



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de sistema de control y  
automatización para horno eléctrico  
industrial

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de  
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

José Miguel Soto Monterroza

ASESOR DE INFORME

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Jurado asignado

Presidente: M.I. Ricardo Garibay Jiménez

Secretario: M.I. Gloria Mata Hernández

Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega

1<sup>er</sup> suplente: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

2<sup>do</sup> suplente: Mtra. Gloria Correa Palacios

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

Ciudad de México.

Asesor de informe

---

Dr. Hoover Mujica Ortega



## Dedicatoria

*Las razones me sobran para dedicarle este y todos los trabajos realizados durante mi etapa estudiantil a las personas que fueron los pilares de mi formación, que me dieron todo y siempre se preocuparon porque yo saliera adelante: Mamá y Papá. Quiero que sepan que día con día asistí a la facultad con el objetivo de superarme y hacerlos sentir orgullosos, los amo.*

*A Germán y Liliana, por mostrarme el camino a seguir.*

*A Fridiskisminskis, por ser una de las mejores amigas que tuve en la universidad.*

*A mis grandes amigos de la élite del PARA, por inspirarme y motivarme a ser mejor universitario.*

*A Esperancita, por haber sufrido conmigo esas tareas, exámenes y proyectos imposibles durante la carrera.*

*A Checo y Neto, por las inolvidables fiestas y anécdotas que vivimos durante esta etapa.*

*A Karina, por haber sido una gran compañera durante los buenos y malos momentos.*

*A todos aquellos docentes que me inculcaron el amor a la carrera, y me alentaron a seguir aprendiendo.*

*A UNAM Aero Design, por haberle dado contenido a mi primer currículum.*

*A Chavolla, Guille, Ale y Vale, por haberme apoyado durante el módulo de control.*

*A mis primos, especialmente a José Antonio Mazariegos, por aconsejarme y escuchar mis preocupaciones sobre el futuro.*

*Finalmente, a todos aquellos familiares, amigos, y compañeros que fueron parte de este proceso y que contribuyeron de cierta manera en mi formación profesional.*



## Agradecimientos

A mi querida madre Lilia Monterroza, y mi querido padre Germán Soto, por darme todo lo necesario para salir adelante, apoyarme, y preocuparse por mi bienestar, sin ustedes no habría podido llegar a ser lo que soy, los amo.

Al Ing. Rodolfo, por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto confiando en mis capacidades, su orientación brindada, y la empatía mostrada durante el tiempo que trabajé y estudié.

Al Dr. Hoover Mujica Ortega, por ayudarme en la elaboración de este informe, inspirarme a lograr grandes cosas, y recordarme que siempre debo trabajar con la mayor calidad posible.

Al Ing. Giovanni Hernández y los técnicos de mantenimiento: Isaac Méndez, Pedro Agustín y Francisco Zetina, por haberme ayudado y orientado en diversas cuestiones durante el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad, por ser la institución que me permitió acceder a una educación de gran calidad, y me dio todo lo necesario para que yo pudiera consolidarme como persona y profesional.





## Resumen

En este informe se describen los conceptos técnicos, metodología, resultados, y otras cuestiones relacionadas con el diseño e implementación de un sistema de control y automatización para un horno eléctrico, el cual sería utilizado durante el proceso de fabricación de una determinada familia de productos. El diseño y construcción de esta máquina se realizó por la necesidad e interés de una empresa de aumentar su producción sin comprometer la calidad de los resultados. Dicho proyecto fue asignado al personal de mantenimiento de la misma compañía, por tener experiencia previa diseñando maquinaria y su amplio conocimiento del proceso.

El sistema diseñado tiene como objetivo principal el control de la temperatura interna del horno, para dicho propósito incorpora sensores de temperatura industriales, y resistencias eléctricas como fuente de calentamiento. Dichos componentes son empleados y monitoreados por un controlador industrial programable, el cual, por medio de un lazo cerrado y utilizando el algoritmo PID, calcula el tiempo de encendido y apagado de las resistencias en un periodo definido para regular la temperatura interna del horno, tomando como referencia las lecturas registradas por los sensores. Cabe aclarar que se incorporaron ventiladores (también llamados agitadores) impulsados por motores eléctricos para favorecer la transferencia del calor generado por las resistencias. Además, se incluyeron mecanismos de protección para garantizar la correcta operación de los actuadores, y se instalaron sensores de proximidad inductivos para complementar el monitoreo operativo del horno. Vale la pena mencionar que el bienestar del personal involucrado en el proceso fue priorizado por encima de la calidad del producto, rendimiento del horno, y otras cuestiones relacionadas con el proyecto, por lo tanto, la seguridad operativa fue un aspecto considerado en todas las etapas de diseño.

Este proyecto ejemplifica la importancia y ventajas que tiene la implementación de los sistemas de control y automatización en la producción de una compañía, ya que además de haber logrado los objetivos de productividad y calidad establecidos, se obtuvieron beneficios adicionales como una operación más segura, sencilla y monitoreable, reducción en los tiempos de capacitación operativa, mayor rapidez en la detección de fallas, y simplificación de las tareas relacionadas con la operación y mantenimiento del horno.



# Índice general

Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Acrónimos	xvii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Definición e importancia de los hornos . . . . .	3
2.1.1. Horno eléctrico . . . . .	4
2.2. Sistemas de control y automatización . . . . .	7
2.2.1. Ciclo de vida de los sistemas de automatización y control . . . . .	8
2.2.2. Funciones básicas y partes de un sistema de automatización . . . . .	9
2.2.3. Controladores . . . . .	10
2.2.4. Sensores . . . . .	15
2.2.5. Actuadores . . . . .	17
2.3. Seguridad operacional . . . . .	20
2.3.1. Análisis e identificación de peligros y riesgos . . . . .	21
2.3.2. Protecciones físicas . . . . .	21
2.3.3. Paros de emergencia . . . . .	22
2.3.4. Protecciones contra sobretensión . . . . .	22
2.3.5. Protecciones contra cortocircuito y sobrecarga . . . . .	23
2.3.6. Conexiones a tierra . . . . .	25
2.3.7. Mecanismos de protección en el software del sistema . . . . .	25
<b>3. Definición del Problema</b>	<b>27</b>
3.1. Contexto de la participación profesional . . . . .	28
3.1.1. Otras actividades . . . . .	28
<b>4. Metodología utilizada</b>	<b>31</b>
4.1. Investigación y análisis de la infraestructura instalada . . . . .	31
4.2. Especificaciones de diseño, características y funcionalidades del horno . . . . .	32
4.3. Elaboración de los diagramas eléctricos . . . . .	32
4.4. Investigación, evaluación y elección del controlador . . . . .	32

---

4.5. Búsqueda y selección del modelo de cada componente del sistema . . . . .	33
4.6. Programación del controlador . . . . .	34
4.7. Supervisión de conexionado de fuerza y control de gabinete eléctrico . . . . .	35
4.8. Pruebas de funcionamiento, calibración de sensores y ajuste de ganancias . . . . .	35
4.9. Primeros ciclos de horneado y modificaciones sugeridas . . . . .	35
4.10. Generación de entregables del proyecto . . . . .	35
<b>5. Resultados</b>	<b>37</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Referencias</b>	<b>43</b>

# Índice de figuras

2.1. Clasificación de los hornos de acuerdo a su fuente de calor . . . . .	4
2.2. Clasificación de los sistemas de calentamiento eléctrico . . . . .	5
2.3. Ejemplos de hornos resistivos . . . . .	6
2.4. Gabinete resguardando componentes de un sistema de automatización . . . . .	8
2.5. Controlador industrial utilizado como unidad de control . . . . .	8
2.6. Entradas digitales tipo sinking . . . . .	14
2.7. Entradas digitales tipo sourcing . . . . .	14
2.8. Entradas digitales de 2 hilos . . . . .	15
2.9. Ejemplo de un sensor RTD . . . . .	16
2.10. Alternativas de conexión de sensores RTD . . . . .	16
2.11. Ejemplo de sensor inductivo . . . . .	17
2.12. Funcionamiento de un sensor inductivo . . . . .	17
2.13. Estructura de un motor jaula de ardilla . . . . .	20
2.14. Estructura de un disyuntor termomagnético . . . . .	25
5.1. Lazo de control de temperatura . . . . .	37
5.2. Esquema del horno construido . . . . .	38



# Índice de tablas

2.1. Valores de voltaje y corriente de las señales analógicas permitidos por la IEC-60688 . .	15
2.2. Ejemplos de categorías operativas establecidas por la IEC-60947 . . . . .	19
2.3. Factores con ejemplos de causas de accidentes en el lugar de trabajo . . . . .	21
2.4. Clasificación de los peligros inherentes de una máquina y sus riesgos asociados . . . .	21
3.1. Responsabilidades de cada integrante del departamento de mantenimiento relacionadas con el diseño y construcción del nuevo horno . . . . .	30





# Acrónimos

- DIN** Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización, por sus siglas en alemán). *Glossary:* DIN, 1, 7
- HMI** Human Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina, por sus siglas en inglés). *Glossary:* HMI, 10
- IEC** International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional, por sus siglas en inglés). *Glossary:* IEC, xv, 10, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 32, 33
- LD** Ladder. *Glossary:* LD, 12
- FBD** Functional Block Diagram (Diagrama de Bloques Funcionales, por sus siglas en inglés). *Glossary:* FBD, 13, 34
- ST** Structured Text (Texto Estructurado, por sus siglas en inglés). *Glossary:* ST, 13
- IL** Instruction List (Lista de Instrucciones, por sus siglas en inglés). *Glossary:* IL, 13
- PID** Proporcional Integral Derivativo. *Glossary:* PID, ix, 12, 13, 37
- RTD** Resistance Temperature Detector (Detector de Resistencia de Temperatura, por sus siglas en inglés). *Glossary:* RTD, 16, 37
- PWM** Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulsos, por sus siglas en inglés). *Glossary:* PWM, 15
- NO** Normally Open (Normalmente Abierto, por sus siglas en inglés). *Glossary:* NO, 18
- NC** Normalmente Cerrado. *Glossary:* NC, 18
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, por sus siglas en inglés). *Glossary:* IEEE, 26



# Capítulo 1

## Introducción

Las tecnologías de automatización industrial involucran la aplicación de conocimientos, métodos y técnicas de diferentes ingenierías, como lo es la ingeniería mecánica para el diseño de una estructura, la eléctrica para la alimentación de un sistema, la industrial para un análisis de producción, etcétera. Algunas de las ventajas obtenidas por la incorporación de dichas tecnologías a un proceso son:

- Mayor continuidad en la producción, la cual puede llegar a ser interrumpida por los procesos de mantenimiento
- Incremento en la calidad del producto, resultado de la disminución de los errores cometidos durante el proceso
- Incremento en la producción por la aceleración de tareas
- Evita que las personas realicen actividades peligrosas o aburridas

Sin embargo, también podemos encontrar los siguientes efectos negativos por utilizar estas tecnologías:

- Costos elevados por la contratación de personal capacitado para efectuar el mantenimiento y las actualizaciones del sistema
- La empresa productora se vuelve dependiente tecnológicamente del proveedor del sistema de automatización
- Desempleo por la sustitución de personal por maquinaria
- Inversión inicial elevada, en conjunto de la depreciación y amortización de las máquinas

De acuerdo al estándar DIN 19223, una máquina automática es un sistema artificial que toma decisiones basadas en la relación de sus entradas con los respectivos estados del sistema; dichas decisiones producen salidas específicas deseadas. Estas máquinas se componen principalmente de los siguientes elementos [Ebel, 2008]:

1. Sensores: Cuya función es detectar los estados del sistema
2. Actuadores: Utilizados para emitir las salidas de los comandos de control

3. Controladores: Se encargan de la toma de decisiones de acuerdo a lo que tengan programado.

En el presente, estas tecnologías son ocupadas en diferentes industrias; sin embargo, no se cuenta con una máquina que solucione la totalidad de las necesidades que demanda este sector, debido a que el diseño de estos sistemas se realiza de acuerdo a los requerimientos particulares de cada proceso. En este informe, se resumen las actividades realizadas para diseñar un sistema que automatice y controle un horno industrial, cuyo propósito es elevar la temperatura de su interior, para que el calor emitido sea utilizado en el proceso de fabricación de un determinado producto.

## 1.1. Objetivo

Diseñar un sistema de control seguro y confiable para un horno industrial, cuya operación sea fácil y monitoreable; de tal forma que su implementación permita obtener los siguientes beneficios:

1. Breve tiempo de capacitación para los operadores del horno
2. Mantenimiento predictivo y correctivo fáciles de ejecutar
3. Baja probabilidad de ocurrencia de errores operativos
4. Información del proceso accesible, exacta y confidencial
5. Diagnóstico de fallas rápido y oportuno
6. Vida útil prolongada
7. Eficiencia en costos operativos

Este sistema debe de controlar temperaturas comprendidas entre 30 a 200 grados centígrados [ $^{\circ}\text{C}$ ], durante los tiempos que le sean especificados, ambos parámetros definidos por el operador. Cabe aclarar que el horno contará con 4 canales de medición de temperatura, por lo que el control de dicho parámetro debe de asegurar que la diferencia entre el valor objetivo, y la temperatura registrada en cada canal, sea menor o igual a  $5[^{\circ}\text{C}]$ .

