



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**T E S I S**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Eléctrico - Electrónico**

**P R E S E N T A**

César Sebastián Macías Bejarano

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Jurado asignado

Presidente: Mtra. Gloria Correa Palacios  
Secretario: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz  
Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega  
1<sup>er</sup> suplente: Dr. Edmundo Rocha Cózatl  
2<sup>do</sup> suplente: M.I. Serafín Castañeda Cedeño

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio  
de Automatización.

Ciudad de México

Asesor de tesis

---

Dr. Hoover Mujica Ortega





# Agradecimientos

A mi familia, por brindarme todo su amor y apoyo incondicional, sin los cuales nada de esto hubiera sido posible y a quienes debo la persona que he llegado a ser.

A mis amigos y compañeros, por acompañarme a lo largo de todo este proceso y convertirlo en una experiencia inolvidable.

A mis profesores, por la gran entrega y dedicación con la que ejercen tan noble labor.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Automatización, por ser una pieza fundamental en el desarrollo de mi carrera y por permitirme formar parte de este gran equipo de trabajo.

A la Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para ejercer con todo orgullo esta profesión.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y permitirme ser parte de esta comunidad tan grande y única, por darme la oportunidad de crecer tanto humana como académicamente y por todo lo que me ha dado.

Finalmente a mi asesor, colega y amigo Hoover Mujica Ortega, por su gran ejemplo, apoyo y dedicación que me permitieron no sólo desarrollar este trabajo, sino que me inspiraron para querer enfocar mi carrera a la automatización.

## Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mi mamá y a mi papá por estar siempre a mi lado, por apoyarme y enseñarme el valor de la responsabilidad y la perseverancia; porque esta, que es la culminación de mi formación académica, no es únicamente un logro personal sino que también es un logro que comparto con ustedes, porque sé que no ha sido fácil pero al final después de todas las complicaciones, ¡lo logramos!. A mis hermanos David y Tanya que me han apoyado incondicionalmente y hemos estado juntos desde siempre, se que están tan orgullosos de mi como yo lo estoy de ustedes; los amo.

A mi abuela, con quien tuve la fortuna de poder compartir este momento y a mi abuelo que donde quiera que esté se que estaría muy orgulloso de la persona en la que me he convertido gracias a su ejemplo. A mis padrinos Adriana y Daniel que han sido como unos segundos padres para mi. A mis tíos Guille, Pedro, Alejandro, Moni, Luz, Uni, Mau, Betty, Cristina, Franco, Paty y todos los demás que me es imposible nombrar porque se volvería una lista muy extensa pero que de todos modos saben que les estoy eternamente agradecido por el apoyo que me han brindado, lo mismo que a mis primos Daniel, Andrea, Erick, Alfredo, Ana Laura, Montse, Sofi y todos los demás que no menciono pero que saben que son muy importantes para mi.

A mis primitos Uni, Helios, Leo, Henry y a mi sobrina Abi porque se que aunque quizás ahora son muy pequeños para entenderlo, quiero poder ser un buen ejemplo para ustedes y que mi trabajo pueda ayudar a demostrarles que con el esfuerzo y dedicación suficientes pueden llegar a donde quieran.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a mis grandes amigos: Alexis, Gill, Brandon, Ahmed, Edgar, Pablo, Erick, Paloma, Vania, Rodolfo, Marissa, Óscar, Brenda, a todos mis amigos del LA Squad y a todos aquellos a quienes no menciono pero que han estado siempre en las buenas y en las malas. Muchas gracias.

## Resumen

En esta tesis se presenta el diseño e implementación de una plataforma experimental que representa a un proceso térmico, dicha plataforma está enfocada al fortalecimiento del proceso de enseñanza de control automático desde una perspectiva industrial.

El propósito de este trabajo es contribuir de manera significativa en la formación de los estudiantes de ingeniería de control, dotando de una plataforma funcional que les permita evaluar estrategias de control por medio de controladores industriales programables. Este desarrollo, cubre el área de oportunidad que representa la poca disponibilidad de este tipo de herramientas en el mercado, y que son necesarias pues permiten desarrollar habilidades y competencias para resolver problemas de una manera más eficiente.

Este tipo de herramientas cobran una gran importancia, ya que actualmente en México casi un tercio de las actividades económicas forman parte del sector industrial, en el cual son recurrentes sistemas como intercambiadores de calor, hornos y calderas, por lo que es necesario que los ingenieros encargados de la automatización de dichos procesos, cuenten con experiencia en el control y supervisión de temperatura, minimizando así los riesgos asociados a su operación. Debido a que un porcentaje importante de estos sistemas se encuentran instalados en procesos críticos, una mala implementación podría representar no solo pérdidas económicas importantes, sino también provocar desastres fatales.

Por lo tanto, para la implementación de esta plataforma experimental, se contemplaron tres etapas de desarrollo: diseño de la plataforma experimental, obtención de un modelo matemático capaz de representar su dinámica y la validación del mismo.

El diseño de esta plataforma fue pensado de modo que se pudiera representar, en términos generales, la dinámica de los sistemas térmicos; considerando para su construcción un material de bajo costo y que fuera un buen aislante térmico capaz de garantizar la repetibilidad de los experimentos.

En este sentido, el diseño estructural comprende una cámara de forma cúbica en la parte superior en la que se colocó un sensor de temperatura industrial modelo TD2231 con capacidad de comunicación I/O Link y una lámpara de halógeno de 20 [W] representando a la fuente de calor del proceso. Dicha lámpara se posicionó sobre un micrómetro de profundidad en el centro de la cámara, permitiendo así modificar la distancia de separación entre la lámpara y el sensor y, en consecuencia, alterar el comportamiento de la dinámica del sistema. La sección secundaria, ubicada debajo de la cámara principal, se dividió en dos subsecciones, una frontal y una trasera; la frontal fue diseñada para que el operador pueda tener libre acceso al micrómetro de profundidad, mientras que la posterior se destinó para el resguardo de la tarjeta electrónica que permite el funcionamiento de la plataforma. Esta tarjeta electrónica incluye un circuito de amplificación de potencia para estimular a los actuadores y uno de acondicionamiento, de modo que las señales se ajusten a las necesidades de voltaje y corriente que requiere el Controlador de Automatización Programable *ControlLogix* de la marca Rockwell Automation<sup>®</sup>.

En la etapa de obtención del modelo matemático, se emplea una metodología basada en el principio de enfriamiento de Newton y las leyes de la termodinámica, esto permitió proponer un modelo matemático de quinto orden no lineal conformado por un conjunto de ecuaciones diferenciales, donde los parámetros fueron obtenidos a partir de las propiedades y características físicas de los elementos que integran a la plataforma como son: dimensiones, calores específicos, conductividades térmicas, entre otros. Este modelo tiene como objetivo representar prescriptivamente los mecanismos de transferencia de calor involucrados en el proceso. Posteriormente dichas ecuaciones se implementaron como un nuevo módulo en la herramienta de software *EmulSis*; este programa basa su funcionamiento en un motor de solución de ecuaciones diferenciales por medio de métodos numéricos iterativos, lo que le permite operar como un emulador de procesos gracias a su capacidad de comunicación por medio del estándar OPC, por lo que esta herramienta también puede ser manipulada mediante un controlador industrial de cualquier marca o modelo.

En la tercera y última etapa se realizó el proceso de validación del modelo matemático; en primera instancia, se ingresó una señal de prueba en lazo abierto para conocer, por medio de gráficas, la dinámica de los estados del sistema. Así, se pudo verificar que la respuesta del modelo matemático era aproximada a la del proceso térmico construido. Posteriormente, se utilizaron capturas termográficas para verificar que lo descrito por el modelo matemático coincidió con lo observado en el proceso físico. Como segundo paso, se realizó una serie de pruebas que permitieron evaluar la respuesta del sistema bajo distintos escenarios; esto permitió observar una dinámica similar entre ambos, comprobando así la validez del modelo matemático. Finalmente, se implementó una ley de control PID por medio del controlador industrial *ControlLogix L71*, desarrollada bajo el estándar IEC 61131-3 con la finalidad de verificar los tiempos de respuesta de ambos sistemas, con lo que se concluye que ambas herramientas pueden ser utilizadas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la teoría de control y la automatización, cumpliendo con los objetivos propuestos y abriendo la posibilidad a trabajos futuros que sirvan para la mejora y perfeccionamiento de las herramientas desarrolladas.

---

# Contenido

<b>Índice de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.3. Formulación del problema . . . . .	6
1.4. Objetivos . . . . .	7
1.5. Contribuciones . . . . .	8
1.6. Organización de la tesis . . . . .	9
<b>2. Fundamento teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Transferencia de calor . . . . .	12
2.2. Parámetros térmicos . . . . .	13
2.2.1. Resistencia térmica . . . . .	13
2.2.2. Capacitancia térmica . . . . .	14
<b>3. Diseño y desarrollo de la plataforma experimental</b>	<b>17</b>
3.1. Diseño estructural . . . . .	20
3.2. Diseño electrónico . . . . .	23
3.3. Modelo matemático . . . . .	26
3.4. Emulador de procesos industriales . . . . .	30
3.4.1. Implementación del sistema térmico . . . . .	31
<b>4. Evaluación y validación</b>	<b>35</b>
4.1. Escenario de evaluación: Entrada escalón . . . . .	35
4.2. Escenario de evaluación: Sensor a pleno contacto y entrada variante en el tiempo . . . . .	39
4.3. Escenario de evaluación: Incremento en la distancia entre el sensor y el actuador . . . . .	40
4.4. Evaluación de la plataforma en lazo cerrado . . . . .	42
4.5. Discusión . . . . .	42

<b>5. Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>A. Planos de diseño estructural</b>	<b>49</b>
<b>B. Diseño electrónico</b>	<b>55</b>
<b>C. Rutinas de control en lenguaje LD IEC 61131-3</b>	<b>59</b>
<b>Referencias</b>	<b>61</b>



# Índice de figuras

1.1. Producto interno bruto, México 2017 . . . . .	2
1.2. Composición del producto interno bruto industrial . . . . .	3
1.3. Módulo G34/EV . . . . .	5
1.4. Splash de EmulSis . . . . .	6
2.1. Flujo de calor . . . . .	12
2.2. Convección térmica . . . . .	13
2.3. Resistencia térmica . . . . .	14
3.1. Lazo de control . . . . .	19
3.2. Diagrama general del proceso . . . . .	19
3.3. Ensamble . . . . .	20
3.4. Render de plataforma experimental . . . . .	21
3.5. Vista superior del sistema . . . . .	21
3.6. Vista posterior del sistema . . . . .	22
3.7. Diseño CAD del circuito electrónico . . . . .	24
3.8. Circuito electrónico construido . . . . .	25
3.9. Distribución de señales en conector Centronics . . . . .	25
3.10. Diagrama de flujos calóricos . . . . .	27
3.11. Interfaz de Emulsis . . . . .	30
3.12. Diseño de partes en SolidWorks <sup>®</sup> . . . . .	31
3.13. Ensamble en SolidWorks <sup>®</sup> . . . . .	32
3.14. Proceso de renderizado . . . . .	33
3.15. Generación de animación . . . . .	33
3.16. Proceso térmico implementado en EmulSis . . . . .	34
4.1. Datos de temperaturas medidas . . . . .	36
4.2. Programa de pruebas en Matlab/Simulink . . . . .	36
4.3. Respuesta del modelo matemático . . . . .	37
4.4. Análisis termográfico . . . . .	38
4.5. Captura termográfica del proceso . . . . .	38
4.6. Prueba 1: Comparación de respuesta del sensor ante entrada escalón . . . . .	39

4.7. Prueba 2: Comparación de respuesta del sensor ante entrada de escalones variables . . . . .	40
4.8. Prueba 3: Ensayo 1 - 3mm . . . . .	41
4.9. Prueba 3: Ensayo 2 - 5mm . . . . .	41
4.10. Prueba 3: Ensayo 3 - 10mm . . . . .	41
4.11. Implementación de ley de control en plataforma experimental . . . . .	42
4.12. Implementación de ley de control en Emulador de procesos . . . . .	43
5.1. Plataforma experimental . . . . .	47
A.1. Distribución de piezas . . . . .	49
A.2. Planos: Paredes derecha y trasera . . . . .	50
A.3. Planos: Paredes izquierda, superior y canaletas . . . . .	51
A.4. Planos: Paredes inferior, frontal, intermedia y división de sección inferior .	52
A.5. Proyecciones de ensamble . . . . .	53
B.1. Placa de circuito impreso . . . . .	55
B.2. Diagrama esquemático de la tarjeta electrónica . . . . .	56
B.3. Diagrama de conexiones a módulos de entradas y salidas analógicas . . . .	57
C.1. Programa en lenguaje Ladder para generación de señal de entrada en primer escenario de evaluación . . . . .	59
C.2. Programa en lenguaje Ladder para generación de señal de entrada en segundo escenario de evaluación . . . . .	60

# Índice de tablas

3.1. Tabla de componentes . . . . .	18
3.2. Análisis de costos . . . . .	18
3.3. Parámetros del sistema . . . . .	29



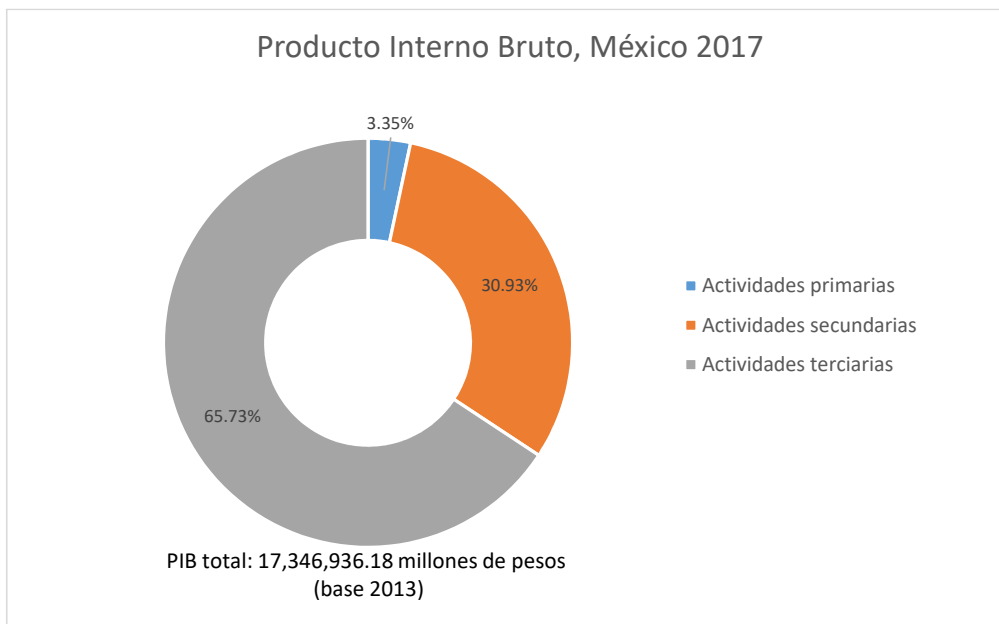
# Capítulo 1

## Introducción

En países con economías emergentes, como es el caso de México, el producto interno bruto está conformado en su mayoría por actividades económicas terciarias (como se muestra en la Figura 1.1) y al no existir tecnología nacional para satisfacer las necesidades de la industria, es más rentable la inversión en empresas de servicios que en las de transformación de materia prima, contrario a lo que ocurre en países con un alto nivel de desarrollo, donde la inversión se concentra en el sector industrial [INEGI, 2018].

Como es bien sabido, actualmente vivimos en un mundo globalizado; esto ha permitido que las barreras en el intercambio de información sean cada vez menos significativas, que los mercados internacionales puedan unificarse y que exista un nivel de intercambio cultural sin precedentes; este fenómeno ha sido posible gracias a que, entre otros factores, la tecnología ha avanzado a pasos agigantados. Aunque esto representa grandes ventajas en el mercado de bienes y servicios, puede ser desfavorable para países en vías de desarrollo, debido al aumento en la competencia por la inclusión de profesionistas de todo el mundo al mercado laboral local, causando que sea necesaria una formación académica mucho más sólida para que los egresados de las instituciones educativas sean suficientemente competitivos y puedan ejercer su profesión [Appadurai, 2001].

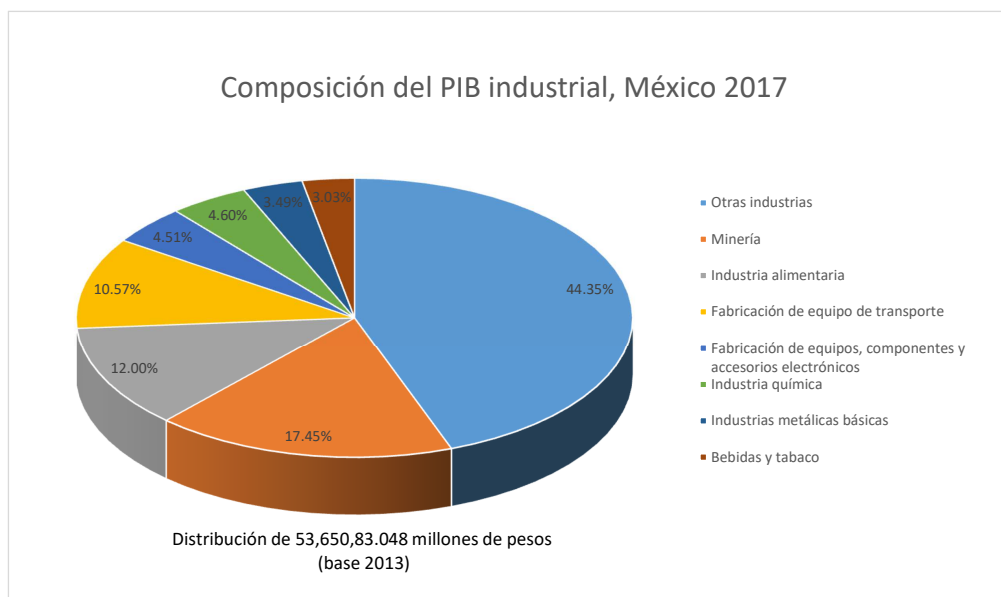
Diversos estudios afirman que es posible estimar el nivel de desarrollo de un país considerando el número de científicos e ingenieros con los que cuenta, ya que son vitales para el desarrollo de nuevas tecnologías, solución de problemas y generación de la infraestructura necesaria para tener sistemas eficientes en materia de comunicaciones y transporte, que son la base para que la economía de un país fluya; en primera instancia, la labor y responsabilidad de formar a este tipo de profesionistas pertenece a las instituciones de educación superior, por lo que es necesario que dichas instituciones se mantengan tan actualizadas como les sea posible, y así ofrezcan conocimientos vigentes al momento de que sus egresados se integren al mercado laboral [Rascón, 2013].



**Figura 1.1.** Producto interno bruto, México 2017

Desde el punto de vista de la psicología educativa, y tomando como base tanto la teoría de las inteligencias múltiples como la taxonomía de Bloom, para que la información se convierta en conocimiento de una manera efectiva, es necesario implementar metodologías de aprendizaje procedimentales, es decir, que las lecciones impartidas en las aulas no sean puramente teóricas, sino que se implementen estrategias y recursos didácticos pensados para que los estudiantes sean capaces de comprender los nuevos conceptos, relacionándolos con experiencias y conocimientos previamente adquiridos [Gardner, 2011]. Cada persona aprende de manera distinta, y la implementación de este tipo de estrategias es muy benéfica, pues son capaces de estimular diversas áreas en el cerebro relacionadas con las habilidades cognitivas; asegurando así, la mayor comprensión posible y ofreciendo resultados mucho más satisfactorios [Bloom, *et al.*, 1984].

Tal como lo explican algunos autores, a través de los años ha podido observarse que los ingenieros con habilidades técnicas más sólidas, fueron aquellos que durante su formación académica, realizaron prácticas supervisadas por ingenieros experimentados; es importante, pues permite observar la aplicación directa de diversos fenómenos físicos y conceptos aprendidos durante las sesiones teóricas; asegurando así, un mejor aprendizaje [Reséndiz, 2011].



**Figura 1.2.** Composición del producto interno bruto industrial

## 1.1. Motivación

En vista de lo anterior, lo que motiva a esta tesis es el deseo de contribuir en la formación de los estudiantes de la ingeniería de control y la automatización por medio del desarrollo de una herramienta que les permita complementar y reafirmar sus habilidades técnicas, con la que puedan evaluar el desempeño de sus estrategias de control utilizando controladores de lógica programable (*PAC*, por sus siglas en inglés), como los que se utilizan a nivel industrial. Esto aporta un valor agregado en su formación y permite cubrir el área de oportunidad que representa la poca disponibilidad de este tipo de herramientas en el mercado, y que son necesarias para desarrollar habilidades y competencias que les permitan resolver problemas de una manera eficiente.

