consideraciones físicas posibles, pues sus dinámicas, aunque en muchos casos de manera aislada parezcan despreciables, al trabajar en conjunto representan una diferencia considerable con respecto a lo que ocurre de manera natural en el sistema construido lo cual sugiere que como trabajo a futuro puede trabajarse en el desarrollo de un mejor modelo que tome como base metodologías y estrategias más avanzadas, como lo es la estimación dinámica de parámetros, lo que permita obtener un modelo con una dinámica más parecida a la del sistema físico, lo que finalmente podría utilizarse para la evaluación del desempeño de controladores complejos que se basan en la respuesta de un modelo enfocado, en este sentido, hacia un sistema termodinámico.

Y finalmente, se dio continuidad al trabajo iniciado mediante el desarrollo de *EmulSis*, el cual busca el mismo objetivo de brindar una herramienta auxiliar, en este caso de software, que aporte en la formación de futuros ingenieros en el área del control y la automatización ya que es un área muy necesaria en todo el mundo y para la cual es muy benéfico contar con plataformas que permitan realizar prácticas y que generalmente no puede realizarse pues son equipos de costos muy elevados y de los que es importante disponer pues, a nivel industrial, son utilizados y la familiarización temprana con ellos podría resultar en una disminución en el riesgo asociado a su manejo.

## REFERENCIAS

- Bloom, B., Krathwohl, D., and Masia, B. (1984). *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals*. Number v. 1 in *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals*. Longman.
- Çengel, Y. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Elettronica-Veneta (2002). *Transductores y control de temperatura*. Manual Profesor-Alumno 20B-E-PE-G34-0, Elettronica Veneta, 31045 Motta di Livenza (Treviso) Italia.
- INEGI (2018). *Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Technical report, Banco de Información Económica. Producto interno bruto trimestral, Valores a precios de 2013, Actividades secundarias.
- Mastouri, M. and Bouguila, N. (2017). A methodology for thermal modelling and predictive control for building heating systems. In *18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 568–573.
- Mendoza, B. (2018). *Emulador de sistemas dinámicos para la práctica y enseñanza de control automático industrial*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Cd. Mx.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson educación. Pearson Educación.
- Reséndiz, N.D. (2011). *El rompecabezas de la ingeniería: Por qué y cómo se transforma el mundo*. La Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica.
- Rockwell-Automation (2016). 1756 Controllogix I/O Specifications. Technical Data 1756-TD002J-EN-P, Rockwell Automation, 1201 South Second Street, Milwaukee.