El horno debe de contar con dispositivos de protección y emisión de alarmas para evitar llegar a temperaturas que presenten un riesgo para la instalación y el producto. De igual forma, deberá alertar a los operadores e interrumpir el proceso cuando alguno de los actuadores utilizados no funcione correctamente.

Respecto a la temperatura objetivo, se requiere que su valor cambie automáticamente a lo largo del proceso de calentamiento, de tal forma que se puedan generar perfiles de horneado o curvas de cocción. Adicionalmente, se desea que el proceso de calentamiento sea programable, es decir, que el operador pueda establecer el tiempo que deberá transcurrir para que el horno inicie con este proceso.

Cabe aclarar que no se abordarán aspectos mecánicos del horno, como materiales de construcción, dimensiones físicas, aislamiento térmico, u otras características que no se relacionen directamente con el sistema eléctrico-electrónico de control del horno.

# Capítulo 2

## Antecedentes

En este capítulo se abordarán los antecedentes ingenieriles relacionados con el sistema diseñado; desde la definición, clasificación, y aspectos importantes de los hornos industriales, hasta las nociones generales de las tecnologías de automatización, principios de funcionamiento, y criterios de selección de los componentes utilizados en el sistema implementado.

### 2.1. Definición e importancia de los hornos

Los hornos son estructuras cerradas utilizadas para alcanzar y mantener temperaturas mayores a las que se podrían conseguir en el ambiente, de tal forma que la fuente de calor sea aprovechada eficientemente. Históricamente han sido ocupados para facilitar reacciones químicas, o realizar procesos físicos, como el secado o fundición de un material; por lo tanto, están presentes en la fabricación de una gran variedad de productos como la cerámica, cemento, ladrillo, vidrio, productos alimenticios, etcétera; por lo tanto, un horno bien diseñado se caracteriza por cumplir con los siguientes puntos [Mullinger, 2008]:

- Permite la obtención de un producto satisfactorio
- Su operación es energéticamente eficiente
- La construcción es de bajo costo
- Es fácil de operar
- Tiene una larga vida útil y bajos costos de mantenimiento

Debido a la gran variedad de hornos que existen actualmente, se tienen diferentes formas de clasificación: de acuerdo a la industria en la que es utilizado, el producto para el cual está diseñado, su forma, etcétera; sin embargo, una alternativa simple y útil de clasificarlos es de acuerdo a su fuente de calor, ya que de esta dependen aspectos importantes del horno como el tipo de combustible, la naturaleza del producto, el mecanismo de transferencia de calor, y otras cuestiones que influyen en su arreglo físico. En la Figura 2.1<sup>1</sup> se ilustra la clasificación anterior con algunos ejemplos [Mullinger, 2008].

---

<sup>1</sup>Imágen tomada de [Mullinger, 2008]

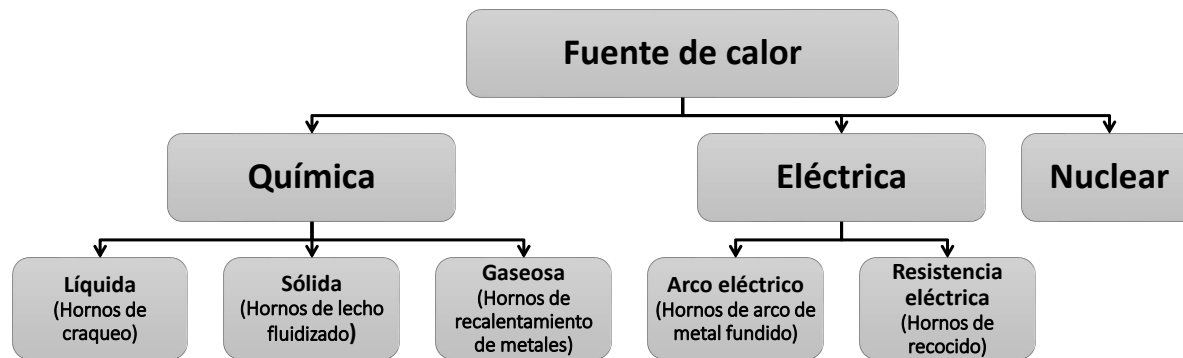


Figura 2.1 Clasificación de los hornos de acuerdo a su fuente de calor

### 2.1.1.1. Horno eléctrico

Los hornos eléctricos se caracterizan por aprovechar la energía eléctrica para producir calor, y son utilizados en muchas industrias, ya que a diferencia de aquellos que utilizan gas, carbón, fuego, u otros elementos, la implementación de sistemas de calentamiento eléctrico permite obtener los siguientes beneficios [Theraja, 2007]:

- Mayor limpieza, ya que no se produce hollín, polvo, u otro tipo de residuos durante la generación de calor. Adicionalmente, el material a calentar no se contamina.
- No hay producción de gases contaminantes, por lo que no se requieren sistemas de ventilación.
- Reducción de costos, pues involucran menos supervisión y mantenimiento. Además, eliminan la necesidad de utilizar espacios para almacenar la materia prima requerida para la producción de calor.
- Fáciles de controlar, ya que la implementación de sistemas automáticos permite lograr un control preciso de temperatura, con exactitudes de  $\pm 5[^\circ\text{C}]$ .
- Se pueden lograr requerimientos especiales de calentamiento, como calentar una zona específica sin afectar a las demás, o un calentamiento muy uniforme.
- Mayor eficiencia, ya que el calor producido se aprovecha mejor.
- Mayor seguridad, ya que responden de mejor forma a las señales de control.
- Materiales con mala conducción como la madera o plásticos pueden ser calentados uniformemente y de manera adecuada con la implementación de procesos de calentamiento dieléctricos

En la Figura 2.2<sup>2</sup> se muestra la clasificación de los diferentes sistemas de calentamiento eléctrico que podrían ser utilizados en un horno; cabe mencionar que los hornos con sistemas de calentamiento por resistencia y arco son los más utilizados, y se componen esencialmente de lo siguiente [Stansfield, 1907]:

1. Algún material conductivo calentado por el flujo de corriente
2. Un recubrimiento de material aislante para la conservación de calor

<sup>2</sup>Imágen tomada de [Theraja, 2007]

3. Conductores para llevar la corriente al horno
4. Soportes de alta temperatura para los conductores de calentamiento
5. Elementos de carga y descarga del material a calentar
6. Componentes de alimentación eléctrica para cubrir las necesidades de voltaje y corriente
7. Instrumentos de medición y regulación de temperatura y potencia del horno

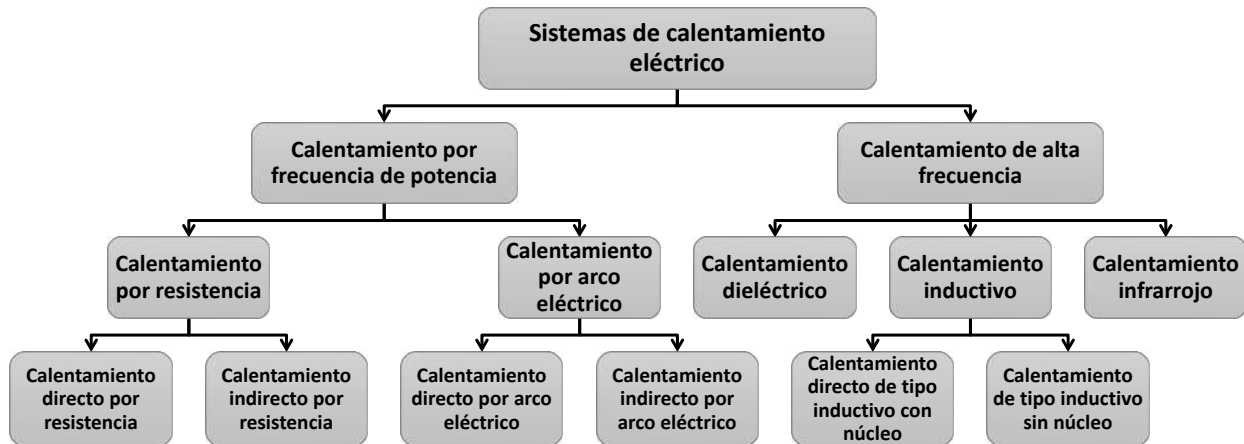


Figura 2.2 Clasificación de los sistemas de calentamiento eléctrico

### Hornos con resistencias de calentamiento

La Figura 2.3<sup>3</sup> muestra algunos ejemplos de este tipo de hornos, cuya alternativa de calentamiento por resistencia eléctrica está basada en el efecto Joule, el cual establece que la circulación de una corriente por un elemento resistivo generará pérdidas de energía manifestadas en forma de calor, las cuales están dadas por  $I^2R$ , en donde  $I$  es la corriente y  $R$  es la resistencia en Ohms del material. Los métodos para utilizar el calor producido a partir de la resistencia eléctrica son [Theraja, 2007]:

- **Calentamiento directo por resistencia:** En este caso se conectan electrodos en el material a calentar para establecerle un flujo de corriente, de tal forma que su resistencia sea la responsable del calor generado. Esta técnica se caracteriza por tener una alta eficiencia, ya que el calor se produce internamente en el material, lo cual reduce las pérdidas por transferencia de calor.
- **Calentamiento indirecto por resistencia:** Esta alternativa utiliza un elemento resistivo por el cual circulará una corriente, por lo tanto, el calor producido por las pérdidas del efecto Joule se propagará al objeto a calentar por medio de radiación, convección, o una combinación de las dos anteriores.

<sup>3</sup>Imágen tomada de [Stansfield, 1907]

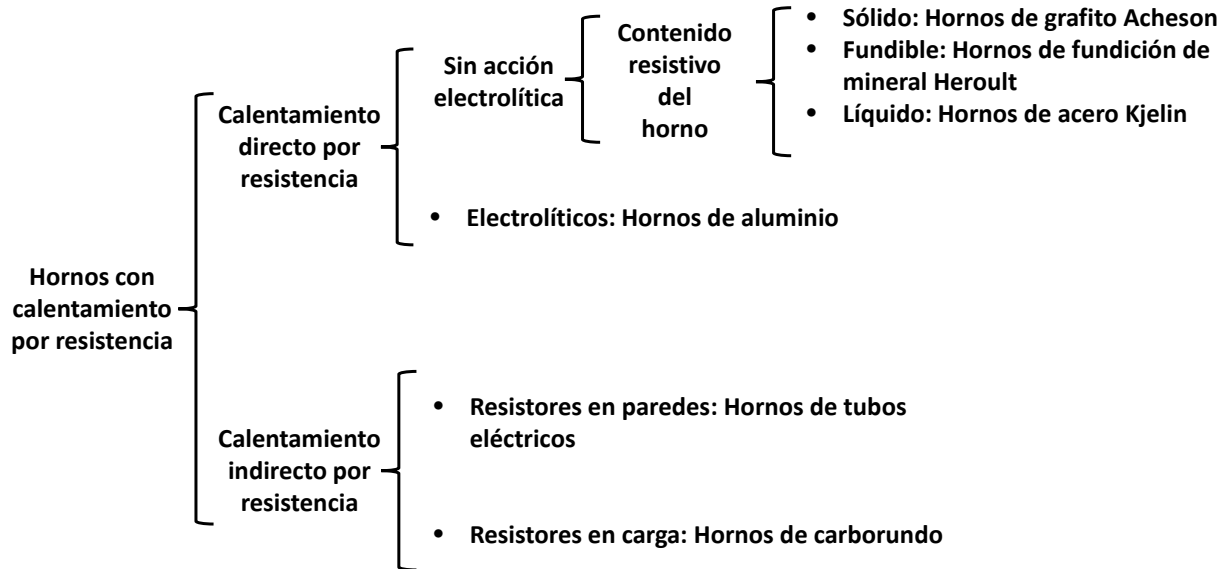


Figura 2.3 Ejemplos de hornos resistivos

### Control de temperatura utilizando el calentamiento indirecto por resistencia

Los hornos que utilizan este sistema de calentamiento son utilizados para diferentes propósitos, como el tratamiento térmico de metales, vulcanizado y endurecimiento de materiales sintéticos, calefacción doméstica y comercial, secado y horneado de cerámicas, etcétera. En esta variante el elemento resistivo de calentamiento juega un papel muy importante, ya que define las temperaturas de operación del horno, por ejemplo, si se utilizan elementos de níquel, cromo o hierro, se podrían obtener temperaturas de hasta 1000[°C], en cambio, si los materiales resistivos son de grafito, las temperaturas de operación podrían llegar hasta 3000[°C]. Normalmente, las resistencias instaladas consisten de cables circulares o cintas rectangulares, las cuales pueden ser colocadas en la parte superior, el fondo, o en los costados del horno; algunas de las consideraciones a tomar en cuenta para elegir el elemento resistivo de calentamiento son [Theraja, 2007]:

1. Alta resistencia específica del material, pues esto reduce la cantidad requerida para lograr una determinada cantidad de calor.
2. Alta temperatura de fundición, para alcanzar grandes temperaturas.
3. Bajo coeficiente de temperatura resistivo, lo cual permite que la demanda de corriente cuando el elemento de calentamiento esté caliente, sea similar a cuando está frío.
4. Alta temperatura de oxidación para alargar su vida útil.
5. Coeficiente de temperatura resistivo positivo, para evitar inestabilidad en la operación, ya que si es negativo la resistencia disminuirá conforme la temperatura aumente, causando un incremento en la demanda de potencia, lo cual se traduce en un aumento del calor emitido, propiciando nuevamente que la resistencia disminuya más.
6. Dúctil para alcanzar formas adecuadas para el calentamiento.
7. Alta rigidez para evitar que el elemento de calentamiento se rompa.