Se consideró que esta plataforma debía estar enfocada en procesos térmicos ya que, como se muestra en la Figura 1.2, en México predominan industrias como la minera en la cual, existen procesos críticos donde es vital mantener la temperatura dentro de ciertos rangos de operación para evitar catástrofes; o la alimentaria que tiene grandes volúmenes de producción y un mal control térmico podría significar pérdidas económicas significativas. Es por eso que los ingenieros encargados de la automatizar dichos procesos requieren tener experiencia en este tipo de sistemas.

Una posible propuesta sería disponer de un equipo industrial completamente operativo en los laboratorios de prácticas. Sin embargo, lo costoso que resulta su construcción y mantenimiento, la cantidad de estudiantes que lo requieren y la dinámica lenta que ca-

racteriza a los sistemas térmicos, hace inviable esta opción.

Debido al impacto que tiene el no disponer de un equipo que cubra las necesidades descritas, fue preciso pensar en una alternativa viable para este propósito, naciendo la idea de generar un dispositivo que permita emular un proceso térmico. Adicionalmente, como una motivación personal, quiero poder retribuir a la Universidad Nacional Autónoma de México por lo mucho que me ha dado, contribuyendo en su noble labor de formar profesionistas del más alto nivel por medio del desarrollo que permitió este trabajo, el cual se pensó no solo con la idea de desarrollar una herramienta didáctica sino que, al ser de bajo costo, permite reducir el costo de adquisición de equipos como son calderas, hornos o intercambiadores de calor.

Afortunadamente, existen diversos trabajos de investigación y productos en el mercado que se tomaron como punto de partida para identificar y proponer la solución más adecuada a esta carencia.

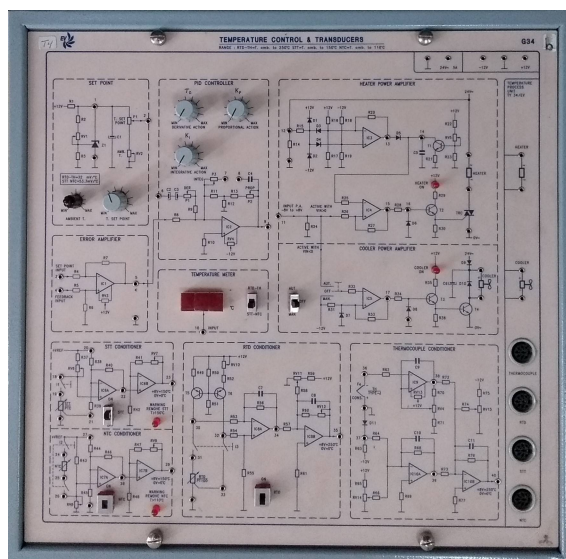
## 1.2. Antecedentes

Debido a que era necesario tener un punto de partida para cada una de las etapas previstas durante la planeación de esta tesis, se da crédito y se menciona a los trabajos que representaron una mayor influencia y que sentaron las bases para que este desarrollo fuera posible:

En *Design of a pedagogic instrument for teaching software process improvement*, desarrollado en colaboración por la Universidad de Medellín y la Universidad Politécnica de Madrid [Álvarez, *et al.*, 2014], se explica que para definir metodologías de enseñanza, de modo que alumnos sean capaces de tomar decisiones conscientes, es necesario que dichas estrategias persigan objetivos determinados. A su vez, este documento habla sobre el proceso de desarrollar instrumentos pedagógicos, pasando por las etapas de identificación de la temática, establecimiento del propósito del instrumento, definición de características claves, análisis de instrumentos existentes como punto de partida, evaluación inicial del instrumento y realimentación con lecciones aprendidas; con lo cual podría garantizarse que las herramientas desarrolladas efectivamente ayuden a mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje.

Con respecto a sistemas térmicos enfocados para la enseñanza de la teoría de control, en el mercado existen propuestas como el módulo G34 de la marca Elettra Veneta<sup>®</sup>, mostrado en la Figura 1.3. Este módulo está compuesto por un arreglo de amplificadores operacionales en cascada con ganancias variables, utilizados para implementar controladores PI, PD y PID; y amplificadores de potencia que proporcionan la ganancia de corriente





**Figura 1.3.** Módulo G34/EV

necesaria para que opere un sistema calefactor y uno de enfriamiento. También utiliza una etapa de acondicionamiento de señales para el sensor de temperatura utilizado para cerrar el lazo de control [ElettronicaVeneta, 2002].

Sin embargo, aunque efectivamente se trata de un sistema térmico con el cual se demuestran los fundamentos de la teoría control, una desventaja es que no está específicamente diseñado para el control de procesos industriales; su objetivo es el análisis de transductores de temperatura, circuitos de acondicionamiento y control automático utilizando amplificadores operacionales.

Por otro lado, *A methodology for thermal modelling and predictive control for building heating systems* es un trabajo de investigación que busca abordar metodologías de modelado y validación de sistemas térmicos [Mastouri y Bouguila, 2017]. En este documento, se explica el proceso para obtener el modelo matemático de un calefactor en una recámara y se buscaba aprovechar de una manera eficiente la energía suministrada al sistema. El autor validó su modelo utilizando una metodología que consiste en ingresar una señal conocida al calefactor y medir la respuesta de la recámara; posteriormente ingresó la misma señal al modelo matemático y realizó la comparación de sus respuestas. Se verificó que, aunque ambas gráficas no eran del todo iguales, ambos sistemas se comportaron de manera muy similar y esto le permitió concluir que el modelo propuesto es válido para representar la dinámica de su sistema.

Así mismo, se tomó como base el desarrollo de *EmulSis*, el cual es una herramienta de software diseñado para contener una variedad de procesos físicos de distintas naturalezas.



**Figura 1.4.** Splash de EmulSis

Basa su funcionamiento en un motor de solución de ecuaciones diferenciales por medio de métodos numéricos iterativos, funciona como un emulador de procesos gracias a su capacidad de comunicarse con controladores industriales de cualquier marca o modelo por medio del estándar OPC (*OLE for Process Control*, por sus siglas en inglés)[Mendoza, 2018].

Con el panorama descrito por estos trabajos, se buscó dar una solución a los problemas que a continuación se describen.

### 1.3. Formulación del problema

Es necesario que los ingenieros en el área de control, al ingresar al ambiente profesional, cuenten con experiencia en el control de sistemas físicos, ya que en la industria no existe un sólo tipo de proceso estandarizado y es indispensable esta preparación para resolver problemas eficientemente.

Como se mostró en la Figura 1.2, en México actualmente predominan industrias del sector minero y de producción de alimentos que dentro de sus procesos incluyen lazos de control de temperatura. Esto da como pauta la necesidad de fortalecer la experiencia de los alumnos del área de automatización en este tipo de sistemas.

Por ello, el diseño de un sistema térmico experimental debe considerar que sea seguro, con rangos de temperatura que permitan sesiones de práctica de duración adecuada, modular y de bajo costo.

Debido a las altas temperaturas que manejan los procesos industriales, instalar uno en un laboratorio supondría riesgos no sólo para instalaciones y equipo, sino que directamente se traduciría en riesgos a la integridad física de los estudiantes y del personal docente, los cuales las instituciones educativas no pueden ni deben asumir.

Dicho esto, para que la plataforma que se propone sea capaz de dar una solución a los problemas previamente descritos, se plantearon una serie de objetivos para que el proyecto pudiera ser llevado a cabo de una manera ordenada y sin perder de vista los alcances previstos.

## 1.4. Objetivos

Realizar el diseño, desarrollo e implementación de una plataforma experimental basada en un proceso térmico que permita demostrar los principios de la teoría control de procesos desde una perspectiva industrial, utilizando conocimientos y técnicas de diversas áreas de la ingeniería para, finalmente, ofrecer una solución a los problemas previamente mencionados.

Desarrollar un circuito electrónico que permita integrar, acondicionar y filtrar las diversas señales requeridas para la operación del sistema; considerando los rangos de operación del Controlador de Automatización Programable *ControlLogix* de la marca Rockwell Automation<sup>®</sup>, con el que fue controlado.

Diseñar la estructura del proceso considerando que el dispositivo debe poder representar la dinámica general de los sistemas térmicos sin exponer a los estudiantes a riesgos innecesarios, ser de un tamaño reducido para que no sea demasiado lento, fácil de mantener, construido con un material que fuera un buen aislante térmico para garantizar la repetibilidad de los experimentos y de bajo costo.

Proponer un modelo matemático que describa de la manera más aproximada posible el fenómeno de transferencia de calor involucrado en el proceso.

Implementar el modelo matemático propuesto en un nuevo módulo de EmulSis, permitiendo ampliar los alcances de este trabajo previamente desarrollado.

Desarrollar experimentos que permitan confirmar la validez del modelo matemático propuesto, por medio de la comparación de su respuesta con la del proceso térmico físico.

Evaluar el desempeño de una ley de control tanto en el sistema diseñado como en el emulador de procesos y verificar si su velocidad de respuesta permite que sean utilizados durante una sesión de clases convencional.

## 1.5. Contribuciones

Esta tesis permitió desarrollar una plataforma experimental diseñada para comprender y reafirmar diversos conceptos de la teoría del control y la automatización utilizando controladores industriales.

Debido a que se busca subsanar la escasez de herramientas para la enseñanza del control en procesos térmicos, esta plataforma sirve como punto de partida para generar discusiones en las aulas sobre la relevancia de los procesos térmicos en la industria, las precauciones que deben tomarse durante su operación, riesgos asociados a la pérdida de control, aplicaciones de este tipo de sistemas, sistemas utilizados en México, normatividad en el diseño de equipos para este propósito, entre muchas otras.

Al ser una plataforma fácilmente replicable y de bajo costo permite que, en un laboratorio convencional, cada estudiante pueda disponer de una, lo que permite prácticas mucho más eficientes y que se desarrollen competencias profesionales más sólidas. Además, al no tener que invertir en un sistema costoso como los que se encuentran en la industria, es posible invertir el dinero en otras áreas que las instituciones educativas lo requieran, sin descuidar la necesidad de disponer de una amplia variedad de procesos.

La experiencia temprana controlando este tipo de sistemas permite que los ingenieros que se integran al ambiente profesional disminuyan el riesgo asociado a un equipo de proporciones industriales y se minimice la posibilidad de que el egresado pueda tomar una decisión inapropiada y perder el control del mismo que, como se ha mencionado previamente, esta situación podría implicar pérdidas económicas significativas o, en un caso menos afortunado, pérdida de vidas humanas. Por lo cual, se resalta la gran importancia de disponer de una amplia variedad de sistemas dinámicos durante la formación académica, con la finalidad de minimizar factores de riesgo.

Aunque sale de los alcances previstos para esta tesis, el modelo matemático propuesto permite además la validación y evaluación del desempeño de estrategias de control relativamente más complejas como lo son el control por lógica difusa, control por retroalimentación de estados, control adaptable, control por modos deslizantes e incluso estrategias de control no lineal, ampliando así su campo de aplicación.

Este desarrollo además permitió ampliar las capacidades del emulador de procesos *EmulSis* mediante la implementación del proceso térmico como un módulo adicional, contribuyendo a cumplir con su objetivo de ser un banco de procesos de distintas naturalezas.

Y, finalmente, la documentación que se ha generado como parte de este proyecto permite que este proceso pueda ser fácilmente replicado para que sea utilizado para cumplir objetivos mencionados en la sección 1.4.

## 1.6. Organización de la tesis

La presente tesis está dividida en cinco Capítulos, los cuales han sido organizados de manera que haya una transición lo más clara posible entre cada etapa del proyecto; siendo el primero una introducción que permita entender la motivación detrás de este trabajo y los objetivos que se buscó alcanzar.

En el Capítulo 2 se explica, de manera general, el fenómeno de transferencia de calor, mencionando los conceptos más importantes para entender este principio físico, así como algunas de sus propiedades.

En el Capítulo 3 se presentan las tres etapas fundamentales del desarrollo de la plataforma experimental, que incluyen el diseño de la estructura del sistema térmico y del circuito electrónico que permite su funcionamiento y la metodología de obtención del modelo matemático que describe su dinámica, así como su implementación en el emulador de procesos *EmulSis*.

En el Capítulo 4 se reportan los experimentos realizados para comprobar la validez del modelo, así como una breve discusión y análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que permitieron llegar las pruebas realizadas, así como el trabajo a futuro que podría realizarse para subsanar las áreas de oportunidad identificadas durante el desarrollo del mismo.



# Capítulo 2

## Fundamento teórico

Ya que la finalidad de esta tesis fue generar una plataforma que permita evaluar estrategias de control en un sistema térmico, es importante conocer y entender los distintos fenómenos físicos que toman parte en él ya que es la base de la metodología utilizada para la obtención del modelo matemático del sistema.

En termodinámica uno de los conceptos fundamentales es la *transferencia de calor*, denotada matemáticamente mediante la variable  $q$  y se define como “energía en tránsito por efectos de la diferencia de temperatura entre dos cuerpos o entre un cuerpo y su entorno”. El comportamiento de esta energía en tránsito fue descrito formalmente mediante como *la ley de enfriamiento de Newton*, representada matemáticamente mediante la expresión:

$$q_{ab} = \frac{T_a - T_b}{R} \quad (2.1)$$

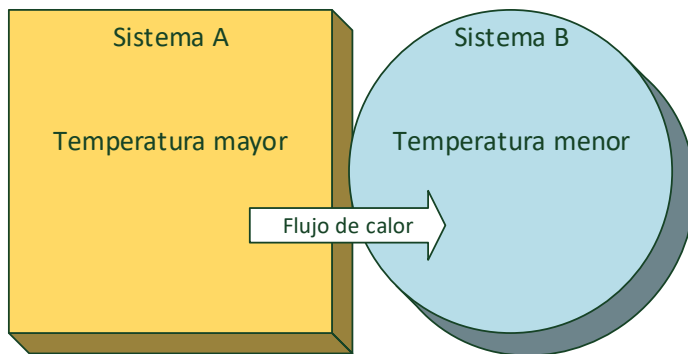
Donde en el numerador se expresa la diferencia de temperaturas, y en el denominador la resistencia térmica  $R$ , inherente al flujo de energía entre distintos materiales, dada en  $\left[\frac{K}{W}\right]$ .

Por otro lado, la ley de enfriamiento de Newton establece que siempre que exista una interacción entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, el cuerpo más caliente cederá energía calorífica al cuerpo más frío, tal como muestra en el diagrama de la Figura 2.1.

Este proceso ocurre de manera natural en todo sistema existente en el universo y, debido que el calor es una forma de energía, podemos inferir que en todos los casos es aplicable el *principio de conservación de la energía*, comúnmente enunciado como: “la energía no se crea ni se destruye, solo se transfiere” al que, particularmente en esta rama de la física, se le conoce como *la primera ley de la termodinámica* y puede ser expresada matemáticamente de la forma:

$$C_T \dot{T} = \Sigma q_e - \Sigma q_s \quad (2.2)$$

Donde  $\Sigma q_e$  corresponde a la suma de todos los flujos que ceden calor al elemento y  $\Sigma q_s$  es la suma de aquellos flujos que lo reciben [Arora, 2001].



**Figura 2.1.** Flujo de calor

## 2.1. Transferencia de calor

En sistemas termodinámicos, el principio de enfriamiento de Newton se lleva a cabo por medio de tres mecanismos: *conducción*, *convección* y *radiación*.

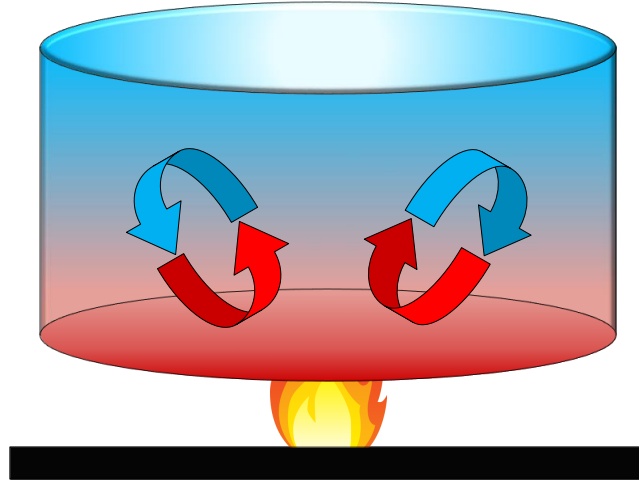
Explicado de manera simple, la transferencia por conducción es la que se da cuando dos o más cuerpos se encuentran en contacto uno con otro. Un ejemplo claro de este mecanismo podemos identificarlo en un disipador, el cual se coloca en pleno contacto con el circuito al que se pretende extraer calor.

La transferencia por convección se da únicamente cuando uno de los materiales involucrados en el sistema es un fluido, en este caso, las moléculas de dicho fluido se calientan y tienden a reordenarse debido a los cambios en su densidad, lo cual provoca que las más calientes se alejen de la fuente de calor mientras que las más frías se acercan; al repetirse este proceso, el resultado son corrientes y flujos internos de recirculación. Para una mejor interpretación, se muestra un diagrama de este proceso en la Figura 2.2.

Finalmente, la transferencia por radiación es la que ocurre cuando un cuerpo se encuentra a una temperatura muy elevada, esto provoca emisiones de ondas electromagnéticas en el espectro de los infrarrojos que, al incidir en un segundo cuerpo a una temperatura menor, las moléculas de este se excitan y, debido al choque de los átomos entre sí, el cuerpo comienza a calentarse; este método de transferencia existe sin la necesidad de que ambos cuerpos se encuentren en contacto directo uno con el otro, ni inmersos en un medio físico; el ejemplo más claro de este mecanismo de transferencia es el calor que obtenemos por medio de la radiación generada por el sol.

Teniendo presentes estos tres métodos de transferencia, es posible entender la metodología con la cual se formulará el modelo matemático. Esta metodología consiste en identificar las entradas y salidas de energía para cada uno de los cuerpos que integran al sistema,





**Figura 2.2.** Convección térmica

de manera similar a lo que establecen las Leyes de Kirchhoff; considerando que dichos flujos de calor se comportan cumpliendo con lo establecido por la ley de enfriamiento y la primera ley de la termodinámica [Çengel, 2011]. Sin embargo, para un completo entendimiento del modelo matemático, es necesario conocer dos elementos importantes que forman parte del sistema térmico, que son inherentes a los materiales y dependen directamente de su composición química.

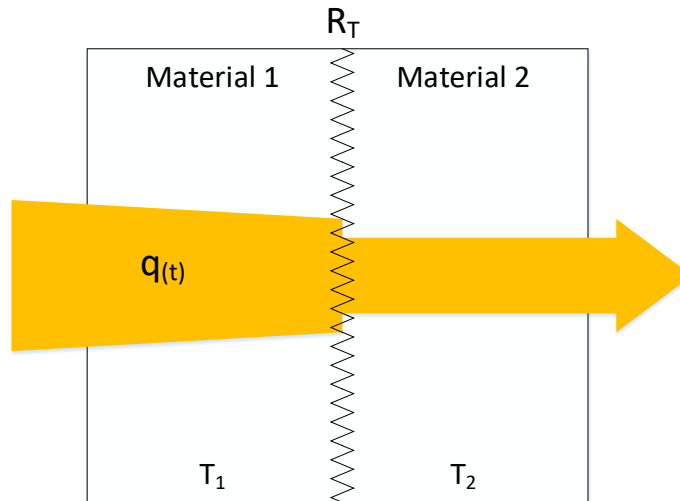
## 2.2. Parámetros térmicos

De manera similar a lo que ocurre con otros tipos de sistemas físicos, en los térmicos también existe una propiedad que se opone al flujo de energía y otra que describe la cantidad de ella que puede ser almacenada. Estas propiedades son la resistencia y capacitancia térmica respectivamente y se explican a continuación.

### 2.2.1. Resistencia térmica

En todo sistema físico existe una propiedad que representa oposición al paso de la energía, esto podemos verlo en la fricción, la resistencia eléctrica o la *resistencia térmica*, denotada como  $R_T$ .