Debido a que este método de calentamiento es ampliamente utilizado, y gracias a los avances tecnológicos que han tenido los sistemas de control y automatización, actualmente existen diferentes técnicas para controlar la temperatura utilizando esta forma de calentamiento [Theraja, 2007]:

- **Conmutación intermitente:** Consiste en apagar y prender de manera intermitente las resistencias de calentamiento, de tal forma que la producción de calor dependa de la existencia del suministro de voltaje.
- **Alteración del número de elementos de calentamiento:** Aquí el número de elementos de calentamiento aumenta o disminuye dependiendo de la cantidad de calor que se quiera producir.
- **Variación en la configuración del circuito:** En el caso de conexiones trifásicas, la conexión de la carga se cambia de estrella a delta para aumentar la producción de calor. Respecto a circuitos monofásicos, los elementos de calentamiento se reagrupan en diferentes arreglos de conexiones serie - paralelo, en donde la conexión en serie es la que produce menos calor.
- **Alteración del voltaje aplicado:** Debido a que una reducción en el voltaje aplicado al elemento de calentamiento reduce la producción de calor, esta técnica busca controlar dicha variable por medio de bobinas especializadas o diferentes tipos de transformadores.

## 2.2. Sistemas de control y automatización

Retomando el estándar DIN 19223, una máquina automática es un sistema artificial que toma decisiones basadas en la relación de sus entradas con los respectivos estados del sistema, las cuales producen salidas específicas responsables de generar el cambio físico deseado [Ebel, 2008].

Estas arquitecturas de automatización se diseñan para integrar, intercomunicar y coordinar las funciones automatizadas de una máquina o proceso, con el objetivo de aumentar la productividad, calidad del producto y seguridad. De acuerdo a Schneider Electric, fabricante de equipos de automatización, para clasificar estas arquitecturas es necesario identificar dos niveles estructurales [Schneider-Electric, 2008]:

1. *Integración funcional:* Se basa en el número de paneles de automatización o gabinetes que resguardan los componentes del sistema de automatización, como lo muestra la Figura 2.4
2. *Unidades de control:* Número de dispositivos encargados de formular, ejecutar y coordinar las acciones de control (ver Figura 2.5)



Figura 2.4 Gabinete resguardando componentes de un sistema de automatización



Figura 2.5 Controlador industrial utilizado como unidad de control

Por lo tanto, la clasificación de arquitecturas de automatización tomando como referencia los niveles anteriores es la siguiente [Schneider-Electric, 2008]:

- *Todo en un dispositivo:* Esta modalidad no cuenta con un gabinete, ya que la ejecución de las funciones automatizadas solamente requiere de un dispositivo de control y sus elementos de actuación. Un ejemplo de esta alternativa es el sistema de apertura y cierre de una puerta, el cual solamente necesita del controlador electrónico principal, y el motor con su conexionado para cumplir con su propósito.
- *Todo en un panel:* Esta alternativa es la más implementada, se caracteriza por incorporar un gabinete y un dispositivo de control para concentrar todas las funciones automatizadas en un solo lugar. Algunos ejemplos de este tipo de arquitecturas son las bombas de gasolina, máquinas expendedoras de dulces, etcétera.
- *Periferia distribuida:* Aquí se cuenta con un solo dispositivo de control para coordinar las funciones de distintos gabinetes instalados en diferentes ubicaciones. Esta solución es ideal para máquinas de grandes dimensiones como las máquinas industriales de panadería, y procesos modulares.
- *Control colaborativo:* Bajo esta modalidad se integran diferentes máquinas o partes de un proceso con controladores y gabinetes propios, para colaborar en la operación de un sistema. Dicha arquitectura está diseñada para procesos de gran escala como las industrias petroquímicas y de acero, o para infraestructuras de gran tamaño como aeropuertos o plantas de tratamiento de agua.

Por último, cabe mencionar que la elección de la arquitectura de automatización es una tarea compleja, ya que deberá de realizarse tomando en cuenta múltiples factores como la naturaleza del proceso, deseos del cliente, costos, rendimiento del sistema, entre otros [Schneider-Electric, 2008].

### 2.2.1. Ciclo de vida de los sistemas de automatización y control

Normalmente, el ciclo de vida que tienen este tipo de sistemas se compone de las siguientes etapas [Schneider-Electric, 2008]:

1. *Definición de la máquina o proceso por el cliente:* En esta etapa el equipo encargado del diseño, construcción y puesta en marcha del sistema de automatización, define en colaboración con la persona interesada en automatizar cierto proceso, los alcances, funciones, y otras características relevantes del sistema a implementar.
2. *Elección del equipo de automatización:* Con el objetido de seleccionar aquellos equipos que aseguren el cumplimiento de las necesidades funcionales y operativas demandadas por el proceso, se requiere de una fase enfocada al estudio y análisis de los componentes de automatización ofertados en el mercado.
3. *Suministro de componentes:* Dicha fase engloba las acciones que permiten la adquisición de los componentes seleccionados, desde la cotización, hasta la generación de las órdenes de compra con el proveedor. Cabe aclarar que todas las adquisiciones deberán de realizarse bajo condiciones y tiempos de entrega adecuados para el proyecto.
4. *Configuración, pruebas y comisionamiento:* Aquí se efectuan las tareas de programación, configuración, y otras acciones que permitan lograr el funcionamiento deseado de los equipos adquiridos. Adicionalmente, se incluyen las acciones que permiten validar que lo realizado previamente ha cumplido con los objetivos establecidos. Por último, el comisionamiento se refiere a la instalación, calibración y otras tareas realizadas para poner en funcionamiento el sistema de automatización bajo las condiciones acordadas.
5. *Operación:* Engloba el tiempo en que la máquina es utilizada para cubrir la necesidad por la cual fue diseñada.
6. *Mantenimiento:* Esta etapa comprende todas las acciones realizadas para asegurar que la máquina funcione de manera correcta y continua, las cuales pueden ser identificadas de dos formas: *preventivas*, cuyo objetivo es prevenir el deterioro de la máquina; y *correctivas*, las cuales se realizan cuando ocurre una falla en el sistema, por lo que tienen un enfoque reactivo ya que abordan un problema o emergencia no anticipada [Escano, 2002].
7. *Desmantelamiento, reciclado y destrucción:* Para esta fase, la máquina ha alcanzado un grado de obsolescencia que hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías para retomar y/o mejorar los objetivos de diseño iniciales; no obstante, es importante realizar un análisis detallado de todo el sistema para determinar los componentes que pueden ser reciclados, y los que deben de ser destruidos, con el objetivo de aprovechar al máximo su vida útil y hacer un uso responsable de los desechos.

### 2.2.2. Funciones básicas y partes de un sistema de automatización

En general, este tipo de sistemas se diseñan para ejecutar acciones específicas de un proceso; no obstante, existen 5 funciones básicas que realiza todo sistema de automatización [Schneider-Electric, 2008]:

- **Suministro de potencia eléctrica:** El sistema debe de asegurar una distribución segura y continua de energía eléctrica a los dispositivos de potencia y control, de acuerdo a los estándares de la instalación y la máquina.

- **Control de potencia eléctrica:** Controlar las cargas manejadas por el dispositivo automático, como es el uso de controladores electrónicos para regular la potencia eléctrica que le llega a un motor o calentador.
- **Adquisición de datos:** Obtener información del estado del proceso y de los componentes que conforman el sistema de automatización.
- **Diálogo:** Establecer un enlace entre el usuario y la máquina para dar las ordenes de control y monitorear el estado del proceso automatizado.
- **Procesamiento de datos:** Procesar las órdenes emitidas por el operador y las mediciones del estado del proceso, para controlar los respectivos componentes con el objetivo de producir los cambios deseados.

Respecto a los componentes de un sistema automático, su selección depende principalmente de la planta o proceso a controlar; sin embargo, conceptualmente hablando, las principales partes que componen a estos sistemas son: 1) la parte de adquisición de información, constituida principalmente por *sensores* 2) la parte de toma de decisiones y tratamiento de datos, compuesta por *controladores* y computadoras 3) la parte de actuación sobre el sistema, formada por los *actuadores*. Adicionalmente, podemos distinguir una parte adicional que se encarga de recibir las ordenes y transmitir de manera clara la información del proceso, la cual es la Interfaz Hombre-Máquina (HMI por sus siglas en inglés), y puede estar compuesta por luces, botones, pantallas y/o teclados [Escano, 2002].

Debido a la gran variedad de componentes de automatización que existe actualmente, resulta complejo decidirse por una opción de todas las existentes, por lo tanto, es necesario tener en claro las bases y el principio de funcionamiento de cada dispositivo, para que dicha información sea utilizada en conjunto con los requerimientos del cliente y el proceso, para el diseño del sistema de automatización [Ebel, 2008].

### 2.2.3. Controladores

Los controladores son elementos muy importantes para los sistemas de automatización, ya que estos se encargan de tomar las decisiones tomando como referencia lo registrado por los sensores, lo anterior con el objetivo de producir los cambios deseados en el proceso por medio del accionamiento de los actuadores [Ebel, 2008].

Cabe mencionar que su incorporación en el mundo de la automatización permitió la reducción del espacio y componentes utilizados en este tipo de sistemas, trayendo como consecuencia la disminución de los costos y actividades de mantenimiento. Además, gracias a sus capacidades tecnológicas, pueden ser implementados en diferentes procesos, incorporar cambios al diseño inicial de un sistema instalado, y permiten la comunicación entre la parte productiva y administrativa de una empresa, siempre y cuando se tengan las condiciones adecuadas [Lamb, 2013]. Cabe señalar que la norma IEC 61131 busca estandarizar estos dispositivos, cuyas secciones abordan características importantes de estos elementos, como aspectos generales, hardware, lenguajes de programación, guías de usuario y comunicación [Zapata, 2021].

### Control en lazo cerrado y control en lazo abierto

El control de un proceso consiste en la medición de las variables controladas, y la alteración de las variables manipuladas o señales de control. Respecto a las variables controladas, son aquellas

cantidades o condiciones cuyos valores nos interesa modificar; mientras que las variables manipuladas, se caracterizan por ser las cantidades o condiciones que variamos para reducir la diferencia de los valores medidos con los deseados. Dependiendo de como se relacionen dichas variables, podemos encontrar sistemas de control en lazo abierto, y sistemas de control en lazo cerrado [Ogata, 1998].

**Sistemas de control en lazo abierto:** Este tipo de sistemas se caracteriza porque las acciones de control no se ven afectadas por los valores medidos de la salida, esto quiere decir que las modificaciones realizadas a las variables manipuladas, no dependen de los valores registrados de las variables controladas. Un punto bastante desfavorable de este tipo de sistemas es que no cuentan con capacidad de reacción ante perturbaciones, por lo que su implementación requiere de un buen conocimiento de la relación que hay entre sus entradas y salidas; y la calidad de sus resultados, dependerá de la calibración del sistema y la uniformidad del proceso. Algunos ejemplos de estos sistemas son los que operan con una base de tiempo, como los semáforos de control de tráfico, cuyo comportamiento de las señales de control dependerá de las duraciones asignadas previamente [Ogata, 1998].

**Sistemas de control en lazo cerrado:** También llamados sistemas de control realimentados, reciben la señal de error de actuación, compuesta por la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, para reducir el error y llevar a las variables controladas a los valores deseados; cabe señalar que la señal de realimentación puede ser la señal de salida, o una función de esta y sus derivadas y/o integrales. Gracias a esta dinámica, los sistemas de control en lazo cerrado tienen capacidad de reacción ante perturbaciones externas y a las variaciones internas de los parámetros del sistema, por lo tanto, se pueden utilizar componentes baratos y de poca precisión para lograr un control adecuado [Ogata, 1998]. El control de la temperatura de agua en un acuario, o el control de velocidad de un vehículo, son aplicaciones de este tipo de sistemas [Ebel, 2008].

Vale la pena mencionar que a pesar de reaccionar ante perturbaciones externas, si no se realiza una correcta implementación, el control en lazo cerrado puede inestabilizar al sistema por la corrección en exceso de errores, lo cual generaría resultados no deseados, como oscilaciones de amplitud en las variables controladas. Adicionalmente, estos sistemas involucran mayores costos y consumos energéticos, ya que el número de componentes utilizados es mayor; por lo tanto, es importante analizar cuando es conveniente implementar cada tipo de sistema, debido a que el control en lazo abierto es ideal cuando existen dificultades en la medición de la salida, tienen una construcción simple, y no cuentan con problemas de estabilidad; sin embargo, hay que recalcar que no funcionan de manera adecuada ante perturbaciones, y dependen mucho de su calibración [Ogata, 1998].

### Partes principales y funcionamiento de un controlador

Normalmente, los principales componentes que integran a los controladores ocupados en la industria son [Zapata, 2021]:

- **Unidad Central de Procesamiento:** Esta se encarga de gestionar y manejar el funcionamiento del controlador, por lo tanto, ejecuta el programa almacenado en la memoria y se comunica con las entradas, salidas, y dispositivos conectados a través de los puertos de comunicación.
- **Memoria de datos:** Elemento que almacena la información relevante del proceso, como la lectura de las entradas, escritura de salidas, y resultados parciales de operaciones ejecutadas por el controlador.

- **Memoria de programa:** Componente que guarda el código del programa que rige el funcionamiento del controlador.
- **Entradas:** Proporcionan información del exterior al controlador comunicando el estado de los sensores, estas requieren de una conexión física con el elemento a medir, y pueden ser binarias o analógicas.
- **Salidas:** Están conectadas y comunicadas con los actuadores responsables de controlar o modificar una variable del proceso. De la misma manera que las entradas, estas pueden ser binarias o analógicas.
- **Puertos de comunicación:** El propósito de estos es comunicar al controlador con otros dispositivos para programarlo, monitorear el proceso, distribuir el control con otros dispositivos, etc.

Para que puedan realizar las tareas que le fueron programadas, dichos componentes tienen una secuencia de funcionamiento cíclica y repetitiva, compuesta por el siguiente orden de acciones [Zapata, 2021]:

1. Actualización de entradas: Esta acción consiste en la lectura de los datos encontrados en sus entradas, y la transferencia de dicha información a las memorias designadas para este propósito.
2. Ejecución de la lógica de funcionamiento: Aquí se realiza instrucción por instrucción la lógica programada, y se determinan los nuevos valores de las salidas de acuerdo a los cambios en las entradas registrados previamente.
3. Diagnóstico del estado del controlador y comunicaciones: En esta etapa se analiza el estado del controlador, y se atienden las solicitudes de información o instrucciones recibidas desde los puertos de comunicación.
4. Actualización de salidas: En esta parte se manda el estado deseado de las salidas del controlador a través de los registros destinados para tal propósito.

### Programación de un controlador y el algoritmo PID

Debido a que los controladores son un elemento esencial en el mundo de la automatización, su programación ha sido regulada por la norma IEC 61131-3 con el objetivo de realizar dicha tarea independiente de la marca o modelo del controlador, y así facilitar el entendimiento de los programas y su realización; por lo tanto, existen 5 lenguajes estándar que la mayoría de los fabricantes utilizan para la programación de sus dispositivos: dos son del tipo textual y tres del tipo gráfico [Zapata, 2021].

- *Diagrama de escalera (Ladder LD):* Consiste en la representación gráfica de la lógica cableada que se obtenía a partir de la interconexión de bobinas y contactos, lo cual se realizaba cuando los relevadores eran un parte fundamental para el control de sistemas. Para simular un circuito eléctrico, las bobinas, contactos, timers y otros elementos de programación, se ordenan en líneas horizontales llamadas peldaños, las cuales se dibujan entre dos líneas verticales conocidas como rieles [Lamb, 2013].

- *Diagrama de Bloques Funcionales (FBD)*: Para indicar el flujo de programa este tipo de lenguaje utiliza cajas y líneas conocidas como enlaces, de tal forma que el diagrama elaborado describe las relaciones que hay entre las variables de entrada y salida de los bloques o cajas del programa [Lamb, 2013].
- *Lenguaje de programación gráfica (GRAPH SFC)*: Está basado en el modelo de representación gráfica GRAFCET, y facilita la programación de tareas secuenciales de una gran variedad de sistemas, ya que permite visualizar con facilidad el orden y secuencia de la lógica del proceso [Zapata, 2021].
- *Lenguaje de texto estructurado (ST)*: Este es un lenguaje de texto de alto nivel basado en PASCAL, y se compone de sentencias separadas con signos de punto y coma. Puede ser utilizado para codificar expresiones complejas e instrucciones anidadas, también incluye estructuras para bucles (WHILE-DO, REPEAT-UNTIL), ejecución condicional, y funciones (SQRT, SIN, etc.) [Zapata, 2021].
- *Lista de Instrucciones (IL)*: Este es un lenguaje de texto de bajo nivel similar a los lenguajes de ensamblador, el cual consiste de muchas líneas de código que representan una operación, y se utilizan mnemotécnicos referidos, sin símbolos ni comentarios, para operaciones y direcciones; por su poca practicidad, está dejando de ser utilizado. [Lamb, 2013].

**Algoritmo PID** Este es un algoritmo ampliamente utilizado, que está presente como bloque de programación, función, o instrucción, en la mayoría de los lenguajes de programación regulados por la IEC 61131-3; lo anterior debido a que permite controlar satisfactoriamente sistemas de lazo cerrado sin la necesidad de contar con un modelo matemático que describa el proceso. Cabe recalcar que dichos sistemas se caracterizan por lograr el objetivo de control elaborando correcciones en los respectivos comandos, tomando como referencia el error, el cual se define como la diferencia entre la condición deseada o setpoint, y la condición actual, también llamada variable de proceso o salida [Bishop, 2002].

Vale la pena mencionar que los 3 términos que participan en el algoritmo PID para analizar y corregir los comandos de control son: 1) **Proporcional**, el cual representa la acción realizada por el controlador en proporción al error, por lo que la corrección será mayor, si la magnitud del error es mayor 2) **Integral**, relacionado con la acumulación de los errores pasados, es la integral del error a lo largo del tiempo, por lo tanto, entre mayor sea el tiempo que continúe el error, mayor será la corrección 3) **Derivativo**, asociado con la predicción de errores futuros, aquí la acción correctiva depende de la derivada o tasa de cambio que tiene el error con respecto al tiempo, lo cual implica que entre mayor sea el cambio, mayor será su corrección [Bishop, 2002].

Un paso importante en la implementación del control PID es la sintonización, la cual consiste en asignar valores a los términos que componen este algoritmo, dicha acción es relevante ya que una mala asignación puede producir inestabilidad o un control no óptimo. Es importante señalar que no existe un método absoluto que garantice dicha selección para todos los procesos industriales; no obstante, existen técnicas que pueden ayudar a dicha asignación, como el método de Zeigler-Nichols, Skogestad, o bien, los términos pueden ser asignados probando diferentes combinaciones de valores. [Lamb, 2013]

### Tipos de entradas y salidas

Los dos tipos de señales que los controladores pueden recibir (señales de entrada) o emitir (señales de salida) son: 1) *Señales digitales*, caracterizadas por ser de naturaleza binaria, solamente pueden

valer 1 o 0 (encendido o apagado respectivamente), y 2) *Señales analógicas*, cuyos valores están comprendidos dentro de un rango de voltaje o corriente [Lamb, 2013].

Respecto a las *entradas digitales*, los controladores cuentan con módulos tipo fuente (*sourcing*) en los que el sensor suministra la tensión adecuada para la activación de las entradas (ver Figura 2.7<sup>4</sup>), o tipo sumidero (*sinking*) en donde el módulo se encarga de suministrar la tensión (ver Figura 2.6<sup>5</sup>). Cabe señalar que los sensores pueden ser de 2 (ver Figura 2.8<sup>6</sup>) o 3 hilos, estos últimos incorporan transistores del tipo PNP o NPN, y se caracterizan porque dos de los hilos se utilizan para la alimentación del detector, y el tercero para la generación de la señal eléctrica que informa la detección. De acuerdo al estándar IEC - 61131-2, existen tres tipos de entradas digitales: [Escano, 2002]

- Tipo 1: Contactos de conmutación mecánicos (conexión de 2 cables) y sensores de semiconductor (solo conexión de 3 hilos).
- Tipo 2: Se caracterizan por tener mayor consumo de energía, ser más adecuados para módulos con baja densidad de canales, y solamente pueden conectarse sensores semiconductores a 2 hilos siguiendo las recomendaciones de la IEC-60947-5-2.
- Tipo 3: Esta alternativa se distingue por tener un consumo de energía reducido, su compatibilidad con los dispositivos IEC-60947-5-2 (con menor corriente en estado apagado), y por poder utilizar entradas de tipo 1 y 2.

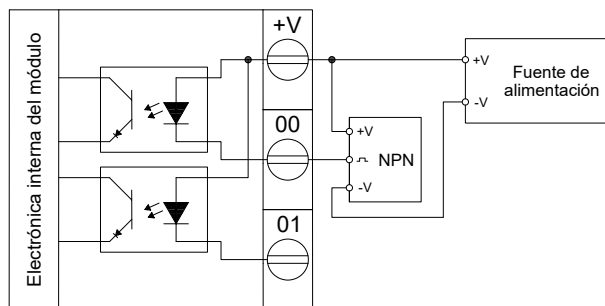


Figura 2.6 Entradas digitales tipo sinking

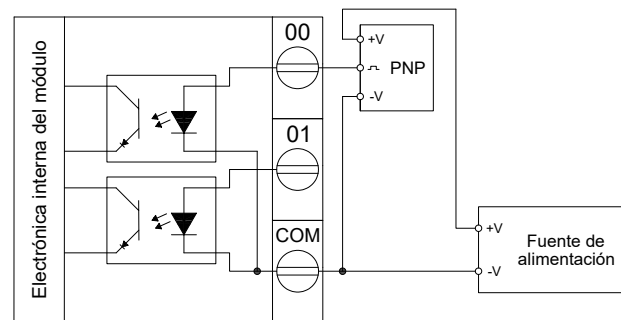


Figura 2.7 Entradas digitales tipo sourcing

En cuanto a los módulos de *salidas digitales*, generalmente no cuentan con la capacidad de suministrar la potencia requerida por los actuadores, por ende, es común conectarlos a elementos de preaccionamiento o preactuadores, los cuales cumplen una función de amplificación, y permiten aislar el sistema de control de los elementos de accionamiento. Vale la pena mencionar que suelen añadirse protecciones a estos módulos para maximizar su vida útil, las cuales se diseñan de acuerdo al tipo de corriente, intensidad, nivel de tensión y frecuencia de respuesta. En cuanto a los tipos de tecnología, los relés con contacto libre de potencial son dispositivos con una gran versatilidad de usos; sin embargo, por la vida útil de sus elementos mecánicos, no suelen ser utilizados para aplicaciones con gran frecuencia de accionamiento; en cambio, las salidas con elementos de estado sólido (semiconductores) como las salidas a transistor o las salidas a triac, suelen utilizarse en aplicaciones con gran frecuencia de maniobras [Escano, 2002].

Las *entradas analógicas* suelen componerse por un convertidor analógico-digital, en donde el número de bits utilizado en la conversión es de gran relevancia, ya que de este depende la resolución y

<sup>4</sup>Imágen tomada de [Escano, 2002]

<sup>5</sup>Imágen tomada de [Escano, 2002]

<sup>6</sup>Imágen tomada de [Escano, 2002]



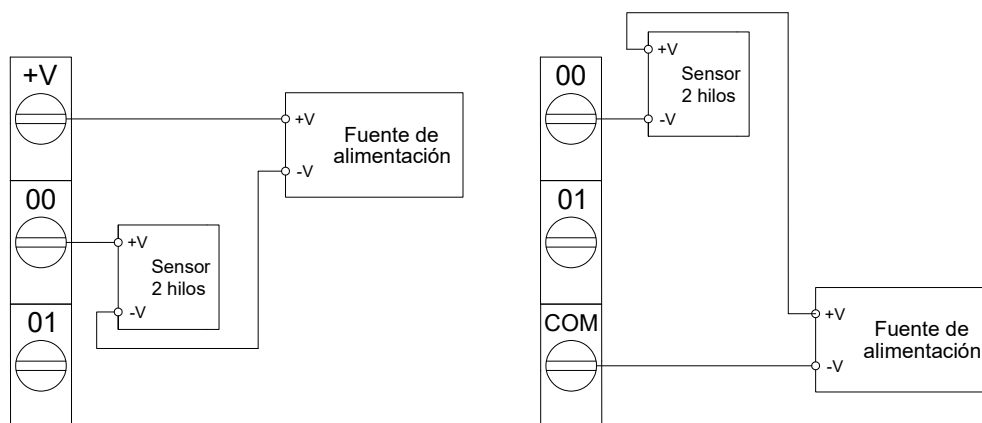


Figura 2.8 Entradas digitales de 2 hilos

precisión de la lectura. En la Tabla 2.1 se muestran los valores permitidos de voltaje y corriente que establece la norma IEC-60688 para las entradas y salidas analógicas [Escano, 2002].