Cuando el calor fluye, la resistencia que estará involucrada será la del material que se encuentra a una menor temperatura y esta, según su magnitud, permitirá que al cuerpo ingrese energía en mayor o menor medida. Tal como se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Resistencia térmica

Para calcular el valor de este parámetro será necesario conocer el método mediante el cual se esté dando el flujo calórico, para el caso de la transferencia por conducción se utiliza la expresión:

$$R = \frac{L}{sA} \quad (2.3)$$

Y para la transferencia por convección:

$$R = \frac{1}{hA} \quad (2.4)$$

Donde  $A$  es el área de la superficie de contacto en la cual incide el calor, dada en  $[m^2]$ ,  $L$  es el espesor de dicho material en  $[m]$ ,  $s$  es el coeficiente de conductividad térmica dado en  $[\frac{W}{mK}]$  y finalmente  $h$  es el coeficiente de convección térmica dado en  $[\frac{W}{m^2K}]$  [Ogata, 2003].

### 2.2.2. Capacitancia térmica

La capacitancia térmica, por otro lado, es la propiedad que representa a la capacidad de los materiales de retener el calor (denotado matemáticamente mediante la variable  $C$ ). Se define formalmente como la variación en el calor almacenado sobre la variación en la temperatura, o bien:

$$C = mc$$

donde  $m$  es la masa de la sustancia en  $[kg]$  y  $c$  es el calor específico del material dado en  $[\frac{kcal}{kg^{\circ}C}]$  [Ogata, 2003].

Entonces, cuando un cuerpo posee un valor de capacitancia térmica muy alto, este tenderá a ceder energía lentamente pues tiende a retenerla, mientras que uno que tiene un valor de capacitancia bajo la cede rápidamente. Dado que está involucrada la masa, se puede inferir que mientras más grandes sean las dimensiones del cuerpo éste podrá almacenar una mayor cantidad de energía y cederla según la magnitud de la capacitancia . Sin embargo, esto no determina completamente la constante de tiempo del sistema, ya que la velocidad del flujo calórico se regirá también en función de la resistencia térmica asociada al cuerpo que recibe energía.

Los conceptos anteriormente expuestos son los mínimos necesarios para una amplia comprensión de la metodología de modelado empleada por lo que, a partir de este punto, se explica el proceso de diseño y desarrollo de la plataforma experimental y, posteriormente, la metodología de obtención y validación del modelo propuesto.



## Capítulo 3

# Diseño y desarrollo de la plataforma experimental

Esta plataforma experimental fue diseñada con el objetivo de permitir a los estudiantes evaluar estrategias de control por medio de controladores industriales, de fácil mantenimiento, dinámicamente favorable para realizar prácticas en periodos cortos de tiempo y de bajo costo, permitiéndole ser una alternativa viable para la enseñanza de la teoría de control y la automatización.

La plataforma está compuesta por un sensor industrial de temperatura, de la marca IFM, modelo TD2231 con capacidad de comunicación mediante el protocolo I/O Link. Este sensor fue colocado en la parte superior de la cámara. Para representar la fuente de calor del proceso se instaló una lámpara de halógeno modelo G4, capaz de entregar una potencia máxima de 20 [W] ante una excitación a 12 [V] ya que, bajo estas condiciones, puede alcanzarse una temperatura aproximada de  $200[^\circ C]$ , que es suficiente para cumplir con los objetivos planteados para la plataforma experimental. Dicha lámpara se posicionó sobre un micrómetro de profundidad en el centro de la cámara, lo que permite modificar la distancia de separación entre la lámpara y el sensor y, en consecuencia, alterar la velocidad de la dinámica del sistema. En la Tabla 3.1 se presenta una lista detallada de los componentes utilizados que incluye los costos aproximados de su adquisición.

En la Tabla 3.2 se muestra el precio de venta aproximado de algunos procesos industriales y su comparación con las plataformas desarrolladas en este trabajo. Es posible observar que, aún cuando se utilizó un sensor relativamente caro, el precio final de la plataforma no se acerca al costo de adquirir un equipo industrial y, por otro lado, al utilizar una herramienta de *software* propietario, el costo prácticamente es igual a cero ya que al no requerir *hardware* adicional, solo debe ser instalado y está listo para utilizarse.

Elemento	Marca	Modelo	Descripción	Costo (MXN)
Sensor	IFM	TD2231	Comunicación I/O Link	\$3,100
Ventilador	Turbofan	4020	12Vin	\$60
Micrómetro	Mitutoyo	329	0 - 50mm	\$1,200
Lámpara	Phillips	G4	12V, 20W	\$20
Conector	Centronics	24 pin female	Puerto paralelo	\$350
Fuente	Heng Fu	HF40W-SML-15	15Vout, 2.7A	\$250
Estructura	N/A	N/A	MDF 3mm	\$200
Tarjeta electrónica	N/A	N/A	Acondicionamiento	\$500
<b>Total</b>				<b>\$5580</b>

**Tabla 3.1.** Tabla de componentes

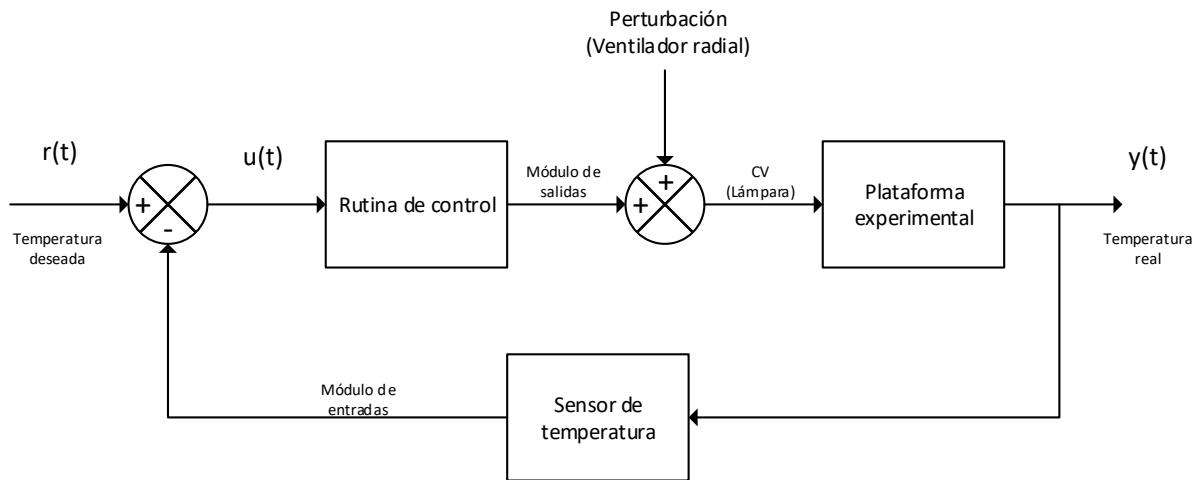
Sistema	Caldera	Horno de convección	Plataforma experimental	EmulSis
Marca	Power Master <sup>®</sup>	Europan <sup>®</sup>	N/A	N/A
Modelo	N/A	Tropic 100	N/A	N/A
Costo (MXN)	\$340,000	\$120,000	\$5,580	\$0

**Tabla 3.2.** Análisis de costos

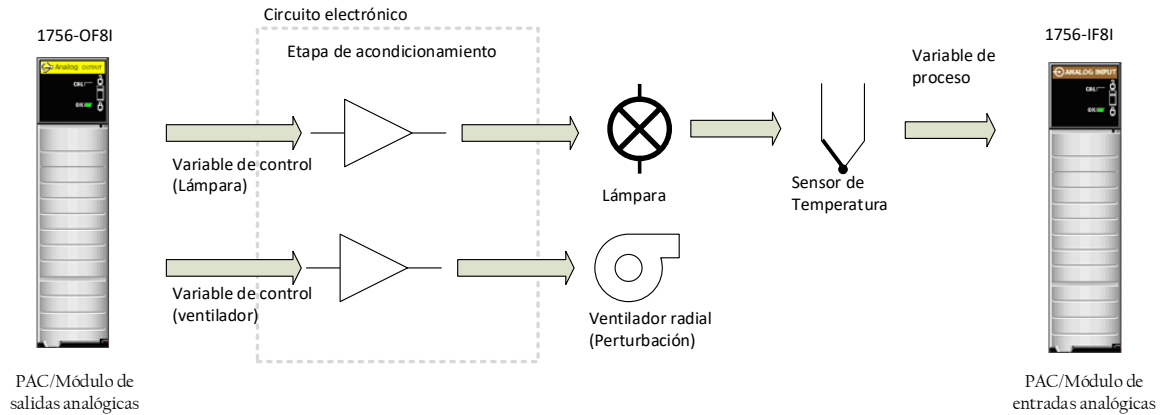
Para trabajar con este proceso, se requiere implementar una rutina de control mediante un entorno de programación, en este caso, se utilizó de software *Studio 5000 Logix Designer* de la marca Rockwell Automation<sup>®</sup>, entorno de desarrollo del PAC utilizado. Para una mayor simplicidad, en este caso fue utilizado lenguaje de programación en escalera (*LD*) bajo la norma *IEC 61131-1*.

Para trabajar con esta plataforma es necesario definir las señales de entradas y salidas por medio de una tabla de ordenamiento de variables, donde la entrada del sistema o *variable de proceso* (PV) corresponde a la lectura del sensor de temperatura TD2231 y las salidas o *variables de control* (CV) corresponden a las señales que accionan a la lámpara y al ventilador radial; el enlace entre el PAC y la plataforma experimental se realiza mediante el conector Centronics ubicado en el costado derecho de esta.

El proceso comienza mediante el ingreso de un valor de Setpoint que se utiliza como referencia por la ley de control, esta causa que la variable de control actúe siendo enviada por medio del módulo de salidas analógicas 1657-OF8I y ajuste la intensidad luminosa de la lámpara; el calor generado se registra por medio del sensor de temperatura y la lectura reingresa al PAC por medio del módulo de entradas analógicas 1657-IF8I, cerrando el lazo de control como se presenta en la Figura 3.1. Este proceso se realizó con una tasa de muestreo de 1[ms].



**Figura 3.1.** Lazo de control



**Figura 3.2.** Diagrama general del proceso

Por otro lado, para ingresar perturbaciones al sistema, se utiliza el ventilador radial ubicado en la cara posterior del dispositivo. Este, debido a sus dimensiones, únicamente es utilizado mediante control *ON/OFF* y no forma parte del lazo de control principal del sistema. Este proceso puede representarse gráficamente mediante el esquema que se muestra en la Figura 3.2.

### 3.1. Diseño estructural

La estructura del sistema se manufacturó en paneles de fibra de densidad media (MDF por las siglas en inglés de *medium density fiberboard*) con un espesor de 3[mm]; se seleccionó este material debido a su versatilidad, bajo costo y por ser un buen aislante térmico. Tras realizar diversas configuraciones de diseño, el sistema físico resultó como se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.

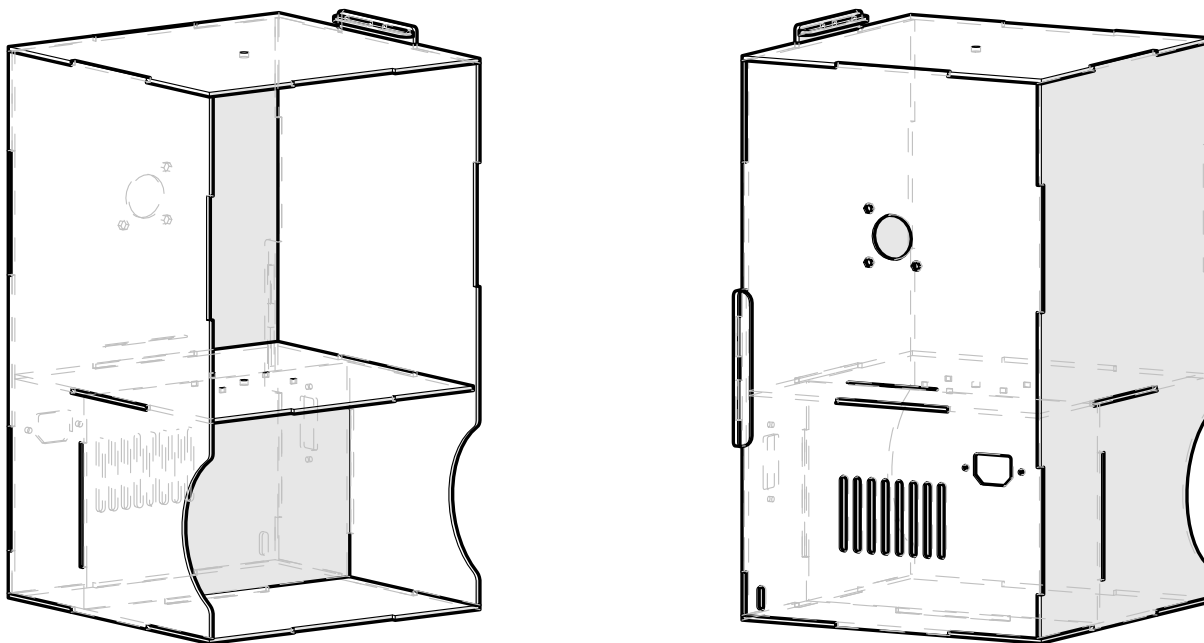
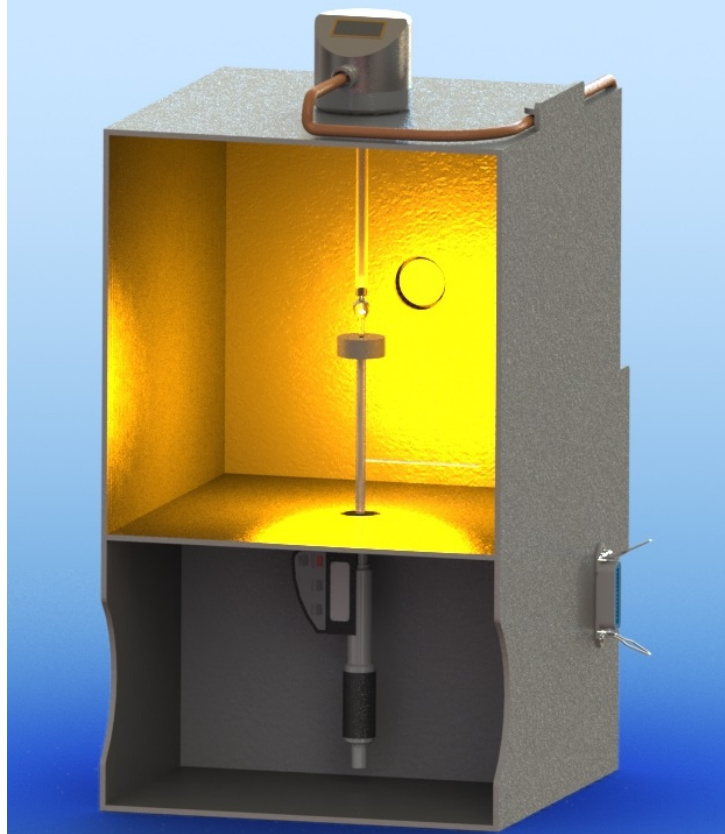


Figura 3.3. Ensamble

Se consideró una cámara de forma cúbica en la parte superior; esta cámara es la parte de la estructura destinada para el control y la adquisición de datos. La sección secundaria, ubicada debajo de la cámara principal, se dividió en dos subsecciones, una frontal y una trasera; la frontal fue diseñada para que el operador pueda tener un libre acceso al micrómetro de profundidad, mientras que la posterior, como se muestra en la Figura 3.5, se destinó para el resguardo del circuito electrónico que permite el funcionamiento de la plataforma. Esta disposición permite que, de ser necesario, se pueda realizar mantenimiento retirando la pared trasera, de modo que el circuito electrónico y la fuente queden expuestos. En esta misma pared se diseñó una rejilla que tiene como finalidad permitir la extracción de aire caliente que se produce al calentarse el circuito electrónico lo cual ayuda a mantenerlo en condiciones de operación óptimas.

Para permitir un almacenamiento ordenado y libre de cables, se consideraron un par de conectores. En el lateral derecho se instaló un conector de la marca Centronics que per-





**Figura 3.4.** Render de plataforma experimental



**Figura 3.5.** Vista superior del sistema



**Figura 3.6.** Vista posterior del sistema

mite la conexión del proceso con el controlador, el cual sirve como bus de datos y en la sección trasera se implementó un conector para cable de alimentación *IEC-C14*.

En la sección trasera, tal como se puede apreciar en la Figura 3.6, se consideraron una serie de espacios para colocar el ventilador radial que hace las veces de un extractor de aire; este elemento está posicionado justo al centro con la finalidad de una extracción de calor uniforme. Además se colocó una pequeña rendija de un milímetro de ancho para que el extractor no llegue a causar daños a la estructura debido al efecto de succión.

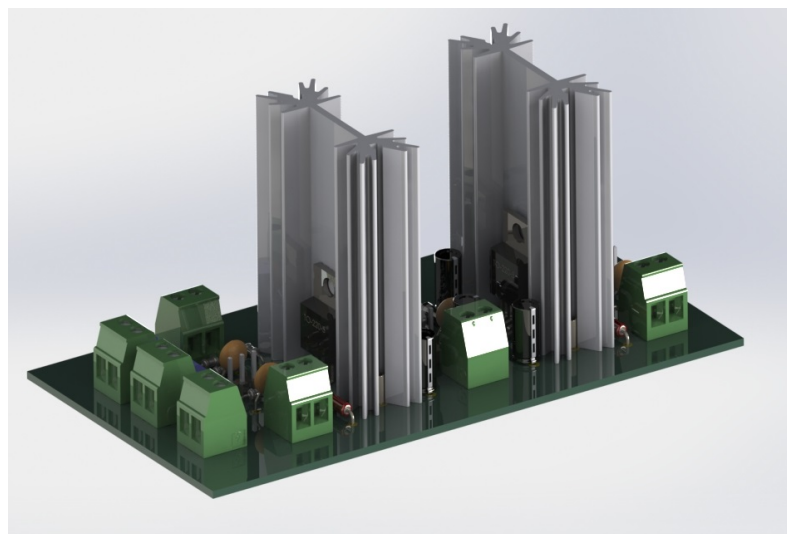
Debido a los cables requeridos para la conexión de los componentes externos, se diseñaron a medida una serie de huecos que permiten hacerlos llegar a la tarjeta electrónica; así como un par de canaletas ubicadas en las secciones superior y trasera, que permiten que el cable del sensor pueda mantenerse bien organizado y se minimice el riesgo de accidentes.

Cada una de las piezas que componen a la estructura del sistema se ha realizaron mediante el software de diseño *AutoCAD*<sup>®</sup> y se manufacturaron mediante corte láser; los planos que permiten una mayor referencia para su reproducción se presentan en los apéndices A.2, A.3 y A.4.

## 3.2. Diseño electrónico

Para realizar el diseño del circuito electrónico que permite el funcionamiento de la plataforma, se consideró una fuente de calor, un sensor que permita cerrar el lazo de control, un actuador secundario para inducir perturbaciones y que todos estos componentes puedan ser manipulados mediante un controlador industrial. En este orden de ideas, para la fuente de calor se utiliza un amplificador de potencia L165ST en configuración no inversora, el cual soporta una corriente máxima de 3[A]. Sus entradas se conectaron al módulo de salidas analógicas de alta velocidad 1756-OF8I del Controlador de Automatización Programable (PAC, por sus siglas en inglés), modelo *ControlLogix* de la marca Rockwell Automation<sup>®</sup>. Dicho módulo tuvo que ser configurado para que sus salidas se encuentren en el rango de 0 a 5 volts para garantizar el correcto funcionamiento del amplificador operacional. Así mismo, se consideró una resistencia de 250[Ω] entre la terminal no inversora y tierra, con lo que se asegura que se cumpla con el estándar de comunicación industrial 0 – 20 [mA]. Esta misma configuración fue implementada para permitir el funcionamiento del ventilador radial.

Con el objetivo de mantener ambos amplificadores operacionales bajo condiciones adecuadas de operación, se consideraron un par de disipadores de aluminio y un ventilador que fue colocado sobre ellos. Dicho ventilador cuenta con un arreglo de capacitores en sus terminales, cuya función es filtrar el ruido electromagnético inducido por sus bobinas. Todas estas consideraciones pueden observarse en el diagrama esquemático presentado en el Anexo B.2, diseñado mediante el software *Eagle*<sup>®</sup>. Para una mayor durabilidad, el circuito diseñado se implementó en una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), la cual se presenta en el Anexo B.1. Como parte del diseño de dicha tarjeta, se consideró una distribución de componentes de modo que ambos amplificadores se posicionaran en el centro y a una cierta distancia que permitiera que el ventilador auxiliar pueda situarse sobre el circuito, enfriando a ambos circuitos integrados al mismo tiempo. De igual manera, se buscó que todos los componentes que tuvieran una terminal conectada a tierra fueran colocados en la región más externa, de modo que el plano de masa pudiera tener las dimensiones apropiadas y se evitaran posibles cortos circuitos al momento de su fabricación. En la Figura 3.7 se presenta el diseño CAD de la tarjeta electrónica y en la Figura 3.8, el resultado tras la implementación.



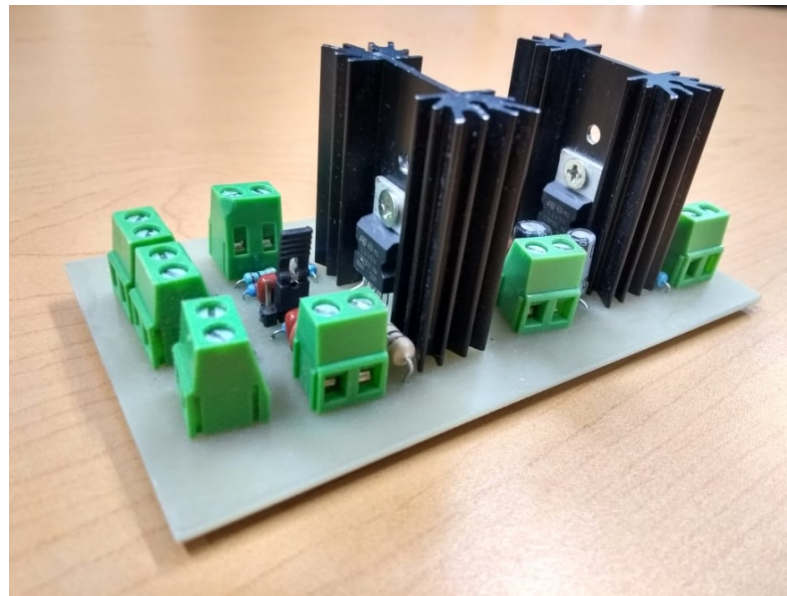
**Figura 3.7.** Diseño CAD del circuito electrónico

Para el suministro de energía al sistema, se consideró una fuente conmutada de 15 [V], con capacidad de entregar una corriente máxima de 2,7 [A]. Para una facilidad en su instalación, se implementó en el costado derecho un conector de la marca Centronics que actúa como bus de datos y permite la conexión del sistema al controlador. Este conector permite que se mantenga un entorno de trabajo ordenado y se disminuya la posibilidad de un mal funcionamiento debido a errores de conexión.

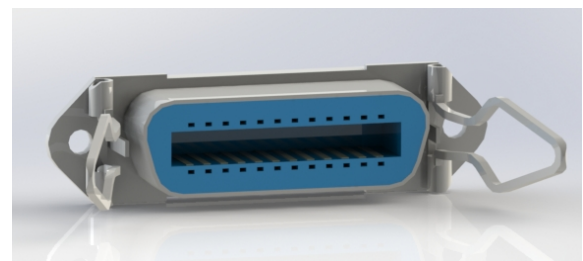
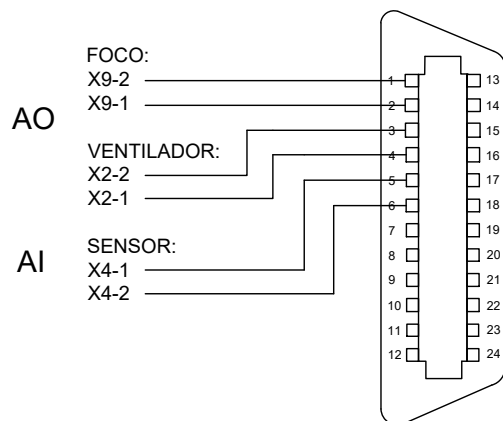
Ya que la finalidad de este dispositivo es que sea manipulado mediante un controlador industrial, se consideró que tanto las salidas como las entradas de ambos amplificadores operacionales correspondieran con los rangos de voltajes y corrientes con los que operan los módulos de entradas y salidas analógicas 1756-IF8I y 1756-OF8I, respectivamente, según las especificaciones descritas en la hoja de datos del fabricante [RockwellAutomation, 2016]; de modo que la comunicación entre el sistema y el PAC se realizara mediante el estándar industrial 4 – 20 [mA].

La conexión física realizada entre el proceso térmico y el controlador, se presenta en la Figura 3.9 y el Anexo B.3.

Tras la implementación y la realización de pruebas que permitieron verificar el correcto funcionamiento de la plataforma experimental, la etapa siguiente fue la obtención del modelo matemático tomando como base los conceptos explicados en el Capítulo 2 tal como se explica en la siguiente sección.



**Figura 3.8.** Circuito electrónico construido



**Figura 3.9.** Distribución de señales en conector Centronics

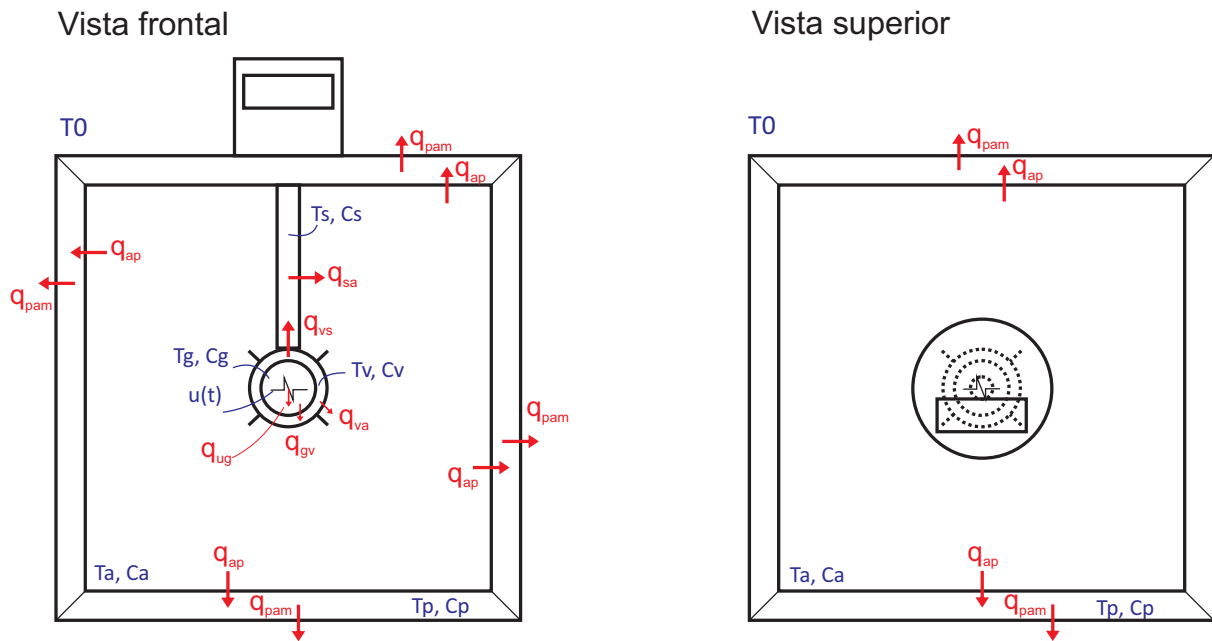
### 3.3. Modelo matemático

En términos generales, la metodología para obtener un modelo matemático consiste en considerar todos los flujos de calor involucrados en la dinámica del sistema y, tomando como base la ley de enfriamiento de Newton, deben ser representados por medio de una ecuación de transferencia de calor simple; dichos flujos representan a las leyes de elementos mientras que, empleando la primera ley de la termodinámica se plantean las ecuaciones correspondientes a las leyes de conjuntos. Una vez identificando los elementos y conjuntos propios del sistema, se deben realizar las sustituciones correspondientes, lo que resulta en la obtención de un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan la dinámica deseada. [Mastouri y Bouguila, 2017]

Para comenzar con el proceso anteriormente descrito, fue importante identificar cuales son las variables de estado, en este caso por simplicidad se consideró un sistema puramente térmico. De este modo, el modelo obtenido quedó en función únicamente de las temperaturas asociadas a cada uno de los cuerpos que lo componen, es decir, las temperaturas del gas xenón dentro de la lámpara, 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 que lo conforman. Para fines prácticos a tales temperaturas se les denominó:  $T_g$ ,  $T_v$ ,  $T_s$ ,  $T_a$  y  $T_p$  respectivamente, así pues, el vector de estados considerado es el siguiente:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p \\ T_a \\ T_s \\ T_v \\ T_g \end{bmatrix}$$

Para identificar de una manera más sencilla todos los flujos involucrados en el proceso, se planteó el diagrama que se presenta en la Figura 3.10. Se considera únicamente la sección superior del sistema ya que es ahí donde se encuentran tanto la fuente de calor como el sensor y los efectos producidos por el calentamiento del circuito electrónico fueron despreciados. Para una mayor simplicidad, se hace referencia a cada cuerpo por medio de su inicial, siendo  $g$  para el gas xenon,  $v$  para el vidrio que envuelve al foco,  $s$  para el sensor,  $a$  para el aire contenido dentro de la cámara y  $p$  para las paredes.



**Figura 3.10.** Diagrama de flujos calóricos

Se representan de color azul, las temperaturas y capacitancias térmicas asociadas a cada cuerpo y de color rojo los flujos de calor considerados, cuya notación está dada de la forma  $q_{AB}$ , donde  $A$  es el cuerpo que cede calor y  $B$  aquel que lo recibe, así mismo  $T_0$  representa a la temperatura ambiente y  $u(t)$  a la entrada de energía del sistema. Es importante señalar que para la obtención de un modelo matemático más preciso es necesario considerar la mayor cantidad de flujos calóricos posibles por lo que, del lado derecho del diagrama, se proporciona una vista superior que facilita visualizar que  $q_{ap}$  y  $q_{pam}$  se repiten también para las paredes frontal y trasera.

La transferencia de calor descrita mediante la ley de enfriamiento de Newton únicamente hace referencia a los mecanismos de conducción y convección, ya que la radiación fue descubierta hasta muchos años después del fallecimiento de Isaac Newton por lo que, el utilizar la ecuación (2.1) aunque es una buena aproximación, debe considerarse que se está despreciando esta dinámica. Para no omitirla definitivamente, se consideró este fenómeno como un componente del flujo  $q_{vs}$ , debido a que la diferencia de temperaturas es considerable, considerando lo anterior, las leyes de elementos resultan:

$$\begin{aligned}
 q_{ug} &= \frac{u(t) - T_g}{R_g} \\
 q_{gv} &= \frac{T_g - T_v}{R_v} \\
 q_{va} &= \frac{T_v - T_a}{R_{ca}} \\
 q_{vs} &= \frac{T_v - T_s}{R_s} + (E_v \sigma A_v) (T_v^4 - T_s^4) \\
 q_{sa} &= \frac{T_s - T_a}{R_a} \\
 q_{ap} &= 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p} \right) \\
 q_{pam} &= 6 \left( \frac{T_p - T_0}{R_{ca}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Para plantear las leyes de conjuntos, se tomó en cuenta la primera ley de la termodinámica (ecuación (2.2)), resultando:

$$\begin{aligned}
 C_p \dot{T}_a &= q_{ap} - q_{pam} \\
 C_a \dot{T}_a &= q_{va} + q_{sa} - q_{ap} \\
 C_s \dot{T}_s &= q_{vs} - q_{sa} \\
 C_v \dot{T}_v &= q_{gv} - q_{vs} - q_{va} \\
 C_g \dot{T}_g &= q_{ug} - q_{gv}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Tras realizar la sustitución de (3.1) en (3.2), se obtiene el conjunto de ecuaciones diferenciales que corresponden al modelo matemático del sistema físico propuesto.

$$\begin{aligned}
 \dot{T}_p &= 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_p} \right) - 6 \left( \frac{T_p - T_0}{R_a C_p} \right) \\
 \dot{T}_a &= \frac{T_v - T_a}{R_a C_a} + \frac{T_s - T_a}{R_a C_a} - 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_a} \right) \\
 \dot{T}_s &= \frac{T_v - T_s}{R_s C_s} - \frac{T_s - T_a}{R_a C_s} \\
 \dot{T}_v &= \frac{T_g - T_v}{R_v C_v} - \frac{T_v - T_s}{R_s C_v} - \frac{T_v - T_a}{R_a C_v} - (E_v \sigma A_v) \left( \frac{T_v^4 - T_s^4}{C_v} \right) \\
 \dot{T}_g &= \frac{T_0 + u(t) - T_g}{R_g C_g} - \frac{T_g - T_v}{R_v C_g}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Sin embargo, para concluir con el proceso de modelado, es necesario recordar que la fuente de calor fue colocada sobre un micrómetro de profundidad, el cual permite la variación de la distancia entre la fuente y el sensor. Esta modificación causa retrasos en la dinámica



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 3.3.** Parámetros del sistema

del sistema y para que pueda ser representado, fue utilizado un factor de desplazamiento  $D$ ; calculado mediante la expresión

$$D = ((-0,0022d^3) + (0,0413d^2) - (0,2375d) + 1)$$

$$D = -0,0022d^3 + 0,0413d^2 - 0,2375d + 1$$

donde  $d$  es el valor en [mm] de la distancia de separación. La obtención de este polinomio y sus coeficientes se explica a detalle en la Sección 4.3 del Capítulo 4.

Por lo tanto, el modelo matemático completo es el que se muestra en la ecuación (3.4).

$$\begin{aligned} \dot{T}_p &= 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_p} \right) - 6 \left( \frac{T_p - T_0}{R_a C_p} \right) \\ \dot{T}_a &= \frac{T_v - T_a}{R_a C_a} + \frac{T_s - T_a}{R_a C_a} - 6 \left( \frac{T_a - T_p}{R_p C_a} \right) \\ \dot{T}_s &= D \left[ \frac{T_v - T_s}{R_s C_s} \right] - \frac{T_s - T_a}{R_a C_s} \\ \dot{T}_v &= \frac{T_g - T_v}{R_v C_v} - \frac{T_v - T_s}{R_s C_v} - \frac{T_v - T_a}{R_a C_v} - (E_v \sigma A_v) \left( \frac{T_v^4 - T_s^4}{C_v} \right) \\ \dot{T}_g &= \frac{T_0 + u(t) - T_g}{R_g C_g} - \frac{T_g - T_v}{R_v C_g} \end{aligned} \quad (3.4)$$

En la Tabla 3.3, se presentan los valores de los parámetros propios del sistema físico diseñado; estos parámetros dependen de la composición química respectiva a cada uno de ellos y de las dimensiones de los cuerpos utilizados. Estos parámetros fueron sustituidos en el conjunto de ecuaciones diferenciales 3.4 con la finalidad de obtener una respuesta numérica ante la entrada  $u(t)$  para cada uno de los estados.

### 3.4. Emulador de procesos industriales

Tras la obtención del modelo matemático, se implementó dicho conjunto de ecuaciones diferenciales en *EmulSis*, software generado mediante el proyecto de tesis *Emulador de sistemas dinámicos para la práctica y enseñanza de control automático industrial*. Para esta implementación se utilizó el entorno de desarrollo *Delphi / RAD Studio* el cual se basa en el lenguaje de programación *Object Pascal* [Mendoza, 2018].

*EmulSis* es una herramienta software, pensada para ser un compendio de procesos que puedan ser controlados mediante un PAC de cualquier modelo y marca, gracias a su capacidad de comunicación por medio del estándar OPC. Este emulador es capaz de generar gráficas en tiempo real de las variables de control y de proceso; tiene como objetivo ser una herramienta intuitiva y fácil de utilizar, con la finalidad de probar estrategias de control a procesos físicos de distintas naturalezas. Por lo tanto, lo que se buscó con este trabajo fue contribuir en ampliar el banco de sistemas de esta herramienta incluyendo al proceso térmico. En la Figura 3.11, se presenta la interfaz gráfica de este emulador.

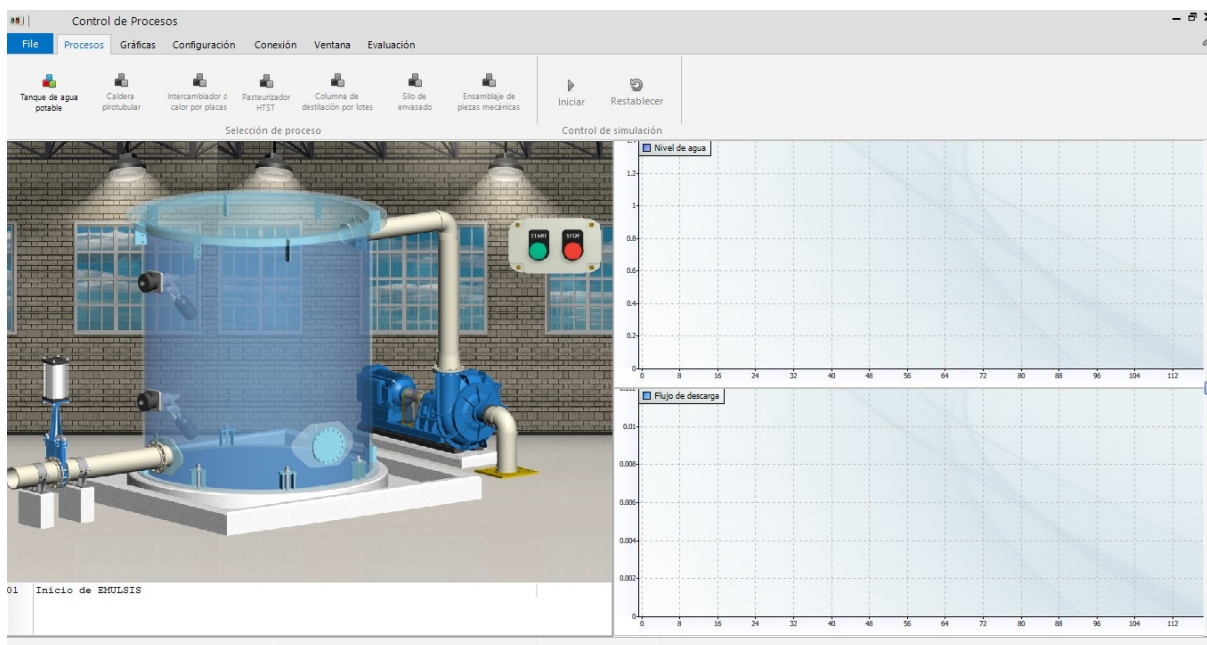
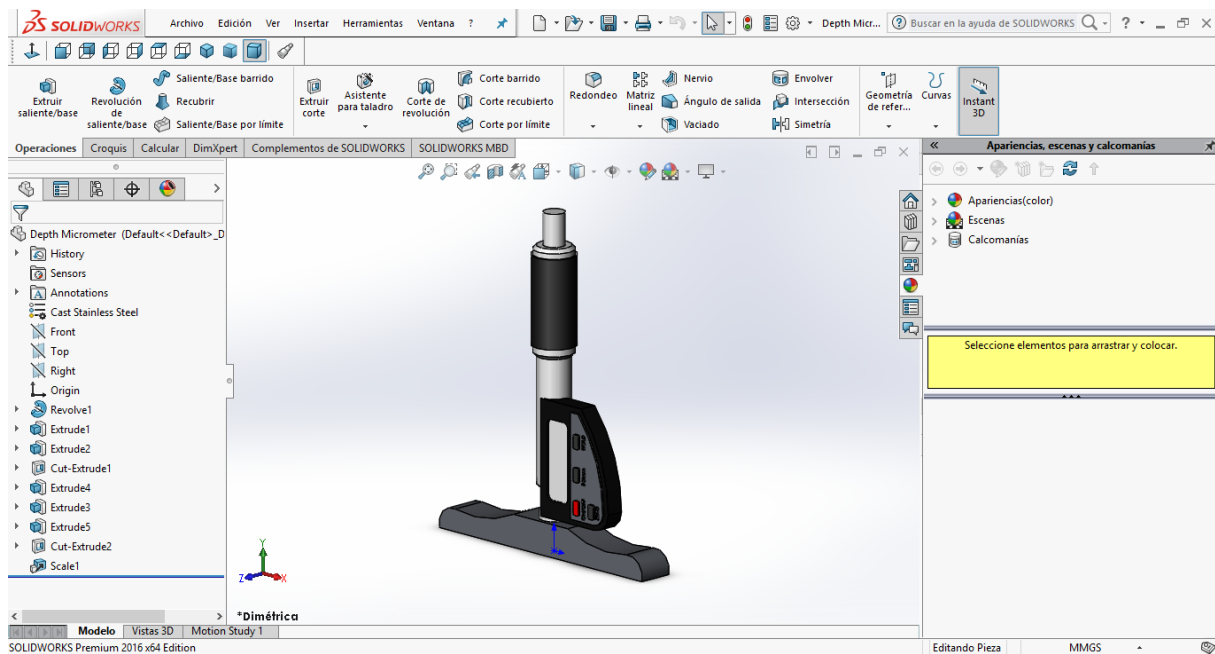


Figura 3.11. Interfaz de Emulsis

### 3.4.1. Implementación del sistema térmico

Para mejorar la presentación del emulador y que este se asemejara visualmente a la plataforma experimental, se realizó una animación utilizando el software de diseño *SolidWorks*<sup>®</sup> en el cual se diseñaron y ensamblaron cada uno de los elementos que se utilizaron durante la construcción de la plataforma, permitiendo asegurar una máxima similitud con el proceso previamente construido. En la Figura 3.12 se muestra, a manera de ejemplo, el proceso de diseño de uno de los componentes y, en la Figura 3.13, el ensamble final.