Tabla 2.1 Valores de voltaje y corriente de las señales analógicas permitidos por la IEC-60688

Corriente	Voltaje
0 mA - 20 mA	0 V - 10 V (más ocupado)
0 mA - 1 mA	0 V - 1 V
-1 mA - 1 mA	-1 V - 1 V
-5 mA - 5 mA	-10 V - 10 V
-10 mA - 10 mA	
-20 mA - 20 mA	
4 mA - 20 mA (más ocupado)	

Finalmente, los módulos de *salidas analógicas* cuentan con un convertidor de señales digitales a analógicas, en donde la resolución y precisión de la conversión, también depende de su número de bits. Normalmente, este tipo de salidas suelen ser conectadas a las entradas analógicas de otros dispositivos preactuadores, ya que la actuación proporcional sobre sistemas de gran potencia involucraría la incorporación de amplificadores lineales de potencia, los cuales son muy caros. Cabe señalar que la técnica de modulación del ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) permite lograr un tipo de actuación proporcional sobre actuadores con gran demanda de potencia, la cual consiste en variar el tiempo de conexión de una salida digital dentro de un ciclo de conexión-desconexión fijado; dicha técnica solamente debe ser aplicada cuando la dinámica del sistema sea más lenta que la frecuencia del ciclo de conexión-desconexión [Escano, 2002].

#### 2.2.4. Sensores

Los sensores son una parte fundamental del sistema de automatización, pues de estos puede depender la fiabilidad del proceso, la seguridad del equipo y personal, la eficiencia operativa, entre otras cosas. El propósito de estos elementos es adquirir información y enviarla en un formato legible para el sistema de control. Su clasificación puede realizarse de acuerdo a su principio de operación

(ópticos, mecánicos, inductivos), la señal de salida (analógica, binaria, digital) o la variable medida (presencia de objetos, temperatura, desplazamiento, intensidad luminosa, etc.) [Ebel, 2008].

### Sensores de temperatura

Actualmente, existe una gran variedad de sensores temperatura, esto implica que su selección considere diversos factores como lo es su rango de medición, precisión, costo, tamaño, tiempo de respuesta, rangos de medición, linealidad, etcétera. Dependiendo de su naturaleza, estos pueden clasificarse de la siguiente forma [Lipták, 2003]:

- No eléctricos: Termómetros con líquido en vidrio, termómetros bimetalicos, sensores bi-estado o de cambio de fase, termómetros de llenado de sistema.
- Electrónicos: Termopares, pirómetros de radiación, termistores, detectores de resistencia de temperatura (RTD por sus siglas en inglés).

**Detectores de Resistencia de Temperatura (RTD).**- Los detectores de resistencia de temperatura están compuestos por un material resistivo con conductores unidos, el cual generalmente es colocado en una funda protectora, como lo muestra la Figura 2.9<sup>7</sup>. Estos sensores se caracterizan por variar su resistencia de acuerdo a la temperatura de manera proporcional, y su rango depende del material de fabricación, el cual puede ser de cobre (Cu), níquel (Ni) o platino (Pt) [RSPPro, 2021].

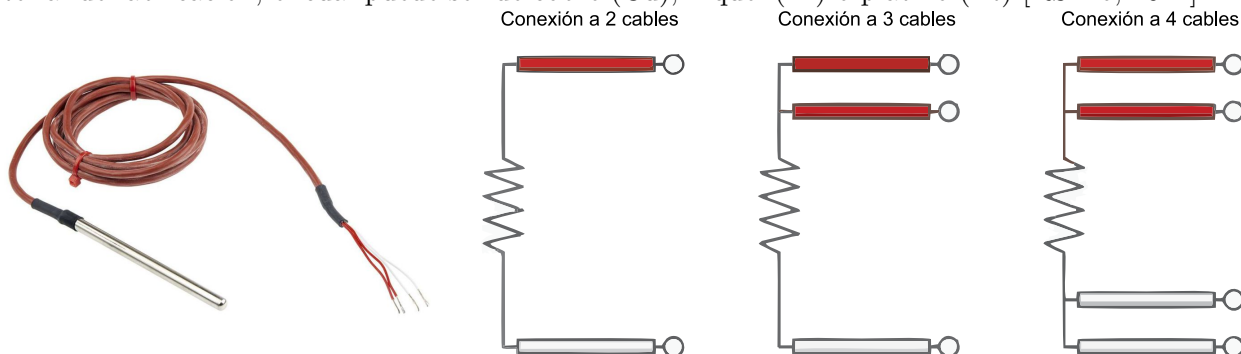


Figura 2.9 Ejemplo de un sensor RTD

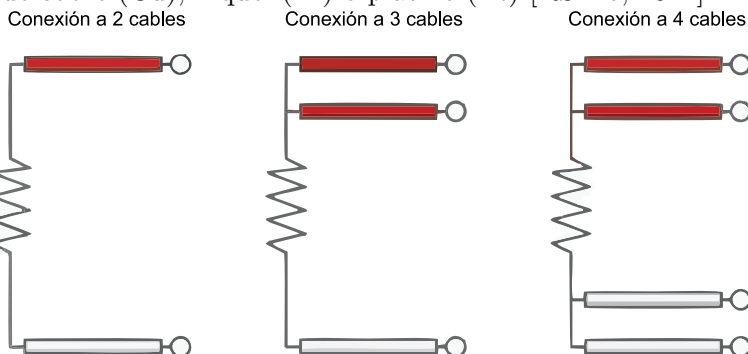


Figura 2.10 Alternativas de conexión de sensores RTD

Cabe señalar que la identificación del tipo de RTD consiste en mencionar la abreviación del material de fabricación (Cu, Ni o Pt) y el valor de su resistencia eléctrica en Ohms [ $\Omega$ ] a  $0^{\circ}\text{C}$ ; por ejemplo, cuando se hace mención de un RTD Pt100 o un RTD Pt1000, lo que se especifica es que ambos tienen platino como material resistivo; sin embargo, la resistencia del primero a  $0^{\circ}\text{C}$  es  $100\ [\Omega]$  y la del segundo de  $1000\ [\Omega]$ . Este último valor es importante porque repercute en el rango y precisión del sensor, ya que especifica la variación de la resistencia con la temperatura, es decir, en caso de tener un error de  $1\ [\Omega]$  en la medición, para el primero eso implicaría una imprecisión de  $1\ \text{a}\ 2\ [^{\circ}\text{C}]$ , mientras que para el segundo, significaría un error de  $0.1\ \text{a}\ 0.2\ [^{\circ}\text{C}]$  [JMIndustrial-Technology, 2023].

Debido a que estos sensores son de tipo resistivo, su medición puede verse afectada por la resistencia del cableado, por lo tanto, para mitigar dicho efecto, es común agregar 1 o 2 cables de compensación al momento de conectarlos (ver Figura 2.10<sup>8</sup>). Una conexión compuesta únicamente por dos conductores es ideal para escenarios donde la longitud del conexionado sea corta, y no sea necesaria una lectura precisa de temperatura. Respecto a la conexión de RTD con tres cables, logra compensar el efecto

<sup>7</sup> Imágen tomada de [RSPPro, 2021]

<sup>8</sup> Imágen tomada de [TC, 2023]

resistivo del cableado y es la más común en aplicaciones industriales; sin embargo, aquí se asume que la resistencia y condiciones ambientales de los tres cables es la misma. Finalmente, con una conexión de 4 cables se logra mejor exactitud, pues la compensación de este efecto resistivo es mayor que en las anteriores [RSPro, 2021].

### Sensores de proximidad

Los sensores de proximidad detectan la presencia de objetos sin tener algún tipo de contacto con estos, por lo tanto, tienen una larga vida útil y buena confiabilidad. Dependiendo de su principio de operación, encontramos los siguientes tipos [Ebel, 2008]:

- Sensores con interruptor de contacto mecánico: *Reed switches*
- Sensores con interruptor de salida electrónico: inductivos, ópticos y capacitivos

Este tipo de sensores principalmente se encuentran en aplicaciones de inspección y control de la posición de herramienta de maquinaria, sistemas de manufactura, o en componentes móviles de válvulas y amortiguadores [Lipták, 2003].

**Sensores de proximidad inductivos.-** El principio de funcionamiento de estos sensores (ver Figura 2.11<sup>9</sup>) consiste en la generación de un campo magnético alternante de alta frecuencia, por medio de un circuito resonante; dicho campo solamente se produce cuando se aplica un determinado voltaje en las terminales del sensor, y es emitido por la parte frontal de estos, como lo muestra la Figura 2.12<sup>10</sup>. Cuando un conductor eléctrico se mueve dentro del campo magnético, se producirá una corriente de Foucault, lo cual producirá una caída de voltaje en el circuito resonante. Esta caída de voltaje es detectada por un circuito compuesto de un flip-flop y un amplificador, los cuales son los encargados de evaluar el comportamiento del circuito resonante y emitir la salida del tipo On/Off correspondiente [Ebel, 2008].



Figura 2.11 Ejemplo de sensor inductivo

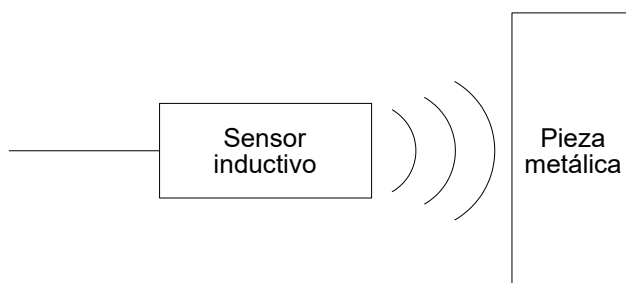


Figura 2.12 Funcionamiento de un sensor inductivo

### 2.2.5. Actuadores

Los actuadores son los elementos del sistema de automatización que reciben la señal de control, y producen un cambio físico en el proceso por la generación de alguna fuerza, movimiento, calor, etcétera. Estos pueden clasificarse de acuerdo al tipo de energía con la que trabajan (eléctricos, electromecánicos,

<sup>9</sup>Imágen tomada de [Ingecom-Eléctricos, 2023]

<sup>10</sup>Imágen tomada de [Ebel, 2008]

electromagnéticos, hidráulicos, neumáticos), o bien por su número de salidas de estado estable (binarios o continuos) [Bishop, 2002].

## Relevadores

El propósito de estos actuadores es conectar o desconectar algún circuito cuando alguna señal eléctrica de baja energía se lo indique; principalmente se utilizan para encender o apagar dispositivos como válvulas o elementos de calentamiento [Lamb, 2013]; sin embargo, su implementación también permite multiplicar, retrasar o convertir señales eléctricas, enlazar información, o separar los circuitos de corriente directa con los de alterna, es decir, los circuitos de control con los de alimentación [Ebel, 2008].

**Relevadores electromecánicos.-** Este tipo de relevadores se caracteriza por ocupar una bobina electromagnética para jalar físicamente un conjunto de contactos, los cuales interrumpen o establecen un flujo de corriente al cambiar de una posición abierta a una cerrada, o viceversa. Cabe mencionar que dependiendo del estado de los contactos cuando la bobina está desenergizada, estos se especifican como normalmente abiertos (NO) o normalmente cerrados (NC) [Lamb, 2013].

El principio de funcionamiento de los relevadores electromecánicos consiste en generar un campo electromagnético mediante la aplicación de un voltaje de corriente directa, o alterna, a su bobina solenoide, esto producirá una fuerza de atracción hacia la bobina en el elemento metálico del contactor, cuyo movimiento cambiará la posición de los contactos, los cuales dependiendo de su arreglo, interrumpirán o establecerán el flujo de corriente en las terminales del relevador. Cuando la bobina sea desenergizada, un resorte se encargará de regresar al elemento metálico a su posición inicial [Ebel, 2008].

**Relevadores de estado sólido.-** Los relevadores de estado sólido se distinguen por la implementación de transistores para cambiar el flujo de corriente, lo cual elimina las partes móviles en su diseño y maximiza su vida útil; sin embargo, su capacidad interruptiva de corriente es menor comparada con la de los relevadores electromecánicos [Lamb, 2013] .