**Figura 3.12.** Diseño de partes en SolidWorks<sup>®</sup>

Para asegurar la máxima similitud con la plataforma, se consideraron las dimensiones exactas de cada componente y, para simplificar este proceso, se tomaron en cuenta los planos con los que se diseñó la estructura, incluidos en los anexos A.2, A.3 y A.4.

Para un efecto visual atractivo, se realizó la animación del efecto de encendido de la lámpara, para esto se agregó la propiedad de irradiancia a su modelo en SolidWorks<sup>®</sup>, haciéndolo variar partiendo de un valor inicial de 0, hasta una irradiancia máxima de  $1,5 \left[ \frac{W}{sr \cdot m^2} \right]$ .

Utilizando el método clásico de animación, se generaron una serie de fotogramas individuales que al ser mostrados uno tras otro permitieron el efecto de encendido de la lámpara. Finalmente, para un mejor acabado, se utilizó el complemento de renderizado *PhotoView*

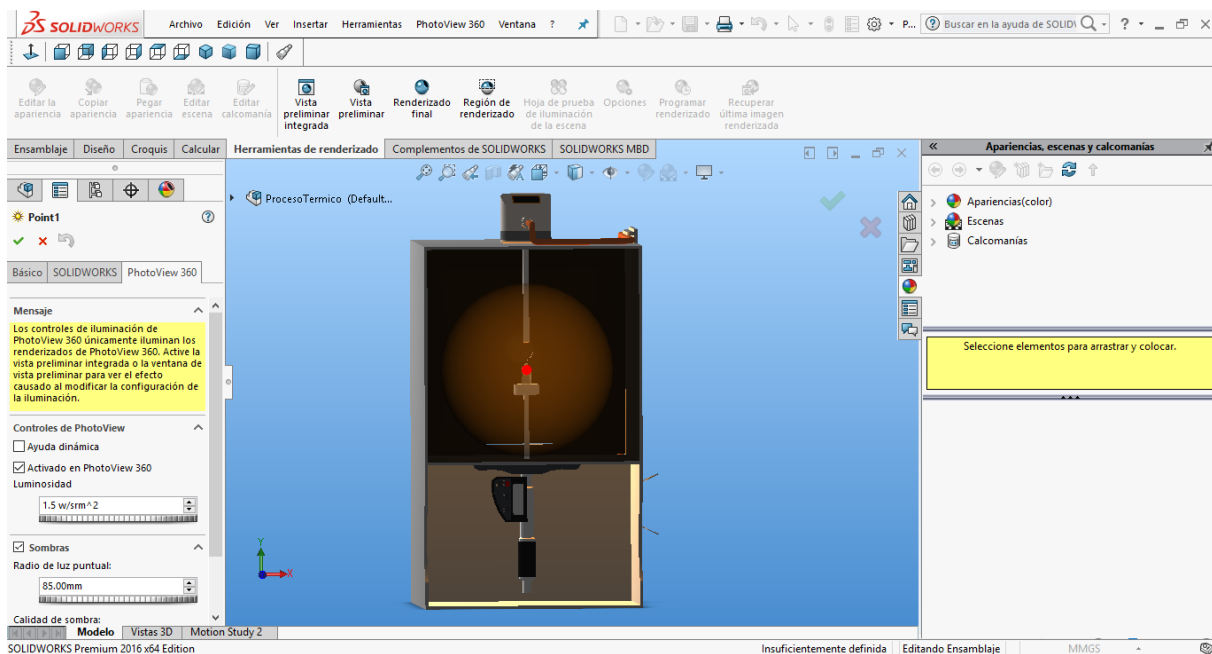


Figura 3.13. Ensamble en SolidWorks®

360 cuya aplicación se ejemplifica en la Figura 3.15.

Una vez generados todos los fotogramas se realizó la recopilación mediante *Camtasia Studio*; esto permitió que se unificara un sólo archivo de extensión SWF que pudo ser utilizado mediante el complemento *TShockWaveFlash* de RAD Studio.

Tras la generación de dicha animación, se realizaron las modificaciones necesarias al código fuente de EmulSis para que el proceso térmico pudiera ser implementado. Entre los cambios más significativos, se destaca la habilitación un botón que permite cambiar entre un proceso y otro y la implementación de algunas funciones adicionales como es un selector de distancia, en el cual puede indicarse la distancia entre la fuente de calor y el sensor de temperatura, así como un control que permite habilitar el ventilador radial con el objetivo de perturbar al sistema. El resultado final de la implementación de este nuevo módulo puede observarse en la Figura 3.16.

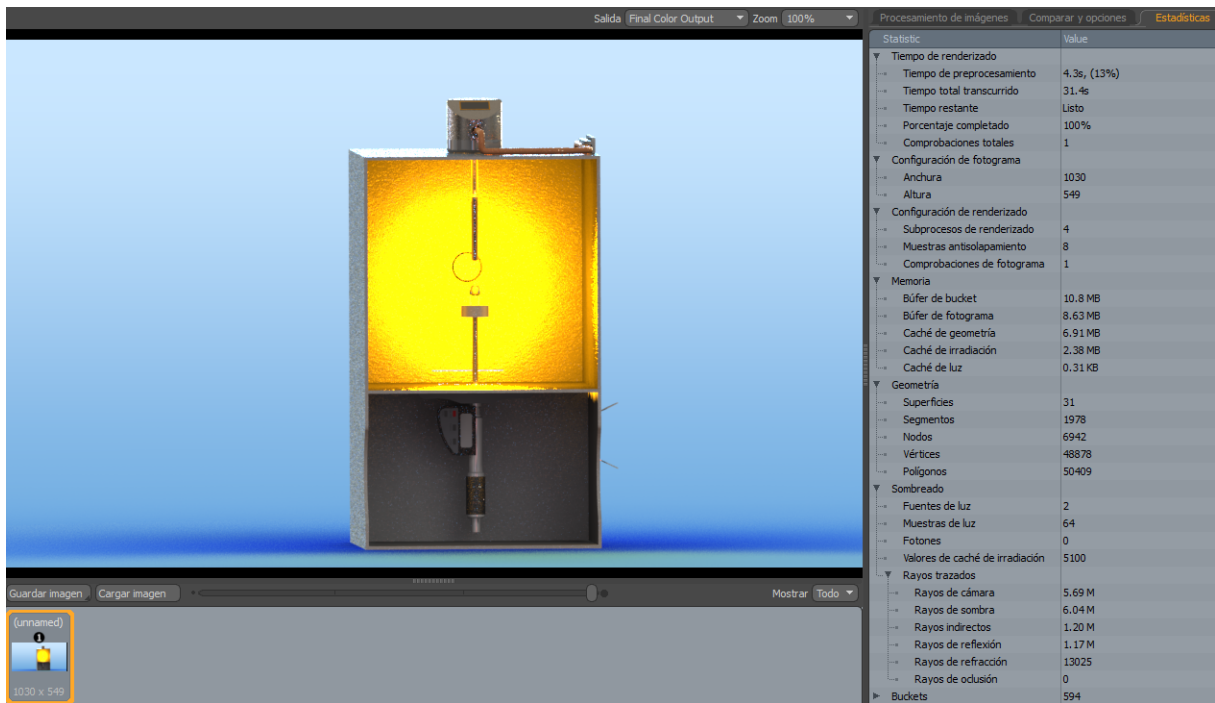


Figura 3.14. Proceso de renderizado

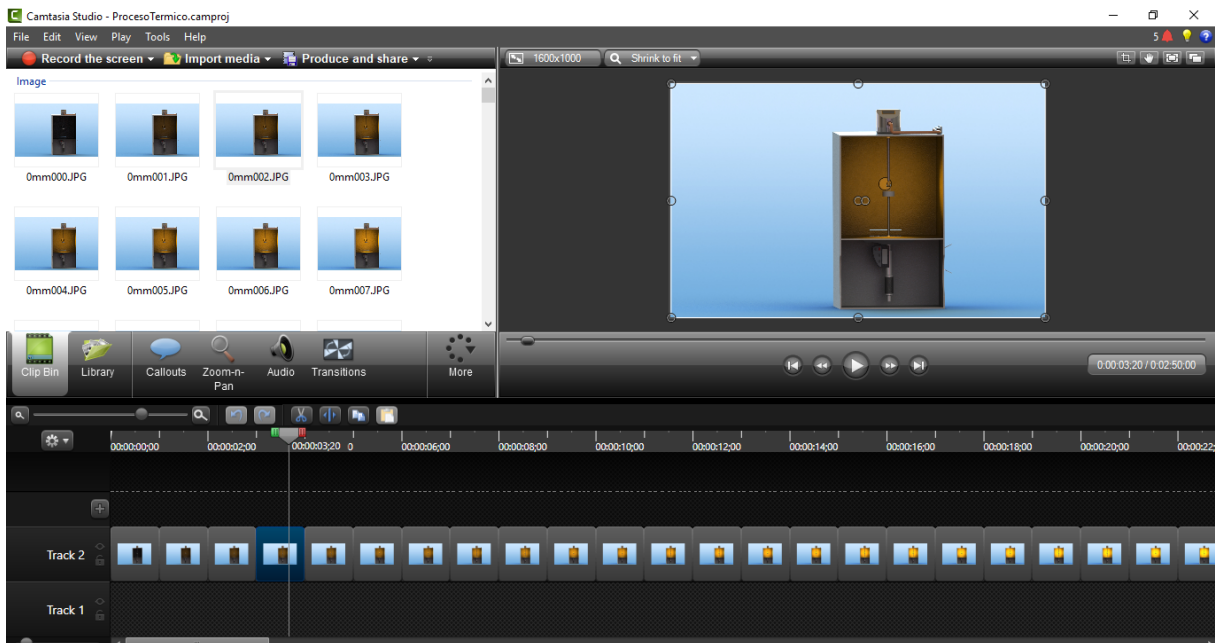


Figura 3.15. Generación de animación

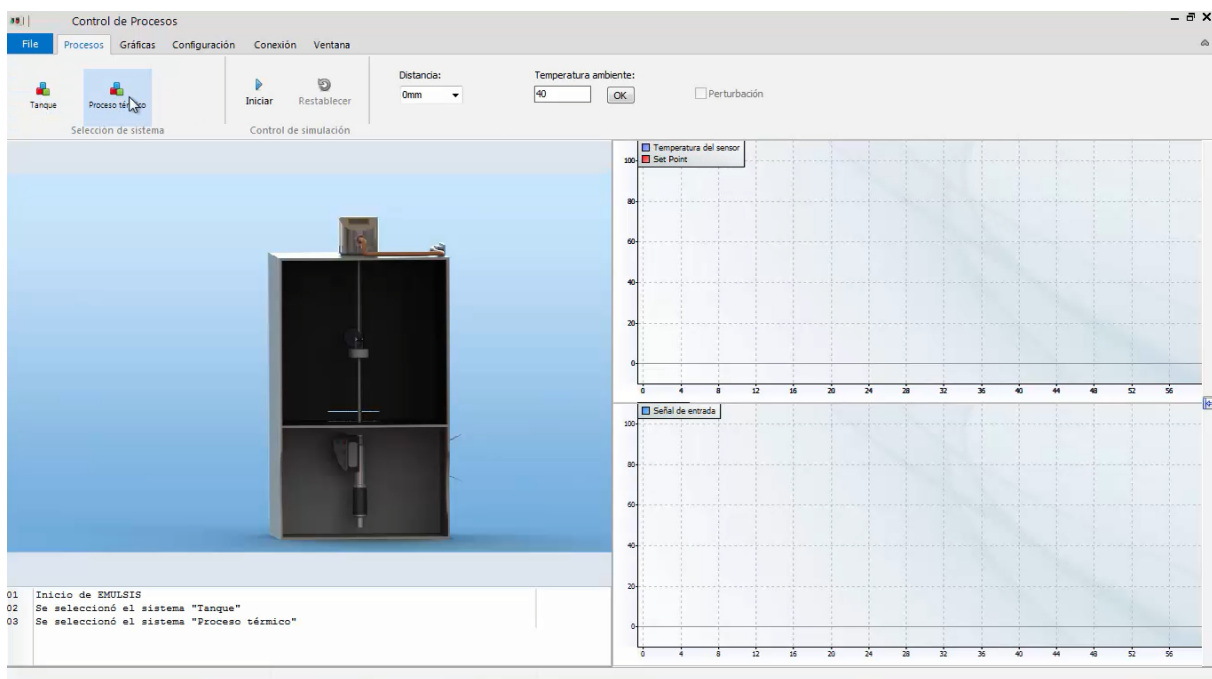


Figura 3.16. Proceso térmico implementado en EmulSis

# Capítulo 4

## Evaluación y validación

Para realizar la validación del modelo matemático mostrado en la ecuación (3.4), se realizaron una serie de pruebas que permitieran verificar que su respuesta era similar a la que se obtiene con el proceso construido. Estas pruebas consistieron en excitar a ambos sistemas mediante la misma señal de prueba  $u(t)$  considerando las mismas condiciones de operación en cada caso. Cada prueba tuvo una duración de 15 minutos ya que, aunque los procesos térmicos se caracterizan por tener una dinámica lenta, fue tiempo suficiente para observar los efectos producidos por la señal de entrada.

### 4.1. Escenario de evaluación: Entrada escalón

Para la primera prueba se consideró un escenario simple, manteniendo al sensor y al actuador en pleno contacto y se ingresó al sistema una señal escalón de amplitud máxima y 4 minutos de duración. Con esto, se esperaba observar la evolución de la dinámica del sistema y las diferencias en el comportamiento de cada una de sus variables de estado.

Dado que, por cuestiones de diseño, sólo puede ser medida una de las cinco variables de estado consideradas; para obtener una respuesta que describiera mejor al sistema, se dispusieron dos termopares tipo T adicionales que ayudaron a medir las temperaturas del aire contenido dentro de la cámara superior y del vidrio que envuelve a la lámpara. Se consideró esto para verificar que coincidieran también las otras dos variables medidas con lo obtenido mediante el cálculo del modelo matemático. Este proceso se realizó tomando la lectura de cada sensor cada 10 segundos durante los 15 minutos de duración de la prueba. Para generar la señal  $u(t)$  se implementó el programa en lenguaje *Ladder* por medio del software *Studio 5000 Logix Designer* el cual, además, permitió capturar los datos obtenidos mediante el sensor principal. El programa implementado para generar la señal de prueba, se anexa en C.1.

Tras la finalización de la prueba, los datos obtenidos fueron recopilados y graficados por medio de *Matlab*<sup>®</sup>, obteniendo el resultado que se presenta en la Figura 4.1, esto permite conocer el tipo de respuesta esperada para los futuros escenarios de evaluación.

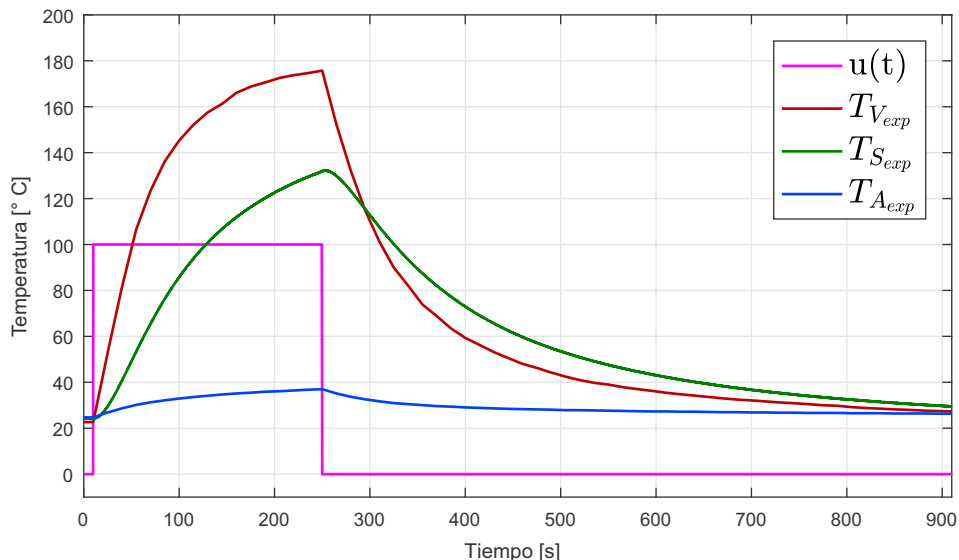


Figura 4.1. Datos de temperaturas medidas

Para una mayor facilidad de adquisición de datos del modelo, se implementó el programa de *Matlab/Simulink* que se muestra en la Figura 4.2. Por medio de este diagrama de bloques se ingresó la misma señal de entrada al modelo matemático, obteniendo las curvas que pueden apreciarse en la Figura 4.3, donde las líneas continuas corresponden a la respuesta del modelo matemático y las discontinuas a la lectura obtenida de los sensores.

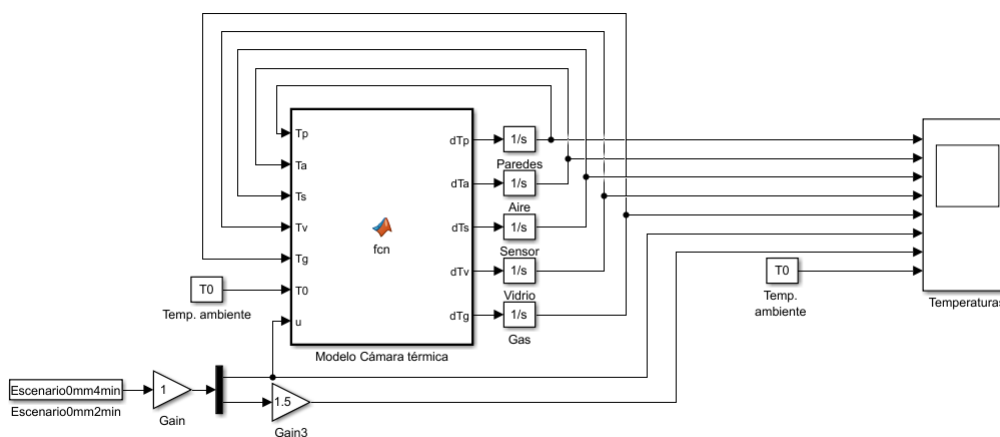
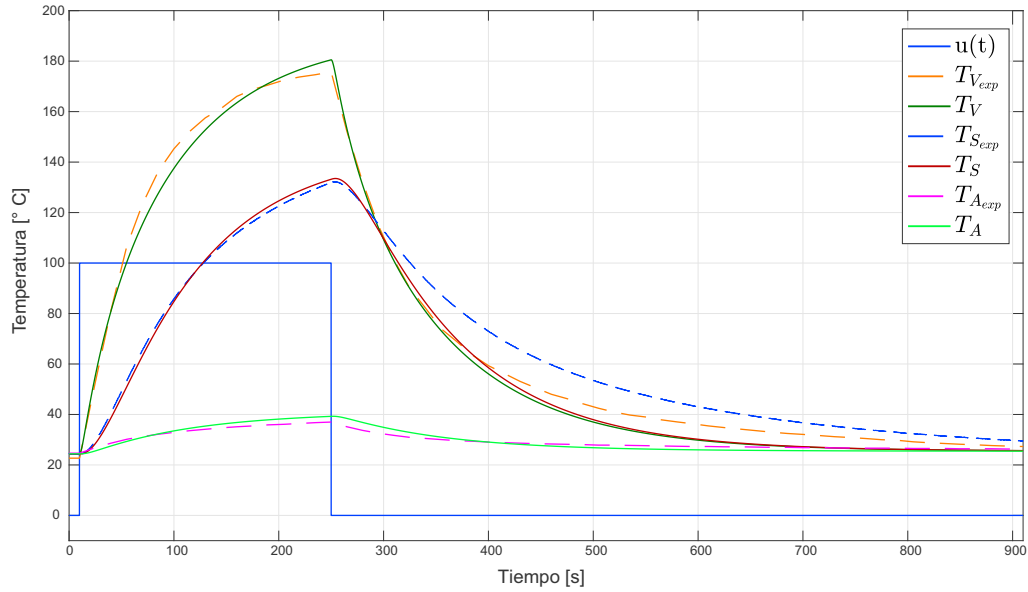


Figura 4.2. Programa de pruebas en Matlab/Simulink





**Figura 4.3.** Respuesta del modelo matemático

Como se observa, las respuestas son muy similares; esto es importante pues permite afirmar que el modelo propuesto describe, en términos generales, al fenómeno físico que ocurre en la plataforma experimental.

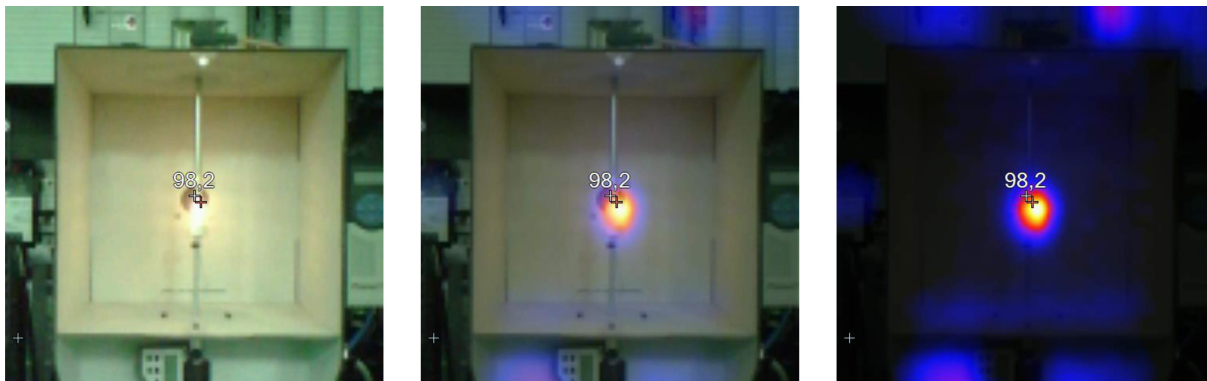
Para obtener una mejor descripción de esto, se realizó una captura termográfica del sistema por medio de una cámara modelo VT04A de la marca Fluke<sup>®</sup> (Figura 4.4). Esto permitió generar las capturas que se presentan en la Figura 4.5 donde, en primera instancia, se observa una fotografía de la plataforma durante su operación y, en las imágenes subsecuentes, la misma imagen con un aumento gradual en el efecto capturado por la visión infrarroja. Este experimento mostró que, aunque en la lámpara hay una lectura de  $98,2[^\circ\text{C}]$ , en las paredes no existe un aumento significativo de la temperatura y claramente puede observarse un gradiente, cuya magnitud disminuye de manera no lineal a medida que se aleja de la fuente.



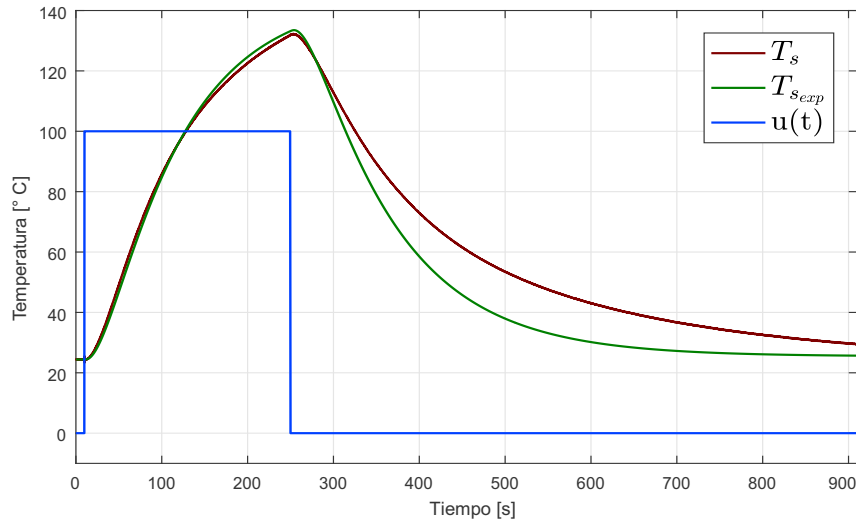
**Figura 4.4.** Análisis termográfico

De esta primera prueba se puede concluir que, aunque ambos sistemas presentan algunas variaciones, la dinámica es descrita de manera general. Para una mejor observación de los datos adquiridos, se presenta en la Figura 4.6 la medición aislada del sensor y su respectiva comparación con la variable de estado del modelo matemático. A partir de este punto, las pruebas se realizaron únicamente tomando como consideración esta medición pues al aplicar control, la variable de proceso que será de interés es la que se obtenga exclusivamente de la lectura del sensor industrial.

Este primer escenario de evaluación permitió concluir que para obtener una representación más descriptiva del sistema es necesario implementar sensores para medir más estados,



**Figura 4.5.** Captura termográfica del proceso



**Figura 4.6.** Prueba 1: Comparación de respuesta del sensor ante entrada escalón

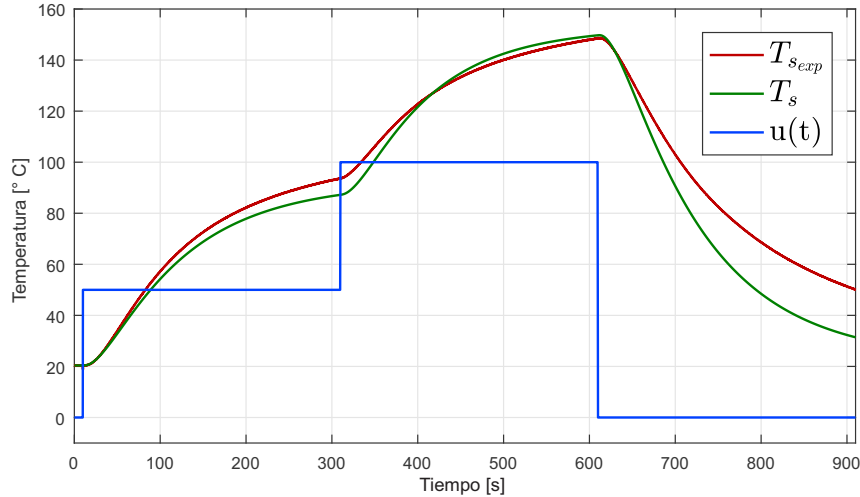
pues esta carencia genera un alto grado de incertidumbre al tener un modelo matemático de quinto orden y sólo poder realizar mediciones para una sola de las variables de estado.

## 4.2. Escenario de evaluación: Sensor a pleno contacto y entrada variante en el tiempo

Para el segundo experimento se utilizó una señal compuesta por tres escalones de diferentes amplitudes y se continuó con la condición de mantener al sensor y a la lámpara en pleno contacto. Esto se realizó con el objetivo de observar el comportamiento tanto del sistema como del modelo matemático ante un escenario ligeramente más complejo que una entrada escalón sencilla, esperando observar que sigan el mismo comportamiento y las gráficas resultantes, aunque no sean idénticas, logren asemejarse una a la otra.

Para poder generar la señal de entrada se utilizó *Studio 5000 Logix Designer* y se realizó un programa que, por medio de una serie de temporizadores, generaron la señal deseada, obteniéndose la gráfica de respuestas mostrada en la Figura 4.7. El programa utilizado se anexa en el apéndice C.2.

Esta gráfica permitió corroborar la hipótesis planteada ya que, efectivamente, ambos comportamientos continúan siendo muy similares, aunque con una cierta desviación durante la sección de descarga de energía, misma que se observó en el primer escenario de evaluación. Sin embargo, hasta este punto, el modelo aún logra describir de manera general la dinámica observada en el proceso térmico real.



**Figura 4.7.** Prueba 2: Comparación de respuesta del sensor ante entrada de escalones variables

### 4.3. Escenario de evaluación: Incremento en la distancia entre el sensor y el actuador

Como se mencionó en el Capítulo 3, este escenario de evaluación se planteó con la finalidad de complementar la descripción que ofrece el modelo matemático propuesto. El objetivo particular de esta prueba, fue encontrar el valor de un factor capaz de representar el cambio de distancia que ofrece el micrómetro de profundidad sobre el cual se posicionó la fuente de calor.

Para cumplir con el objetivo planteado, se realizaron una serie de ensayos, tomando como base lo realizado en el primer escenario de evaluación, y modificando la distancia de separación entre la lámpara y el sensor. Cada uno de estos ensayos arrojó una gráfica de respuesta y, para poder hallar la relación de este factor con la variación en la cantidad de calor recibida por el sensor, dicho factor se fue modificando manualmente y registrando su valor. Posteriormente, con la ayuda de *Microsoft Excel*<sup>®</sup>, se realizó una interpolación polinomial de dichos valores, obteniendo la ecuación 4.1

$$D = -0,0022d^3 + 0,0413d^2 - 0,2375d + 1 \quad (4.1)$$

que corresponde a una aproximación del comportamiento que se obtiene al variar la distancia de separación entre el sensor y la fuente de calor.

Las gráficas presentadas en las figuras (4.8), (4.9) y (4.10) permiten verificar que, por medio del polinomio obtenido, es posible calcular un factor que muestra el efecto obtenido por la variación de la distancia, permitiendo que el modelo matemático sea más representativo.

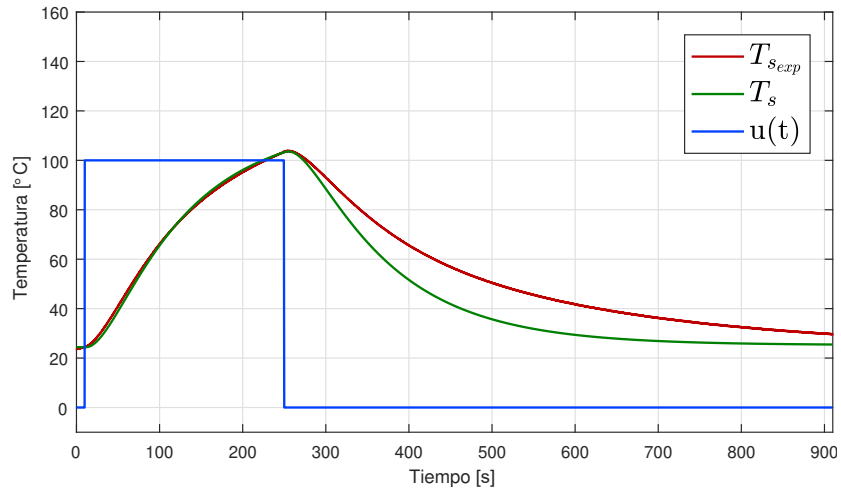


Figura 4.8. Prueba 3: Ensayo 1 - 3mm

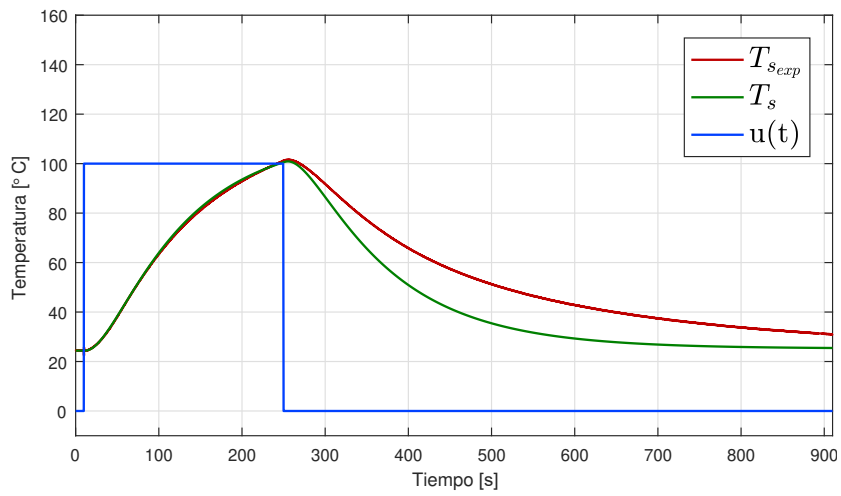


Figura 4.9. Prueba 3: Ensayo 2 - 5mm

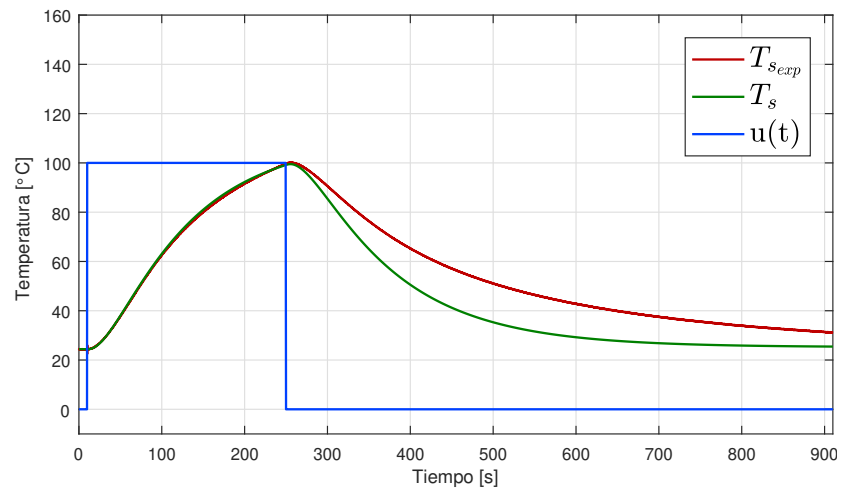


Figura 4.10. Prueba 3: Ensayo 3 - 10mm

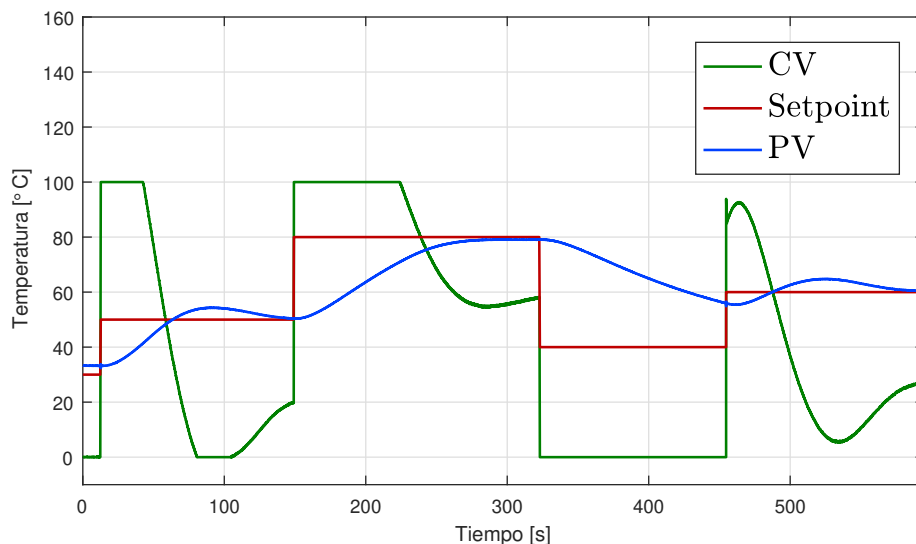


Figura 4.11. Implementación de ley de control en plataforma experimental

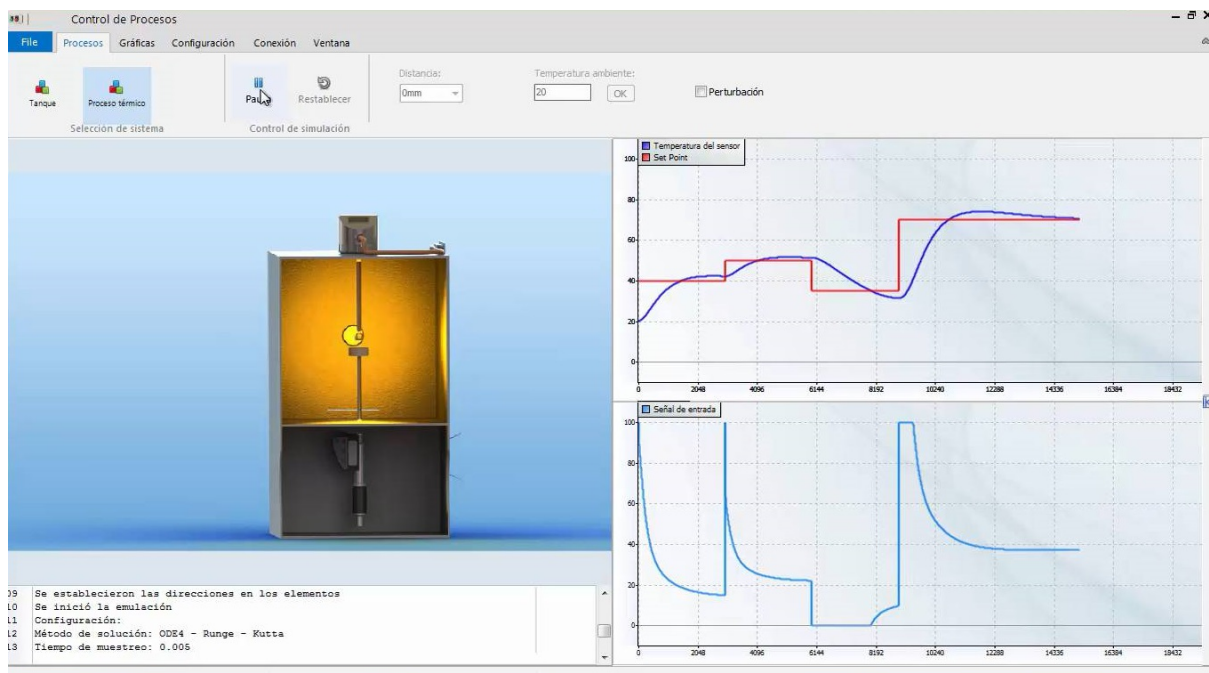
## 4.4. Evaluación de la plataforma en lazo cerrado

Como último escenario de evaluación, se implementó una estrategia de control para verificar el comportamiento tanto de la plataforma de experimental, como de EmulSis. El objetivo de esta prueba es verificar que ambos desarrollos pueden ser utilizados para la enseñanza de la ingeniería de control y automatización. Para fines demostrativos, la ley de control utilizada fue un control PID, con ganancias ajustadas de manera experimental, observando su desempeño y realizando una sintonía manual de sus parámetros  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$ .

En las figuras 4.11 y 4.12 se observa que ambos sistemas fueron controlados exitosamente, cumpliendo con el objetivo de la prueba. Sin embargo, debe mencionarse que, el modelo matemático fue subutilizado pues el control PID se caracteriza por no requerirlo sin embargo, era necesario disponer de él pues es quien rige el comportamiento de la variable de proceso.

## 4.5. Discusión

Tal como se expuso en la motivación, es necesario disponer de una amplia variedad de sistemas para consolidar las habilidades técnicas que un ingeniero de control necesita. El desarrollo de este proyecto no sólo llevó a la validación del modelo matemático propuesto, sino que sirvió como demostración de los alcances que puede llegar a tener una plataforma de estas características, el cual no está limitado a la enseñanza de la ingeniería de control, como se consideró en un inicio sino que, debido a sus propiedades, puede englobar una



**Figura 4.12.** Implementación de ley de control en Emulador de procesos

amplia variedad de áreas del conocimiento como lo son: análisis de sistemas y señales, modelado de sistemas físicos, termodinámica y transferencia de calor, teoría de control, protocolos industriales, análisis de materiales, programación entre otros; por lo que sin ningún problema podría ser utilizada para la enseñanza de ciertos conceptos en diferentes ingenierías como lo son la mecánica, mecatrónica, industrial, o en computación por mencionar algunas.