**Contactores.-** Los contactores son un tipo de relevadores electromecánicos diseñados específicamente para manejar grandes corrientes; el estándar IEC 60947 establece las categorías operativas que clasifican los escenarios en que pueden ser utilizados estos dispositivos, de acuerdo a las corrientes, voltajes, el factor de potencia de la carga, y de ser necesario, otras condiciones de servicio a las cuales estará sometido el contactor [Schneider-Electric, 2008].

Vale la pena mencionar que las bobinas de los contactores alimentadas con corriente alterna, presentan una elevada corriente de arranque, ya que en este lapso la impedancia de la bobina es baja, y la brecha de aire es mayor, lo cual produce una gran reluctancia en el circuito magnético asociado. Cuando el contactor está en posición de cierre, el circuito magnético cerrado tiene una baja reluctancia que determina el incremento en la impedancia de la bobina, produciendo que la demanda de corriente en esta etapa sea de 6 a 10 veces menor que la del valor de arranque. Respecto a las bobinas con suministro de corriente directa, requieren de un dispositivo que reduzca su consumo de corriente, el cual suele ser un resistor; sin embargo, últimamente algunos fabricantes de contactores han incluido electroimanes en sus dispositivos para reducir su consumo de corriente, y permitir su conexión directa a controladores industriales [Schneider-Electric, 2008].

Identificar la categoría operativa del contactor es el primer paso para la selección del modelo a utilizar, pues aquí se considera el tipo de carga (motores de jaula de ardilla, resistencias), las

Tabla 2.2 Ejemplos de categorías operativas establecidas por la IEC-60947

Tipo de corriente	Categoría operativa	Usos
Corriente Alterna	AC - 1	- Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, resistencias de hornos, distribución de potencia (luces, generadores, etc.)
	AC - 2	- Arranque y frenado de motores de escobillas instalados en equipamiento de uso pesado
	AC - 3	- Arranque y desconexión de motores de jaula de ardilla utilizados en equipamiento de uso pesado
	AC - 4	- Arranque, conexión y avance lento de motores de jaula de ardilla implementados en equipamiento de uso pesado
Corriente Directa	DC - 1	- Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, resistencias de hornos
	DC - 3	- Arranque, cambio de giro, avance lento y ruptura contra corriente de motores con devanados en paralelo
	DC - 5	- Arranque, cambio de giro, avance lento y ruptura contra corriente de motores con devanados en serie

corrientes de conexión y desconexión, y las condiciones operativas en las que la apertura y cierre toma lugar (motor operando, motor frenado, motor arrancando, etc.); sin embargo, también hay que tomar en cuenta factores como las condiciones climáticas (temperatura, humedad), localización geográfica (proximidad al mar, latitud, etc.), y la ubicación de instalación (lugares que dificulten su mantenimiento, atmósferas explosivas, entre otros); es por esto que resulta importante tomar una decisión informada para que la elección satisfaga todos los requerimientos operativos [Schneider-Electric, 2008].

### Motores eléctricos

Un motor eléctrico es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica rotatoria, dicha conversión es posible por la fuerza mecánica que experimentan los conductores portadores de corriente al colocarlos en un campo magnético. Estas máquinas se componen principalmente de su parte móvil (rotor) y su parte estática (estator), ambas tendrán diferentes diseños dependiendo del modelo del motor [Lamb, 2013].

Actualmente, existe una amplia variedad de motores eléctricos, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a su tipo de alimentación (corriente directa o alterna), su número de fases (trifásicos, bifásicos, monofásicos), su velocidad (síncronos o asíncronos), etcétera [Schneider-Electric, 2008]. Lo anterior implica que se tomen en cuenta diversos factores en la selección de un motor, no obstante, primero debe asegurarse que el motor seleccionado sea capaz de cubrir los requisitos de potencia que demanda la carga impulsada, ya que el torque disponible debe de ser suficiente para superar la fricción estática, acelerar la carga hasta la velocidad operativa, y manejar la sobrecarga máxima.

Cabe aclarar que la velocidad operativa esta dada por el punto en donde el torque suministrado este balanceado con los requerimientos de torque de la carga, por lo tanto, una buena elección de motor es aquella que considera las características torque-velocidad del motor (las cuales son especificadas por el fabricante) y de la carga (las cuales son complicadas de determinar) [Bishop, 2002].

**Motores jaula de ardilla.-** Este tipo de motor es del tipo asíncrono de inducción, caracterizado porque el núcleo de su rotor esta laminado, y sus conductores consisten de barras sin aislar de cobre, o aluminio, conducidas a través da las ranuras del rotor, como lo muestra la Figura 2.13<sup>11</sup>. Dichas barras están soldadas en sus extremos a placas o anillos para producir un conjunto de conductores en cortocircuito. Si las bobinas de su estator son alimentadas con corrientes trifásicas, se producirá un campo magnético rotatorio, el cual inducirá un voltaje en los devanados del rotor, propiciando una circulación de corrientes por sus conductores cortocircuitados, ante la presencia del campo magnético rotatorio, dichos conductores experimentarán una fuerza que provocará la aceleración del rotor [Bishop, 2002].

Este tipo de motores se utiliza en gran parte de la industria por las siguientes razones [Schneider-Electric, 2008]:

1. Bajo costo de producción.
2. Sellado de motor estándar.
3. Fácil de arrancar en línea directa.
4. Control de velocidad fácil y con muy buen rendimiento.
5. Soluciones de control de velocidad cada vez más costo-efectivas.
6. Uso industrial universal

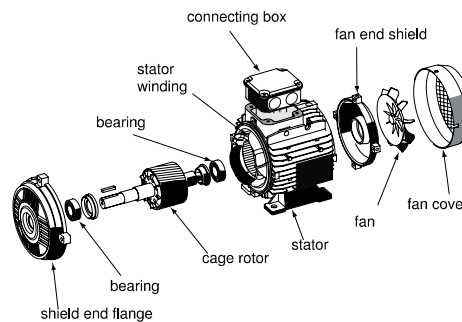


Figura 2.13 Estructura de un motor jaula de ardilla

### 2.3. Seguridad operacional

Debido a que diversos estudios han demostrado que 66.67% de los incidentes industriales se deben a un mal diseño de maquinaria [Schneider-Electric, 2008], la seguridad debe ser un aspecto presente a lo largo su ciclo de vida, desde la fase de diseño, hasta el desmantelamiento de la misma, priorizando siempre la protección del personal operativo sobre la protección o funcionalidad de la misma maquinaria. [Lamb, 2013]

Si el diseño y operación de una máquina se realiza dentro de los estándares de seguridad adecuados, se obtienen beneficios como un aumento en la productividad debido a la disminución de: tiempos de retraso, lesiones físicas en operadores, y pérdidas de producción; además, se reducen daños en el equipo, costos de mantenimiento, y en ocasiones la necesidad de contratación de primas de seguros. Un paso importante para lograr dichos beneficios es la identificación de las causas de accidentes en el lugar de trabajo, en la Tabla 2.3 se muestran algunos factores con ejemplos que propician la ocurrencia de este tipo de sucesos. [Schneider-Electric, 2008]

Cabe recalcar que no basta con identificar las causas que propician este tipo de accidentes, también es necesario tomar acciones complementarias como el análisis e identificación de peligros y riesgos,

<sup>11</sup>Imágen tomada de [Schneider-Electric, 2008]

Tabla 2.3 Factores con ejemplos de causas de accidentes en el lugar de trabajo

<b>Relacionados con el humano</b>	<b>Relacionados con la máquina</b>	<b>Relacionados con la planta</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poca comprensión del diseño de la máquina</li> <li>- Falta de seriedad ante situaciones riesgosas</li> <li>- Ignorancia de las medidas de seguridad</li> <li>- Incumplimiento en los procedimientos</li> <li>- Mala capacitación y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protecciones inadecuadas</li> <li>- Sistemas de control y supervisión complejos</li> <li>- Peligros inherentes de la máquina</li> <li>- Máquinas no adecuadas para la aplicación o entorno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimiento de personal</li> <li>- Maquinaria de diferentes proveedores y tecnologías</li> <li>- Flujo de materiales entre máquinas</li> </ul>

la modificación e instalación de componentes de hardware, como la inclusión de protecciones físicas, paros de emergencia, protecciones contra sobretensión, cortocircuito y sobrecarga, y el diseño de software que permita disminuir los riesgos y peligros en el entorno de trabajo [Schneider-Electric, 2008].

### 2.3.1. Análisis e identificación de peligros y riesgos

De acuerdo con la norma ANSI/RIA R15.06-1999, un peligro es una fuente potencial de daño, y un riesgo es la combinación de la probabilidad y el grado de posibles lesiones o daños a la salud en situaciones peligrosas. La comprensión de estos conceptos es muy importante, ya que son la base para elaborar las medidas de seguridad apropiadas que permitirán reducir el número de accidentes de trabajo [ANSI, 1999]. La Tabla 2.4 muestra una clasificación de los peligros inherentes de una máquina con sus riesgos asociados.

Tabla 2.4 Clasificación de los peligros inherentes de una máquina y sus riesgos asociados

<b>Peligros mecánicos</b> (máquinas en movimiento, superficies filosas, prensado de material)	<b>Peligros eléctricos</b> (cables pelados o mal aislados, altos niveles de tensión)	<b>Peligros fisicoquímicos</b> (tuberías o recipientes con sustancias peligrosas, superficies calientes)
Fracturas Cortes Aplastamiento Golpes	Electrocución Choques eléctricos	Quemaduras Salpicadura de sustancias peligrosas

### 2.3.2. Protecciones físicas

La instalación de protecciones físicas es una de las medidas más simples de seguridad, su propósito es aislar el peligro del operador con la colocación de una cobertura o barrera física, en una posición y orientación que permita lograr dicho objetivo. Dependiendo de la aplicación, es recomendable que estas protecciones sean removidas con herramienta, o bien, que incorporen interruptores de seguridad con mecanismos de bloqueo, los cuales serán removidos si determinadas condiciones operativas se

cumplen. Por último, se recomienda incluir advertencias y símbolos estandarizados que informen la presencia de los peligros del proceso [Lamb, 2013].

### 2.3.3. Paros de emergencia

Existen tres categorías para clasificar los diferentes tipos de paro que puede tener una máquina [Lamb, 2013]:

- **Categoría 0:** Los paros de esta categoría ocurren de manera inmediata, ya que se remueve la alimentación eléctrica de los actuadores de la máquina.
- **Categoría 1:** Estos tienen la característica de realizarse de manera controlada, ya que existe un suministro de potencia eléctrica el cual es dirigido a los actuadores para lograr las condiciones de paro, posteriormente, cuando se haya logrado el objetivo, se retira dicho suministro.
- **Categoría 2:** Nuevamente los paros de este tipo son controlados; sin embargo, a diferencia de los anteriores, estos ocurren cuando la máquina deja de recibir energía, por lo tanto, la potencia restante se administra entre los actuadores para lograr las condiciones de paro deseadas.

Cabe mencionar que existen botones diseñados específicamente para efectuar un paro de emergencia, los cuales tienen la particularidad de permitirle al operador detener el equipo lo más rápido posible ante una falla. Normalmente, estos se conectan en serie con un circuito de control o pieza de equipamiento (como un relevador de retención) para que al accionarlo el circuito sea desenergizado [Lamb, 2013].

### 2.3.4. Protecciones contra sobrettemperatura

Para asegurar la protección del producto y un correcto funcionamiento de diversos elementos electrónicos y mecánicos, se recomienda incluir en el sistema de control protecciones contra sobrettemperatura, ya que las altas temperaturas propician la ocurrencia de fallas en algunos dispositivos, la reducción de su vida útil, o incluso lleguen a provocar algún incendio. Actualmente, los componentes más utilizados para dicho propósito son [Bishop, 2002]:

- *Interruptores térmicos:* Estos son dispositivos del tipo encendido-apagado, cuyo grado de complejidad es variable, ya que hay diseños completamente electrónicos con diversas funcionalidades, o bien, diseños electromecánicos cuyo propósito es energizar o desenergizar circuitos eléctricos dependiendo de la temperatura registrada. Cabe mencionar que este último tipo de diseño suele incorporar elementos sensitivos elásticos, incluyendo bulbos rellenos y elementos bimetálicos; además, son utilizados como elementos de protección en hornos y controles locales de ventiladores. Adicionalmente, dependiendo del modelo, la temperatura de accionamiento puede ser ajustada.
- *Termostatos:* Estos se caracterizan porque pueden funcionar como un controlador de tipo proporcional, o como un interruptor de encendido-apagado con una banda de tolerancia. Normalmente se utilizan para controlar la temperatura de espacios cerrados, y su diseño puede ser eléctrico-electrónico, neumático o electromecánico. Vale la pena agregar que existen termostatos de dos posiciones cuya principal diferencia con un interruptor térmico es el elemento sensitivo, ya que los termostatos se caracterizan por incorporar resortes bimetálicos.



### 2.3.5. Protecciones contra cortocircuito y sobrecarga

Un **cortocircuito** es un contacto directo entre dos puntos que tienen diferentes potenciales eléctricos, lo cual produce un gran incremento en la demanda de corriente en un lapso de tiempo muy corto. Este evento puede traer consecuencias graves al sistema, ya que ocurren fenómenos térmicos y eléctricos que pueden generar deformación en los conductores, fuego en la instalación, arcos eléctricos, calcinación del equipo aislante, etcétera. [Schneider-Electric, 2008]

En corriente alterna, un corto circuito se puede producir cuando el contacto se presenta entre fases, fase y neutro, fase y tierra conductiva, o entre vueltas de la misma fase; mientras que en corriente directa, ocurre entre dos polaridades, o entre tierra conductiva y la polaridad aislada de ella. Respecto a sus causas, las más comunes son: deterioro en el aislante del conductor, cables o alambres flojos, rotos o pelados, presencia de depósitos conductivos (polvo, humedad, etc.) o cuerpos metálicos externos, penetración de agua u otros líquidos conductivos, deterioro en la carga, o errores en el cableado durante el arranque u operación del sistema. [Schneider-Electric, 2008]

Los dispositivos de protección contra cortocircuitos más comunes son:

- **Fusibles:** Están diseñados para fundirse o quemarse cuando un exceso de corriente circula a través de ellos, por lo tanto, deben de ser reemplazados cuando esto ocurre [Lamb, 2013].
- **Disyuntores magnéticos:** Estos interrumpen automáticamente el circuito al abrir sus polos de conexión por medio de un mecanismo magnético, el cual se activa cuando se presenta un exceso de corriente. Dichos polos pueden volverse a cerrar mecánicamente para regresar al circuito a un estado operativo [Schneider-Electric, 2008].

Cabe señalar que los fusibles son menos costosos y tienen mayor velocidad de respuesta en comparación con los disyuntores magnéticos; sin embargo, el hecho de que tengan que ser reemplazados cada vez que realizan su función, propicia a que no sean implementados en ciertos escenarios [Lamb, 2013].

Respecto a la **sobrecarga**, es un evento que normalmente ocurre en motores, el cual se caracteriza por un incremento en su demanda de corriente y temperatura operativa. Las consecuencias de este fenómeno no son inmediatas, por lo tanto, no siempre es necesario apagar inmediatamente el motor; sin embargo, es importante regresar a las condiciones nominales operativas, pues la vida útil puede reducirse por dicha condición. En cuanto a los dispositivos que brindan protección ante este tipo de falla, tenemos los siguientes [Schneider-Electric, 2008]:

1. **Relés de sobrecarga térmicos con láminas bimetálicas:** Su principio de operación está basado en la deformación de sus láminas bimetálicas, las cuales son calentadas por la corriente que fluye a través de ellas, y según su configuración, interrumpirán el flujo de corriente del circuito dependiendo de su valor.
2. **Relés de sobrecarga electrónicos:** Estos relevadores utilizan electrónica para crear una imagen térmica del motor, basándose de un modelo que reproduce sus constantes térmicas de tiempo; además, tiene a la temperatura del motor como función de su flujo de corriente y de los tiempos de operación registrados.
3. **Relés de sonda de termistor PTC:** Su funcionamiento se caracteriza por monitorear directamente la temperatura del motor, y se componen de un dispositivo electrónico encargado de medir las lecturas de una o más sondas de temperatura PTC instaladas. Dependiendo del

arreglo que se tenga, el dispositivo puede notificar la sobretensión sin parar la máquina, o bien, detener el proceso.

4. **Relés de sobretorque:** A diferencia de los demás relevadores, estos no cuentan con una memoria térmica; sin embargo, tienen características operativas de tiempo definidas (retardo de tiempo ajustable y umbral actual), las cuales ayudan a proteger al sistema en caso de estancamientos del rotor o tirones mecánicos.
5. **Relés de multifunción:** Este tipo de relevadores combinan diferentes tecnologías para determinar las condiciones de sobrecarga, y actuar de acuerdo a su diseño y configuración.

### Disyuntores termomagnéticos

Estos elementos combinan los mecanismos de los disyuntores magnéticos y los relés de sobrecarga térmicos para interrumpir rápidamente el flujo de corriente ante una sobrecarga o cortocircuito [Schneider-Electric, 2008], por lo tanto, cuentan con láminas bimetálicas para detectar condiciones prolongadas de sobrecorriente, y un circuito magnético para responder ante grandes sobretensiones (ver Figura 2.14<sup>12</sup>), como las que ocurren en un cortocircuito [Lamb, 2013].

Normalmente, su parte magnética tiene un rango no ajustable de corte o disparo que puede ser 10 veces mayor a la corriente de disparo de la protección térmica. Cabe señalar que sus componentes térmicos toleran fluctuaciones de la temperatura del ambiente, y su rango de disparo puede ser ajustado, el cual debe de corresponder con la corriente nominal de la carga conectada. Adicionalmente, estos dispositivos se caracterizan por su curva de disparo, la cual muestra en el eje Y el tiempo que tardaría el dispositivo en accionarse para los valores de corriente del eje X; dichas curvas tienen 4 zonas de operación [Schneider-Electric, 2008]:

---

<sup>12</sup>Imágen tomada de [Schneider-Electric, 2008]

- Zona operativa normal: En dicha zona la corriente operativa es menor a la corriente de disparo de la protección térmica, por lo tanto, el disyuntor no abre el circuito.
- Zona de sobrecarga térmica: El disparo depende de la protección térmica, por lo tanto, entre mayor sea la sobrecarga, menor será el tiempo de disparo.
- Zona de corriente fuerte: Aquí el accionamiento del disyuntor depende del mecanismo magnético instantáneo, cuya operación suele ser menor a 5 milisegundos.
- Zona de accionamiento magnética retardada: En algunos dispositivos se agrega una zona intermedia monitoreada por un accionamiento magnético retardado, el cual previene disparos indeseados en aplicaciones con grandes picos de corriente, como ocurre en el arranque de un motor.

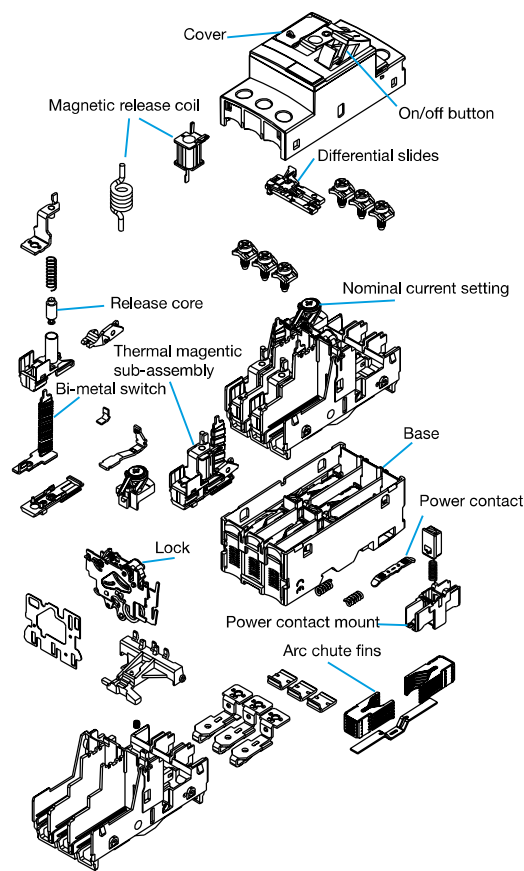


Figura 2.14 Estructura de un disyuntor termomagnético

### 2.3.6. Conexiones a tierra

Por motivos de seguridad, toda instalación eléctrica debe contar con una conexión metálica no portadora de corriente a tierra, la cual debe conectarse con todas las superficies metálicas expuestas, que puedan ser conectadas a un circuito eléctrico por alguna falla debida a un cable flojo o con mal aislamiento [Lipták, 2003].

Estas conexiones son importantes, ya que permiten que un contacto entre un suministro eléctrico que tenga un lado aterrizado, y una superficie metálica que tenga un propósito estructural, o uno diferente a la conducción de corriente, genere una corriente cuya magnitud sea suficiente para activar una protección contra cortocircuito. Además, ayuda a reducir las posibilidades de sufrir un choque eléctrico, debido a que el camino de baja resistencia que ofrecen estas conexiones permite mantener a todas las superficies expuestas a un potencial casi nulo. Gracias a lo anterior, esta medida es efectiva ante las corrientes de fuga, pues permite su conducción a tierra sin desarrollar un potencial significativo en las partes metálicas expuestas [Lipták, 2003].

### 2.3.7. Mecanismos de protección en el software del sistema

Además de adoptar medidas de seguridad relacionadas con el hardware del sistema, también es importante asegurarse que el software cumpla con los estándares de protección adecuados, por lo tanto, es necesario que personal capacitado en el lenguaje de programación identifique los peligros que podrían ser causados o evitados con la programación de los dispositivos de control del sistema. Vale

la pena mencionar que la norma IEEE STD 1228 1994, Planes de Seguridad de Software, describe algunas buenas prácticas para realizar dicho proceso [Lamb, 2013].

Una medida común de seguridad en el desarrollo de software es la adición de alarmas o fallas de máquina que se activan cuando los dispositivos de seguridad están accionados o en condiciones inadecuadas. Estas suelen detener inmediatamente el proceso o pausar el ciclo, y desactivar los actuadores para proteger al personal, componentes de hardware de la máquina o el producto. Adicionalmente, existen plantillas y estándares de programación que permiten estructurar los programas de tal forma que las condiciones sean autocontroladas, por ejemplo, el asegurarse que los sensores de contracción y expulsión no se puedan activar al mismo tiempo. Por último, suelen diseñarse rutinas que verifican si el equipo necesita mantenimiento o reparaciones [Lamb, 2013].

## Capítulo 3

# Definición del Problema

Para fabricar cierto tipo de productos de una determinada empresa, es necesario que estos sean calentados y conservados a temperaturas superiores a las del ambiente, por una cantidad determinada de tiempo; ya que dichas condiciones propician la realización de ciertos procesos físicos que le brindan al producto las propiedades estipuladas en los estándares de calidad de la compañía.

El proceso contaba con 5 hornos eléctricos de calentamiento indirecto por resistencia para realizar la acción anterior; sin embargo, después de analizar la cadena productiva, y las ventas en conjunto con sus proyecciones, se determinó viable ampliar la capacidad de horneado.

Al momento de investigar y cotizar hornos industriales con los proveedores de tecnología, se encontraron hechos desfavorables para su adquisición, ya que se detectaron precios elevados, tiempos de entrega excesivamente largos, insuficiencias funcionales en los modelos existentes, y poca flexibilidad de los proveedores hacia los requerimientos especiales de diseño.

Debido a las situaciones anteriores, la dirección de la empresa optó por asignarle al departamento de mantenimiento, con experiencia en proyectos de diseño de maquinaria, el diseño y construcción de un horno industrial que cumpliera con los requisitos funcionales y de producción, tomando como referencia la infraestructura instalada, y solucionando las siguientes cuestiones que esta tenía:

1. Control deficiente de temperatura.
2. Puesta en marcha y operación compleja.
3. Ausencia de parámetros importantes en el registro histórico, como parámetros de identificación del ciclo de horneado, temperatura utilizada para el control, y el estado de activación de actuadores.
4. Ausencia de alarmas que notifiquen condiciones de sobretemperatura o deficiencias en el calentamiento.
5. Dificultad para adquirir piezas de refaccionamiento.
6. Ausencia de alarmas que notifiquen fallas en los componentes del horno.
7. Deficiencias en los mecanismos de seguridad relacionados con la protección de sobretemperatura.

Vale la pena mencionar que al momento de asumir la responsabilidad del proyecto, el departamento estaba compuesto por dos ingenieros y tres técnicos: dos especializados en labores mecánicas, y uno en eléctricas-electrónicas.

### 3.1. Contexto de la participación profesional

Para abordar este proyecto, las responsabilidades asignadas a cada integrante del departamento se muestran la Tabla 3.1; sin embargo, debido a la carga habitual de trabajo de los miembros del equipo, se determinó necesaria la contratación de personal externo para la construcción de la estructura del horno, y la instalación del cableado de alimentación eléctrica en el sitio asignado de la planta.

Adicionalmente, se solicitó la contratación de un ingeniero cuya responsabilidad principal fuera el diseño y documentación del sistema de control del horno. Esta última vacante fue a la que ingresé, y dicha labor requirió de la ejecución de tareas como la búsqueda de controladores, contactores, y otros componentes de automatización, diseño de la instalación eléctrica de control, programación del controlador, y otras actividades que vienen descritas a detalle en la sección de metodología de resultados.