En los experimentos propuestos se utilizaron señales sencillas pues su simplicidad permite conocer e interpretar el comportamiento dinámico del sistema; tras la evaluación de la plataforma experimental y el emulador de procesos, se llegó a la conclusión de que el modelo matemático propuesto efectivamente es capaz de describir el fenómeno de transferencia de calor involucrado, aunque se requiere utilizar otra metodología o algunas otras estimaciones para obtener una respuesta más aproximada a la real. Finalmente, este desarrollo muestra que no es necesaria la adquisición de equipos grandes y costosos, siempre y cuando la alternativa propuesta sea suficientemente descriptiva para el principio que se busca representar, permitiendo una transición transparente entre el uso de un sistema a escala y uno real.





# Capítulo 5

## Conclusiones

Como resultado de la evaluación experimental se concluye que se cumplió con el objetivo primordial de diseñar, construir e implementar una plataforma experimental que sea capaz de 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 puede ser utilizado para demostrar fenómenos y principios físicos en otras áreas como análisis de materiales, diseño mecánico, instrumentación electrónica, entre muchas otras. 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 plantearon tuvieron como objetivo conocer la dinámica y evolución de los estados del sistema y cumplieron efectivamente con su propósito ya que al utilizar diversas señales de prueba, las gráficas obtenidas ofrecen una descripción general del fenómeno, validando el modelo matemático propuesto.

La comparación entre la respuesta obtenida del emulador frente a las mediciones obtenidas de la plataforma experimental permiten concluir que, aunque el modelo matemático está fundamentado en las leyes de la física, y se siguió una metodología válida; existe un cierto grado de error. Esto se debe a diversas consideraciones durante el proceso de modelado, por lo que también se concluye que un modelo más aproximado requiere de la mayor cantidad de consideraciones físicas posibles pues, aunque sus dinámicas en muchos casos al observarse de manera aislada parecen despreciables, al trabajar en conjunto representan una diferencia considerable con respecto a lo que ocurre físicamente. Esto sugiere que como trabajo a futuro podría desarrollarse un modelo que tome como base metodologías y estrategias más avanzadas, como lo es la estimación dinámica de parámetros y así obtener un modelo con una dinámica más aproximada a la obtenida en este trabajo, permitiendo la evaluación del desempeño de controladores complejos que se basan en la respuesta de un modelo y evaluar su desempeño al aplicarse en este sistema térmico.

Finalmente, se dio continuidad al trabajo iniciado mediante el desarrollo de EmulSis, ampliando sus capacidades para que pueda servir y aportar positivamente en la formación de futuros ingenieros en el área del control y la automatización, que es muy necesaria en todo el mundo y para la cual es muy benéfico contar con este tipo de herramientas.



**Figura 5.1.** Plataforma experimental



# Apéndice A

## Planos de diseño estructural

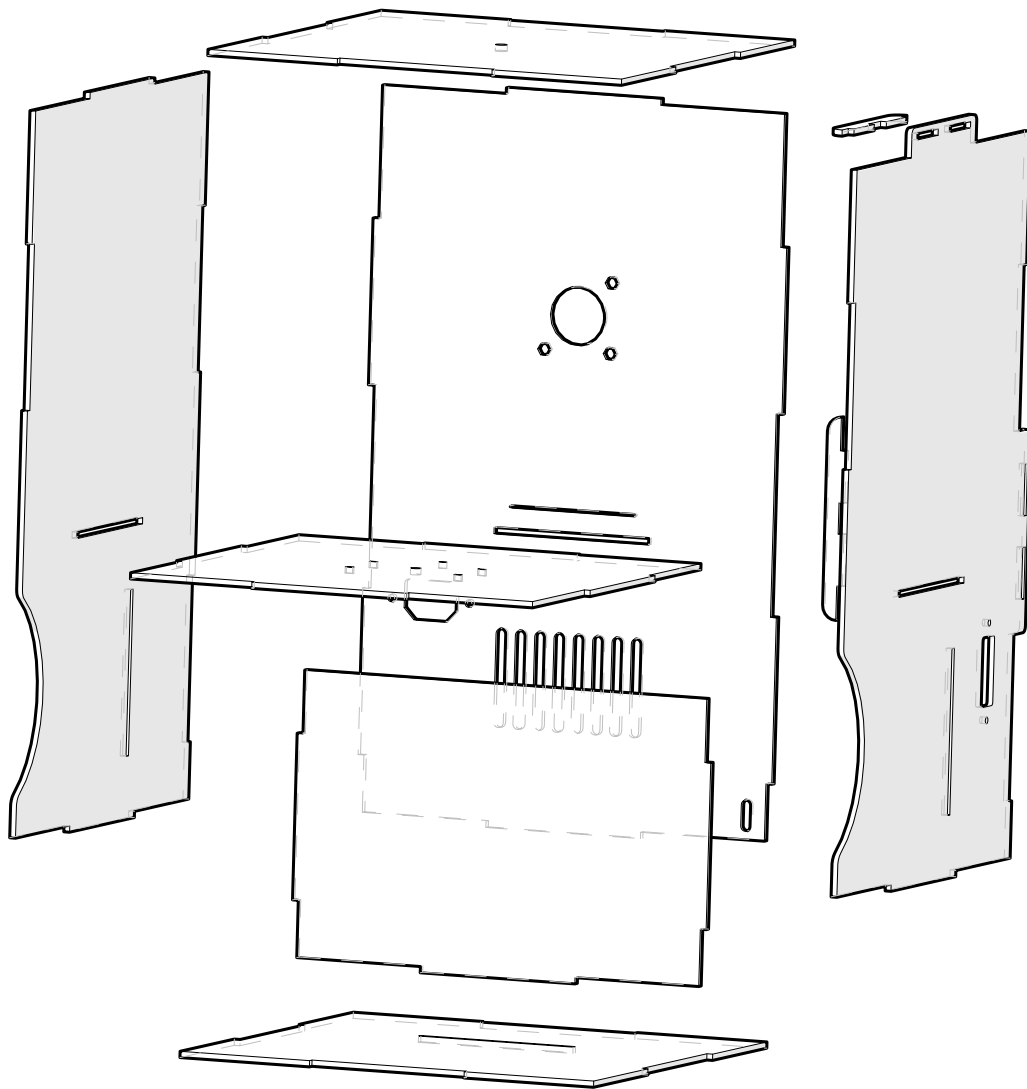


Figura A.1. Distribución de piezas

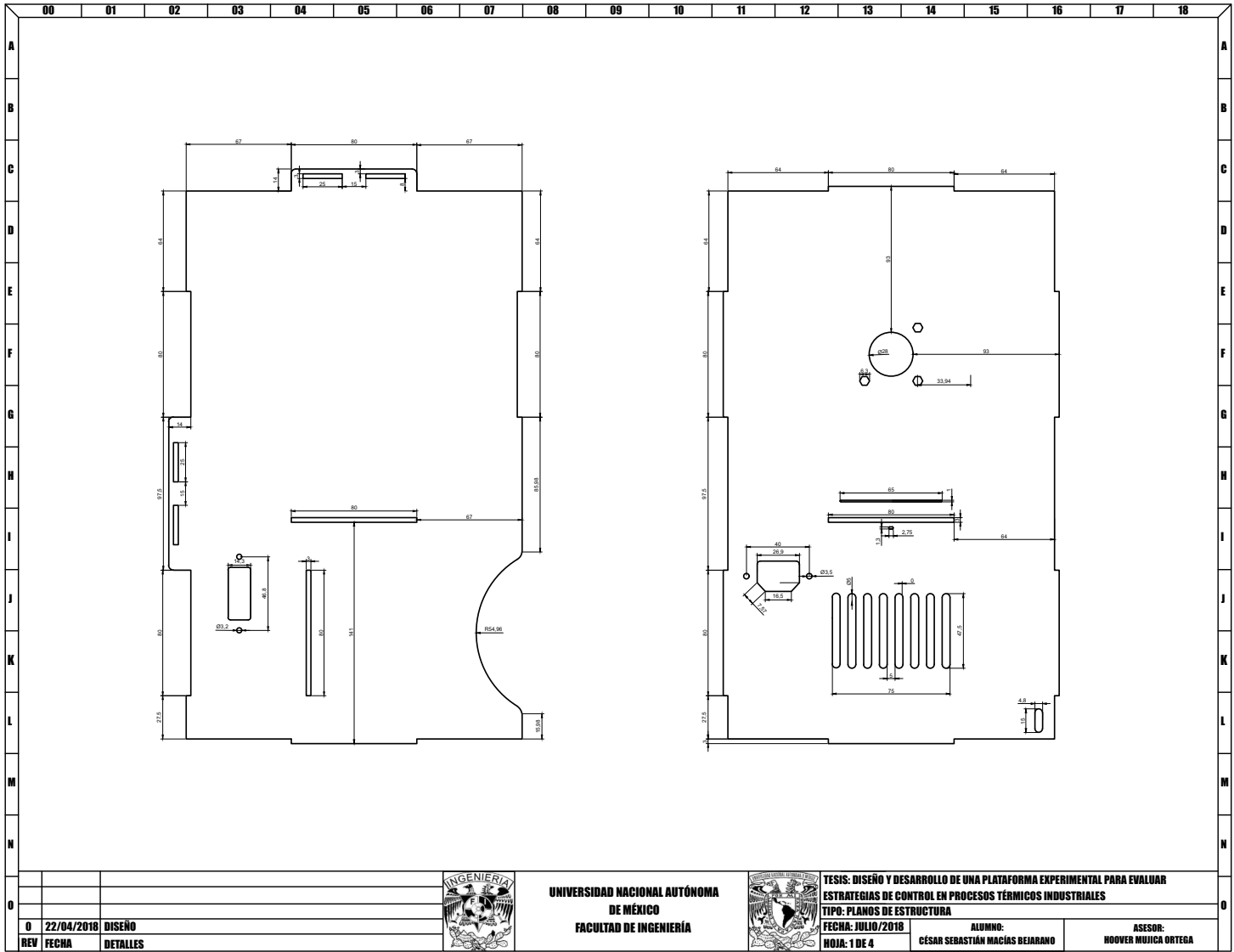


Figura A.2. Planos: Paredes derecha y trasera

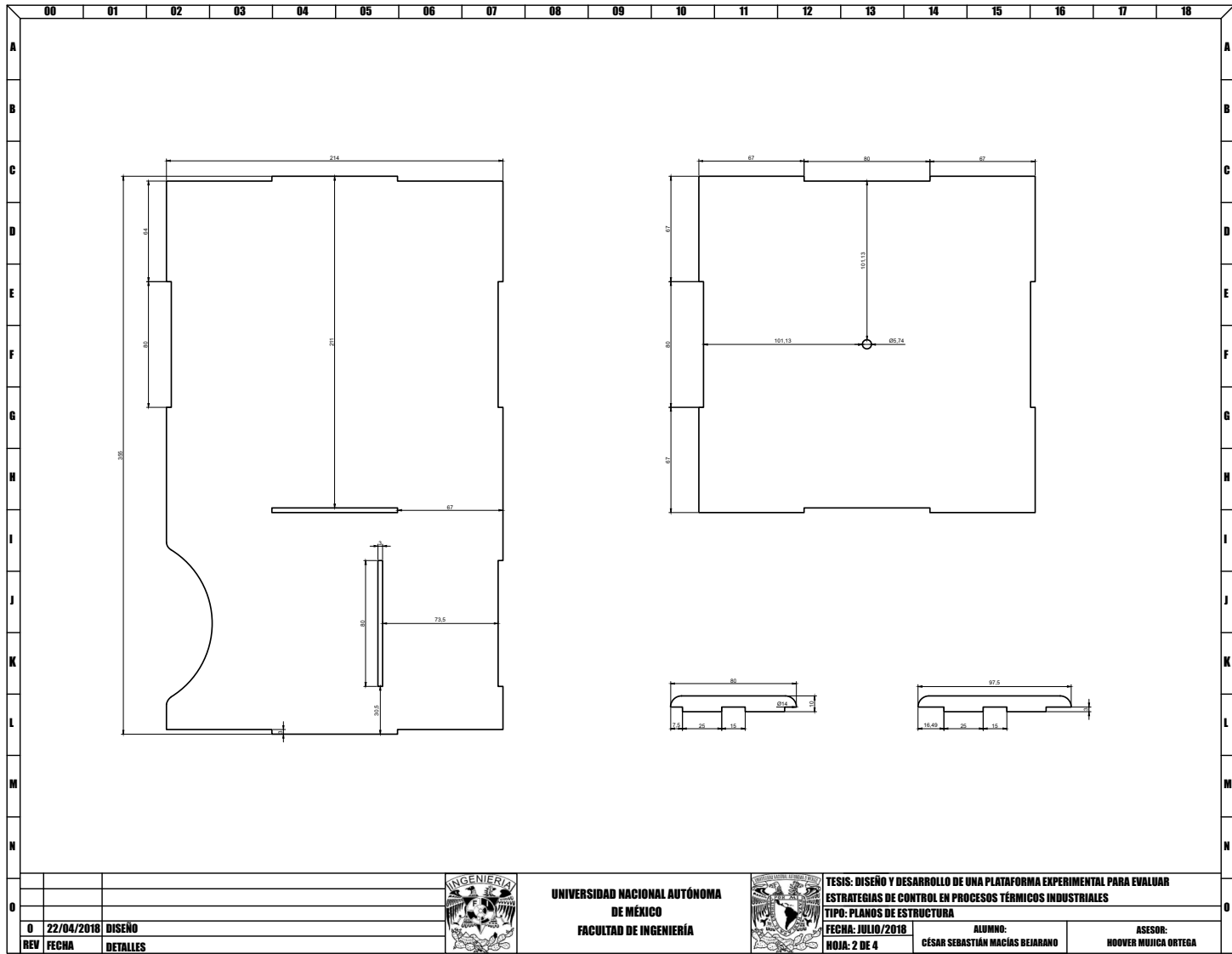


Figura A.3. Planos: Paredes izquierda, superior y canaletas

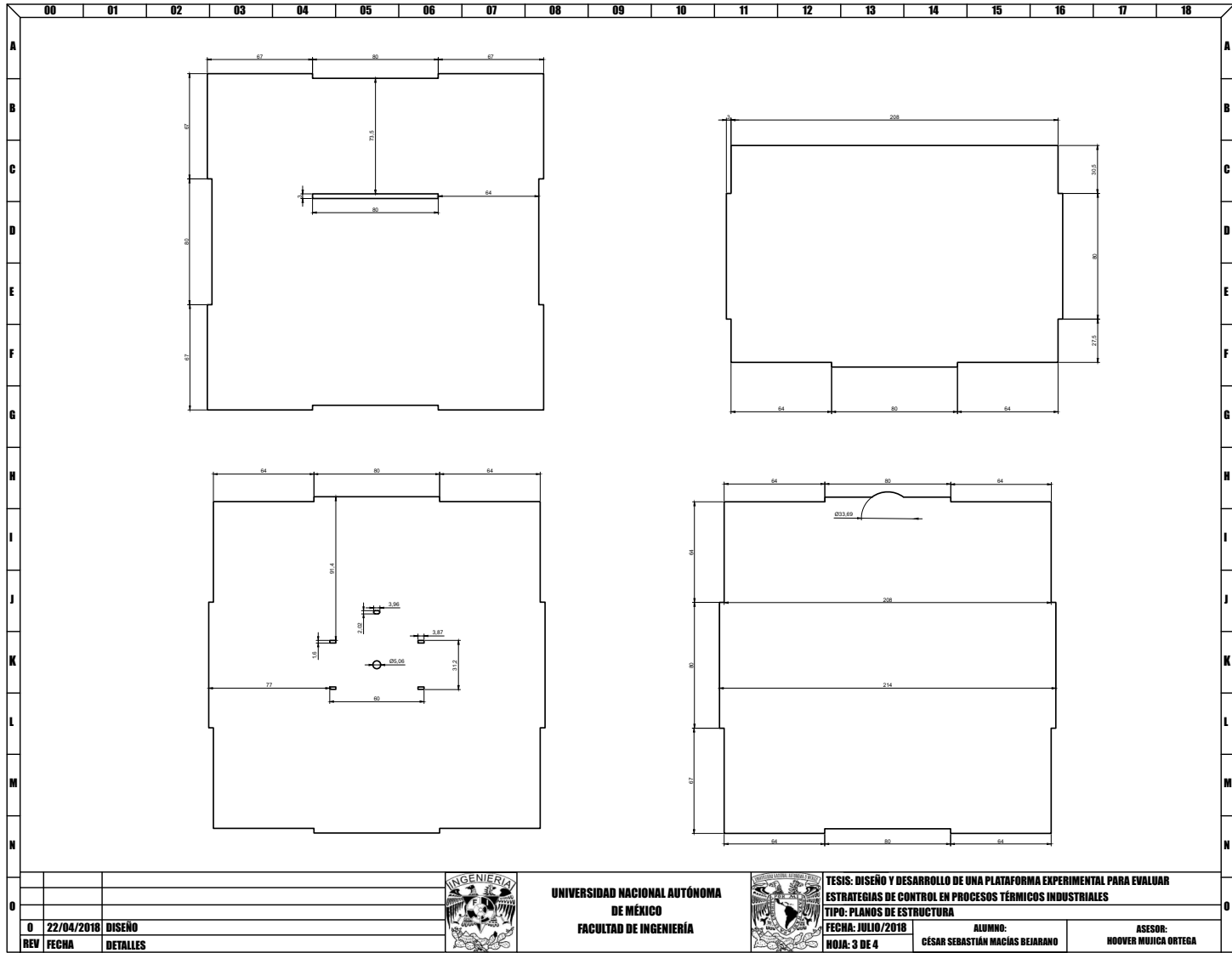


Figura A.4. Planos: Paredes inferior, frontal, intermedia y división de sección inferior



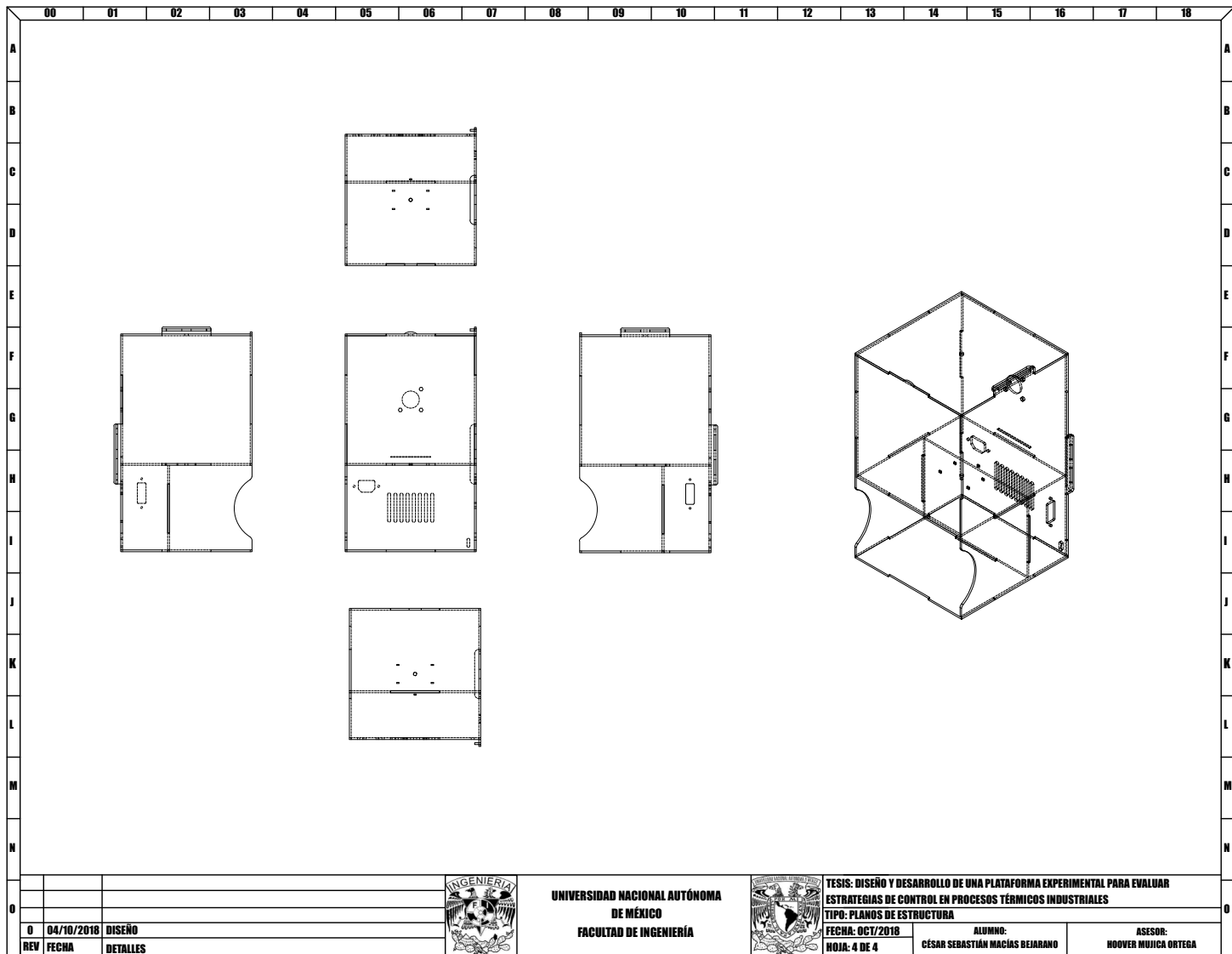


Figura A.5. Proyecciones de ensamble



# Apéndice B

## Diseño electrónico

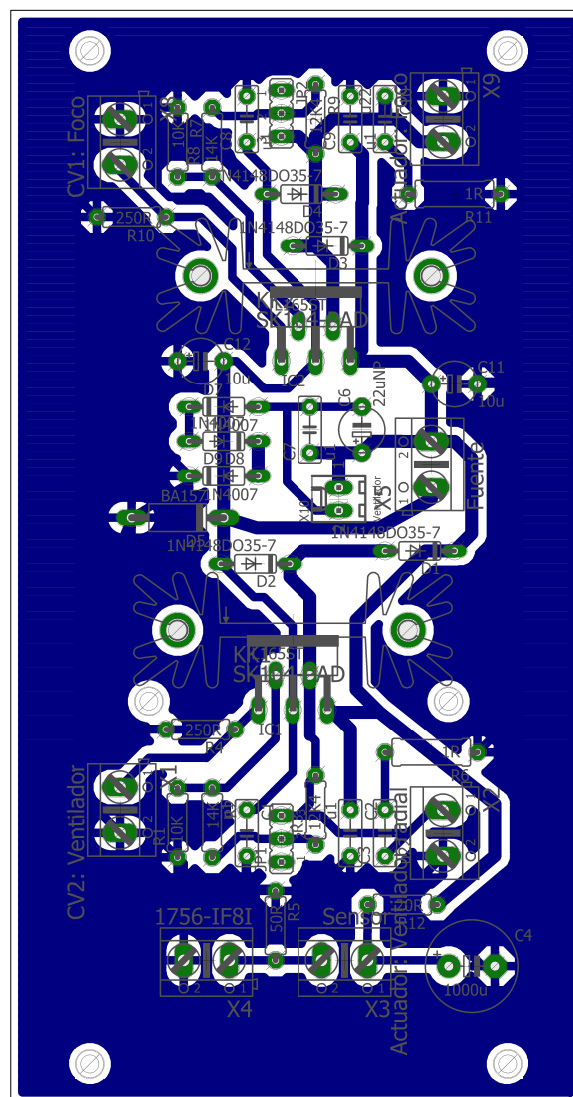


Figura B.1. Placa de circuito impreso

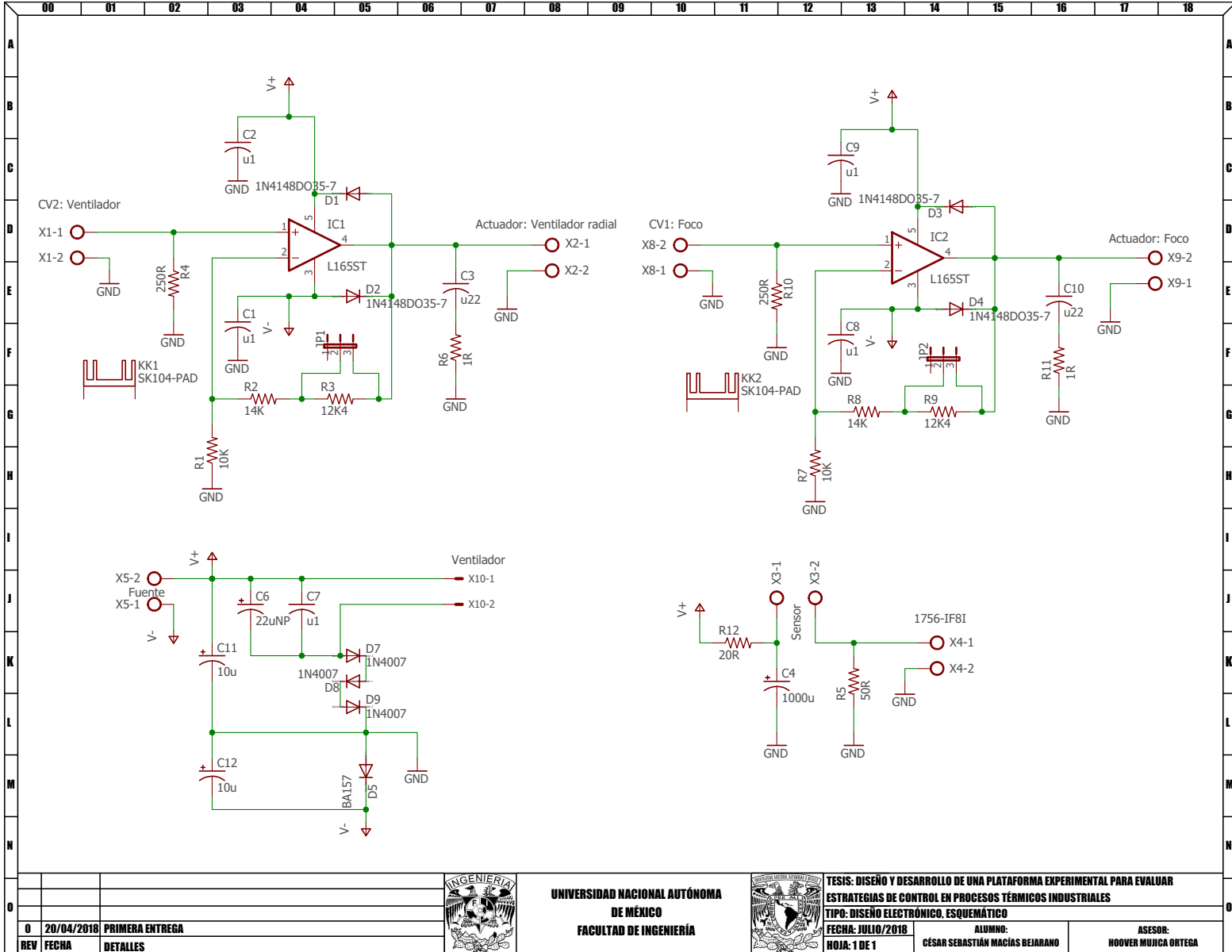


Figura B.2. Diagrama esquemático de la tarjeta electrónica

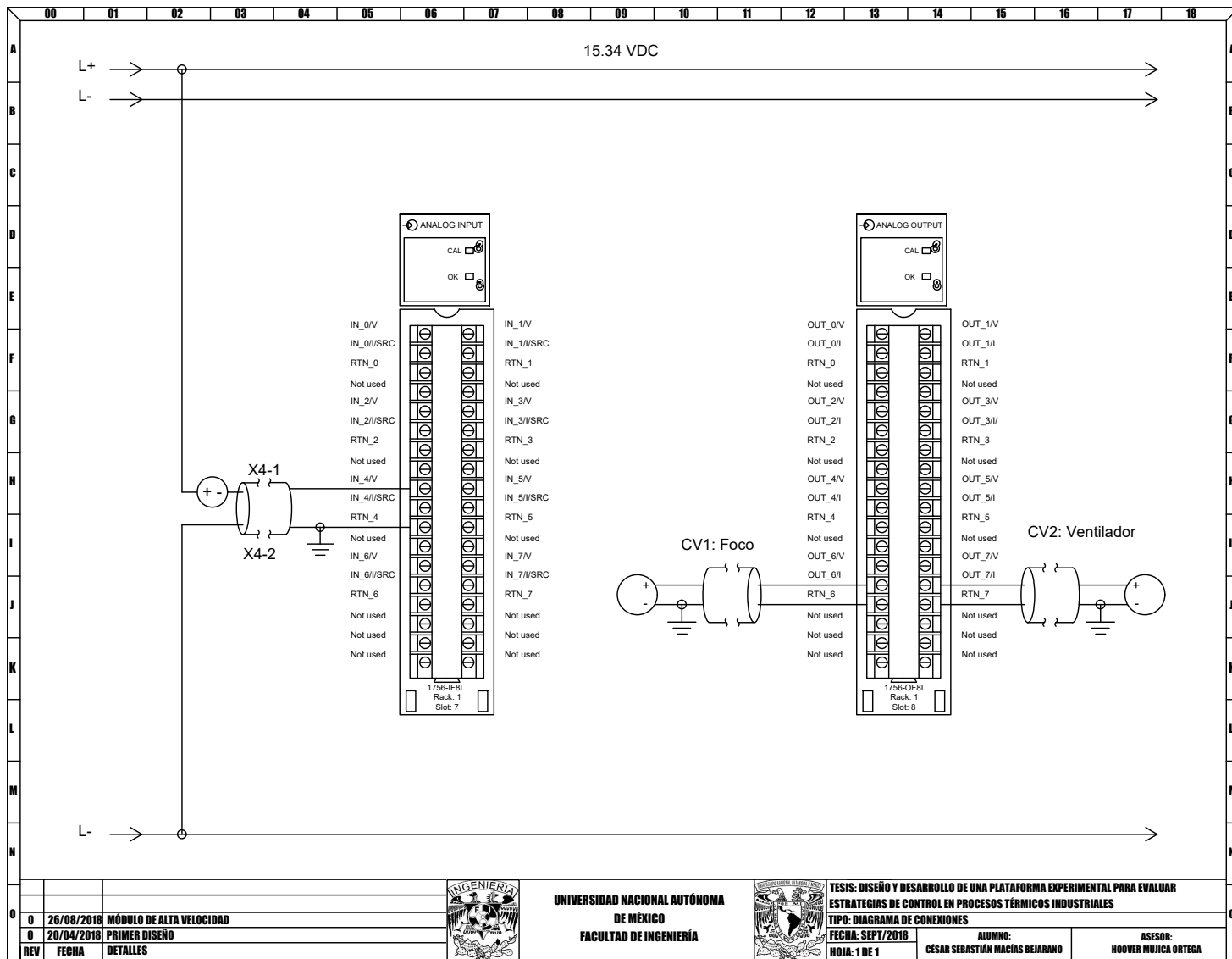
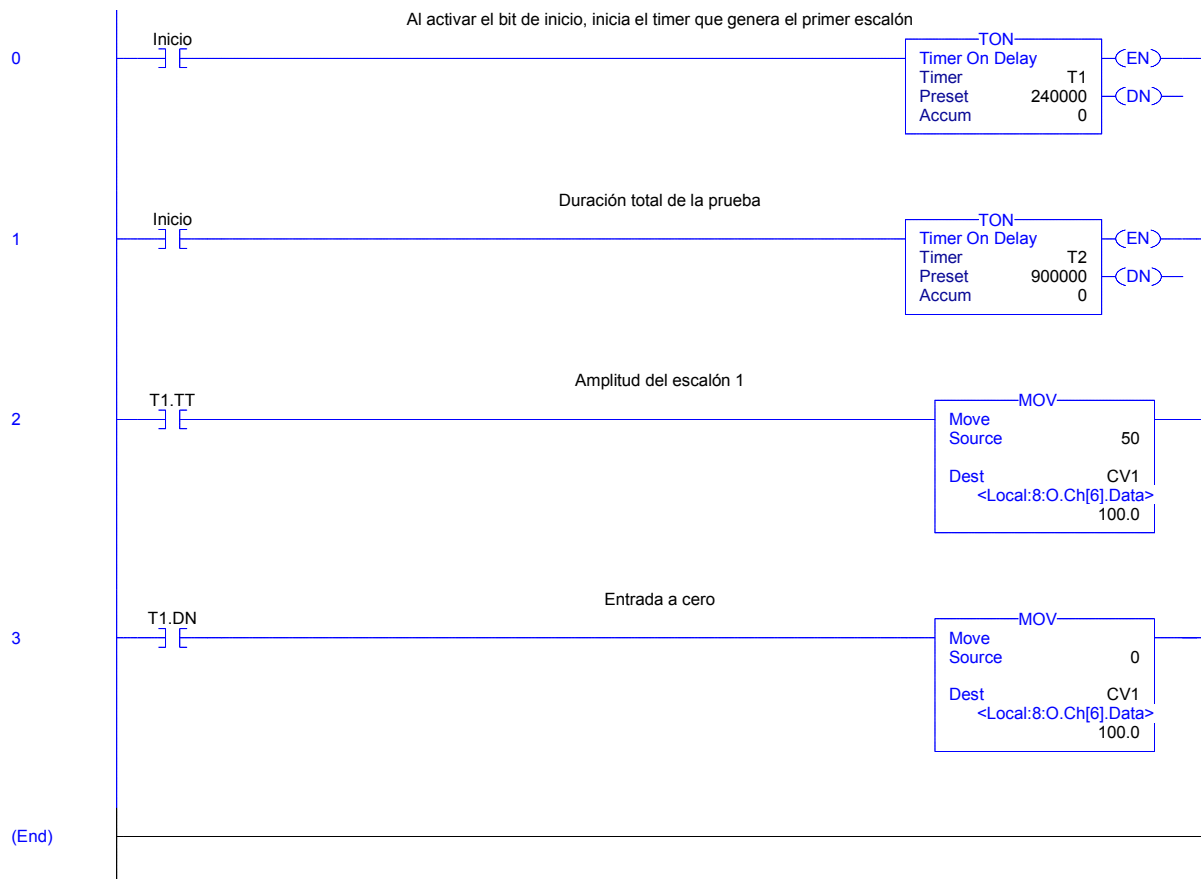


Figura B.3. Diagrama de conexiones a módulos de entradas y salidas analógicas

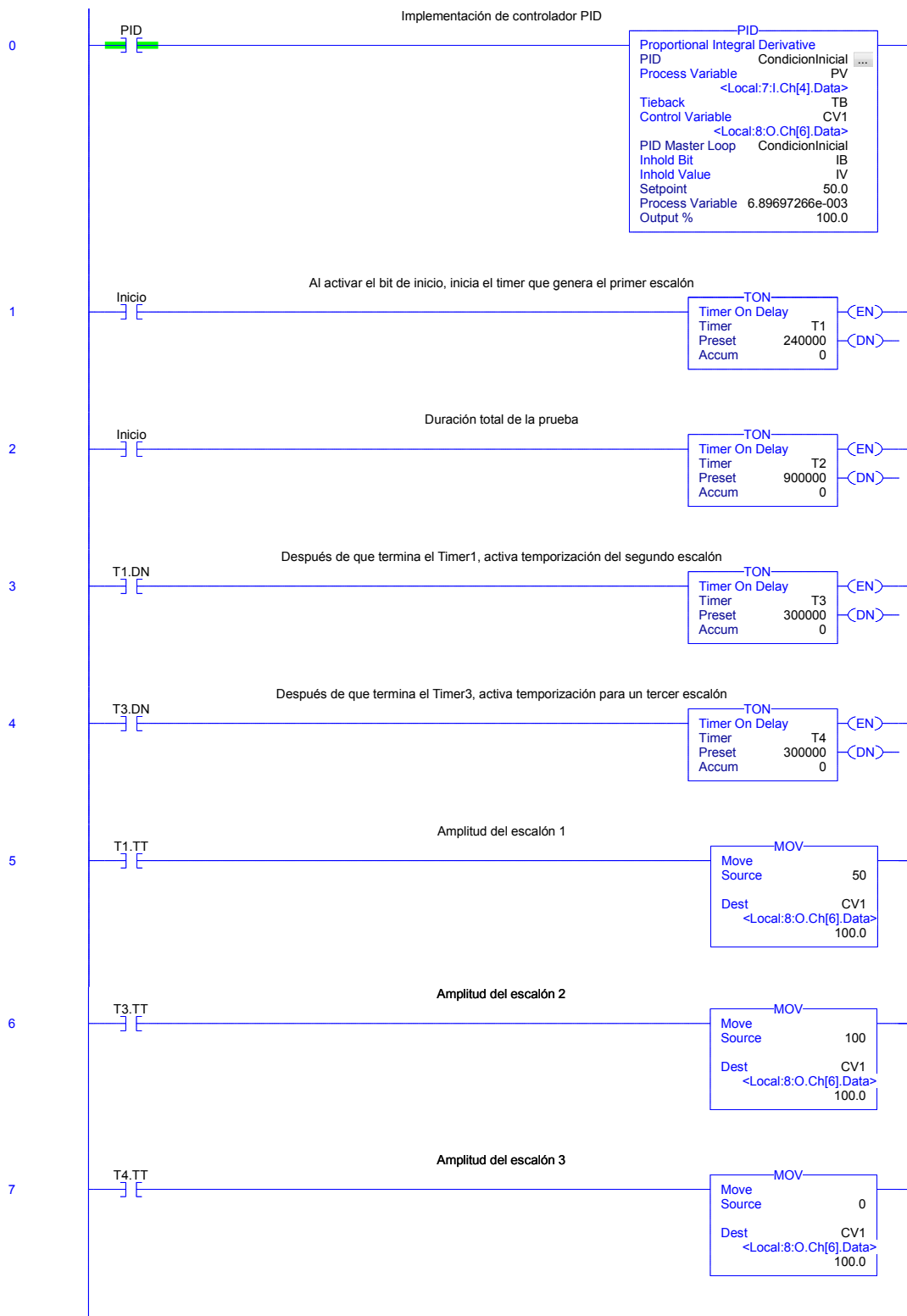


# Apéndice C

## Rutinas de control en lenguaje LD IEC 61131-3



**Figura C.1.** Programa en lenguaje Ladder para generación de señal de entrada en primer escenario de evaluación



**Figura C.2.** Programa en lenguaje Ladder para generación de señal de entrada en segundo escenario de evaluación



# Referencias

- [Álvarez, *et al.*, 2014] Álvarez, M. C. G., Villalón, J. A. C. M., Gasca-Hurtado, G. P., y Guilabert, T. S. F. (2014). Design of a pedagogic instrument for teaching software process improvement: Teaching instrument for university and business environments. En *2014 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, páginas 1–7. (Citado en página 4.)
- [Appadurai, 2001] Appadurai, A. (2001). *Globalization. Alternative modernities*. Duke University Press. (Citado en página 1.)
- [Arora, 2001] Arora, C. (2001). *Thermodynamics*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited. (Citado en página 11.)
- [Bloom, *et al.*, 1984] Bloom, B., Krathwohl, D., y Masia, B. (1984). *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals*. Número v. 1 en *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals*. Longman. (Citado en página 2.)
- [Çengel, 2011] Çengel, Y. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. (Citado en página 13.)
- [ElettronicaVeneta, 2002] ElettronicaVeneta (2002). *Transductores y control de temperatura*. Manual Profesor-Alumno 20B-E-PE-G34-0, Elettronica Veneta, 31045 Motta di Livenza (Treviso) Italia. (Citado en página 5.)
- [Gardner, 2011] Gardner, H. (2011). *Multiple Intelligences: The Theory in Practica*. La Ciencia para Todos. Basic Books. (Citado en página 2.)
- [INEGI, 2018] INEGI (2018). *Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Cuentas nacionales, Banco de Información Económica. Producto interno bruto trimestral, Valores a precios de 2013, Actividades secundarias, Total actividades secundarias. (Citado en página 1.)
- [Mastouri y Bouguila, 2017] Mastouri, M. y Bouguila, N. (2017). A methodology for thermal modelling and predictive control for building heating systems. En *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, páginas 568–573. (Citado en páginas 5 y 26.)
- [Mendoza, 2018] 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. (Citado en páginas 6 y 30.)

- [Ogata, 2003] Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson educación. Pearson Educación. (Citado en página 14.)
- [Rascón, 2013] Rascón, O. A. (2013). *La Educación en Ingeniería en México y el Mundo*. Estado del Arte y Prospectiva de la Ingeniería en México y el Mundo. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (Citado en página 1.)
- [Reséndiz, 2011] Reséndiz, N. D. (2011). *El rompecabezas de la ingeniería: Porqué y cómo se transforma el mundo*. La Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica. (Citado en página 2.)
- [RockwellAutomation, 2016] RockwellAutomation (2016). 1756 Controllogix I/O Specifications. Technical Data 1756-TD002J-EN-P, Rockwell Automation, 1201 South Second Street, Milwaukee. (Citado en página 24.)