#### 3.1.1. Otras actividades

Además de las tareas relacionadas con el diseño del horno, también fui asignado a participar en las siguientes actividades durante el tiempo que trabajé para esta empresa:

- ***Apoyo en procedimientos de mantenimiento correctivo:*** Debido a las múltiples responsabilidades del personal de mantenimiento, en ocasiones tenía que darle seguimiento a ciertas fallas de maquinaria, las cuales se caracterizaban por ser poco comunes, por lo tanto, el tiempo invertido para elaborar un diagnóstico y una solución era mayor. Ante dicha situación, con el objetivo de identificar el origen de la falla, y formular la corrección para restablecer el correcto funcionamiento de la máquina, realicé las siguientes actividades:
  - Lectura de manuales de operación de la máquina y componentes de la misma
  - Pláticas con personal operativo y de mantenimiento acerca del manejo de la máquina
  - Ejecución de pruebas y evaluación del mal funcionamiento
  - Revisión y análisis de diagramas eléctricos, neumáticos e hidráulicos de la máquina
  - Búsqueda, cotización y selección de refacciones
  
- ***Análisis del impacto que tendría la instalación de un sistema fotovoltaico en la nave industrial:*** Gracias al interés por parte del jefe de planta de instalar un sistema fotovoltaico en el techo de la nave industrial, se me solicitó evaluar a detalle el impacto y las consideraciones a tener en cuenta para llevar a cabo dicha instalación; para efectuar esta labor, ejecuté las siguientes acciones:
  - Estudio de la tarifa eléctrica "Gran Demanda en Media Tensión Horaria"(GDMTH) y elaboración de hoja de cálculo que permita la estimación del monto a pagar bajo este esquema
  - Análisis del consumo y demanda de energía de la empresa
  - Revisión de marco legal relacionado con la instalación de paneles solares
  - Aprendizaje y uso de software online enfocado en la simulación de los resultados que tendría la instalación de un sistema fotovoltaico, con ubicación y características técnicas definidas por el usuario

- Evaluación detallada del impacto económico que tendría la capacidad del sistema fotovoltaico sobre el recibo de luz de la compañía
  - Búsqueda, contacto con proveedores de servicios fotovoltaicos, y comparativa de sus propuestas de proyecto
- ***Modificación de programa de maquinaria instalada para conteo de producto:*** Para la compañía llevar un control de sus unidades producidas es una acción fundamental, por lo tanto, el conteo de producto es una actividad rutinaria. En cierta gama de productos esta actividad se realizaba de manera manual, ya que las máquinas instaladas no contaban con esta función; ante dicha situación, con el objetivo de facilitar esta tarea, el jefe de mantenimiento me encargó modificar el programa de las máquinas involucradas para automatizar este proceso, lo cual realicé siguiendo los pasos de a continuación:
- Análisis de la instalación eléctrica de la máquina
  - Digitalización del diagrama eléctrico e incorporación de modificaciones no documentadas
  - Identificación del proceso y condiciones que garanticen una cuenta correcta, sin falsos positivos ni negativos
  - Modificación del programa grabado en el controlador lógico programable de la máquina
  - Pruebas para validar el correcto funcionamiento de las modificaciones de programa realizadas
- ***Rediseño del sistema de control de un horno instalado:*** A causa de los buenos resultados que logró el horno diseñado por el departamento de mantenimiento, se me asignó la tarea de plantear un nuevo diseño para el sistema de control de un horno instalado, el cual debía incorporar todas las funciones del nuevo horno, sin desaprovechar la infraestructura existente. Las actividades ejecutadas para realizar dicha tarea se mencionan a continuación:
- Evaluación de componentes instalados y selección de los que serían reutilizados y desechados
  - Elaboración de diagrama eléctrico con los cambios realizados
  - Elaboración de listado de material y actividades necesarias para efectuar las modificaciones

Cabe aclarar que este nuevo diseño no se instaló por falta de presupuesto y tiempo del personal.

- ***Apoyo en instalación y documentación de un sistema que supervisa el estado operativo de maquinaria:*** Debido a la naturaleza de ciertas tareas, la compañía contaba con máquinas cuya electrónica era muy sencilla, por lo tanto, para monitorear su estado operativo, era necesario instalar un sistema con la capacidad de acoplarse a la instalación eléctrica de la máquina, y que pudiera transmitir la información deseada. Ya que dicha labor requería mucho tiempo, apoyé al técnico encargado de instalar este sistema realizando las siguientes actividades:
- Evaluación de las condiciones de los gabinetes de control, y ejecución de las modificaciones necesarias para la instalación
  - Tareas manuales como el barrenado de superficies, armado y conexión de botoneras, etcétera
  - Correcciones y digitalización del diagrama eléctrico del sistema de monitoreo
  - Configuración e instalación de los dispositivos involucrados en el gabinete de control de la máquina

Tabla 3.1 Responsabilidades de cada integrante del departamento de mantenimiento relacionadas con el diseño y construcción del nuevo horno

Integrante	Responsabilidades
Ingeniero lider de proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planeación y supervisión general del proyecto</li> <li>▪ Revisión y elección de alternativas de diseño del horno</li> <li>▪ Administración de recursos y personal</li> <li>▪ Reportar con dirección los avances del proyecto</li> <li>▪ Calibración de sensores</li> </ul>
Ingeniero de diseño mecánico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diseño de estructura física del horno</li> <li>▪ Búsqueda, cotización y selección de componentes mecánicos y material utilizado en la construcción del horno</li> <li>▪ Búsqueda y selección de actuadores de gran potencia (motores y resistencias)</li> <li>▪ Definición de distribución de componentes en gabinete de control y rutas de cableado (fuerza y control)</li> <li>▪ Apoyo en conexionado de fuerza y control</li> </ul>
Técnicos mecánicos (2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manufactura e instalación de componentes estructurales</li> <li>▪ Instalación de motores y resistencias</li> <li>▪ Apoyo en conexionado de fuerza</li> </ul>
Técnico eléctrico-electrónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instalación de cableado de fuerza y control</li> <li>▪ Instalación y conexionado de componentes en gabinete de control</li> <li>▪ Instalación y acondicionamiento de sensores</li> </ul>



## Capítulo 4

# Metodología utilizada

El procedimiento realizado para diseñar el sistema de control y automatización del horno consistió de las siguientes etapas:

1. Investigación y análisis de la infraestructura instalada
2. Especificaciones de diseño, características y funcionalidades del horno
3. Elaboración de los diagramas eléctricos
4. Investigación, evaluación y elección del controlador
5. Búsqueda y selección del modelo de cada componente del sistema
6. Programación del controlador
7. Supervisión de conexionado de fuerza y control de gabinete eléctrico
8. Pruebas de funcionamiento, calibración de sensores y ajuste de ganancias
9. Primeros ciclos de horneado y modificaciones sugeridas
10. Generación de entregables del proyecto

### 4.1. Investigación y análisis de la infraestructura instalada

Con el objetivo de entender a detalle los hornos utilizados en la empresa, e identificar las principales necesidades y oportunidades de mejora relacionadas con el uso de estas máquinas, la primer etapa de diseño del sistema de control consistió en la investigación y análisis de los siguientes aspectos de cada horno instalado: 1) *funcionamiento* 2) *componentes* 3) *desempeño de control* 4) *pasos para su operación* 5) *mantenimiento*. Cabe aclarar que en esta fase se revisaron los diagramas eléctricos de cada horno, su operación fue estudiada y monitoreada, y se recabaron testimonios del personal operativo y de mantenimiento sobre el manejo, fallas, y otras cuestiones relevantes de cada horno.

De este primer análisis se identificó que a pesar de ser de diferentes fabricantes y tener distintos sistemas de control, todos los hornos incorporaban resistencias eléctricas como fuente de calor, y ventiladores (también conocidos como agitadores) para favorecer su transmisión. Además, tenían la capacidad de elaborar y subir históricos al sistema de la compañía para los reportes de calidad.

Cabe señalar que en la totalidad de los hornos se encontraron modificaciones al diseño original, las cuales fueron realizadas por el departamento de mantenimiento, con el objetivo de suprimir ciertas características no ocupadas, o incluir componentes para añadir ciertas funcionalidades deseadas.

Adicionalmente, en ciertos modelos se detectaron cuestiones como un control deficiente de temperatura, la ejecución de tareas repetitivas para su operación, la implementación de diversos componentes para realizar la totalidad de funciones, los cuales en ocasiones llegaban a ser poco comunes y sus refacciones solo se conseguían con el fabricante del horno, y por último, algunos modelos carecían de mecanismos de seguridad que le brindaran protección al producto.

## **4.2. Especificaciones de diseño, características y funcionalidades del horno**

Para definir la capacidad del horno, se consideró el espacio disponible dentro de la planta, el análisis de la cadena productiva, y las ventas en conjunto con sus proyecciones futuras. Respecto a sus funcionalidades, fueron establecidas por la dirección de la planta, los supervisores de producción, y el jefe de mantenimiento. En cuanto a sus características técnicas y funciones especiales, se utilizaron las observaciones obtenidas de la investigación y análisis de la infraestructura instalada; cabe aclarar que se decidió conservar las resistencias y ventiladores como elementos de generación y distribución de calor respectivamente.

Por último, se tomó en cuenta el punto de vista de los operadores, los cuales manifestaron que deseaban un sistema cuya operación fuera lo más sencilla y directa posible, que eliminara la ejecución de tareas repetitivas para la puesta en marcha del horno.

## **4.3. Elaboración de los diagramas eléctricos**

La elaboración de los diagramas eléctricos fue una parte crucial del diseño, ya que en esta fase se definió la arquitectura general del sistema de control y los dispositivos que la conformarían. Cabe recalcar que esto se realizó buscando lograr los objetivos y características definidas previamente.

Es importante señalar que se priorizó la elección de componentes avanzados cuya tecnología permitiera reducir la cantidad de dispositivos instalados en el gabinete de control, sin afectar las funcionalidades establecidas previamente. Además, en cuestión de seguridad, se buscó que la conexión de las protecciones fuera redundante y coordinada, de tal forma que su instalación protegiera ante fallas eléctricas y de calentamiento al personal, producto, y componentes de la misma instalación.

Por último, vale la pena mencionar que debido a los altos costos que representaba la adquisición de softwares para elaborar diagramas eléctricos como AutoCAD o EPLAN, tuve que aprender a utilizar el software gratuito DesignSpark Electrical, el cual permite la creación de este tipo de diagramas de una manera rápida y sencilla, basándose en la simbología de la norma IEC.

## **4.4. Investigación, evaluación y elección del controlador**

Debido a sus características técnicas y capacidad de registro, uno de los controladores conocidos por el personal era del agrado del ingeniero líder de proyecto, por lo tanto, realicé una investigación detallada acerca de sus funcionalidades y los modelos similares del fabricante; con el objetivo de determinar la opción que permitiera cubrir la totalidad de los requerimientos solicitados. Cabe aclarar

que dicha investigación consistió en la lectura de las hojas de datos, folletos, y otros documentos relacionados con los controladores de dicha marca.

## 4.5. Búsqueda y selección del modelo de cada componente del sistema

Esta etapa consistió en la elección de la marca y modelo de cada uno de los componentes definidos en el diagrama eléctrico, por lo tanto, con el objetivo de evitar discrepancias o limitaciones entre estos, y darle mayor prioridad a los requisitos funcionales del horno, primero se seleccionaron los actuadores y sensores del sistema, y después los dispositivos encargados de controlar y supervisar su funcionamiento. El orden y criterios de selección del modelo de los componentes utilizados fue el siguiente:

1. *Sensores de temperatura*: Para la elección de los sensores de temperatura se consideraron los rangos térmicos de operación, su precisión, principio de medición, y las condiciones de instalación como el tipo de montaje, la longitud de cableado requerido para recibir la medición, condiciones ambientales, entre otras cosas.
2. *Protecciones contra sobretensión*: Los criterios utilizados para la selección de este tipo de protecciones fueron similares a los que se utilizaron para los sensores de temperatura; sin embargo, con la finalidad de tener redundancia en la medición, se procuró que su principio de sensado de temperatura fuera diferente al de los sensores. Además, se buscó que su rango de protección fuera ajustable y no fijo.
3. *Sensores de proximidad*: En lo que respecta a este tipo de sensores, considerando que es un elemento muy utilizado en la compañía, y debido a que su ocupación sería principalmente para la inspección de posición de componentes metálicos del sistema, su selección se acotó a los modelos existentes en el taller, por lo tanto, la opción elegida fue aquella que tuviera mejor adaptación a las condiciones de instalación.
4. *Dispositivos de señalamiento*: Para la selección de los dispositivos de señalamiento se tomaron en cuenta aquellos que facilitarían la supervisión del estado del horno a nivel de piso de planta, por lo tanto, su elección consideró el tipo de información que señalarían, sus características visuales, eléctricas, y la forma de instalación.
5. *Contactores*: Para seleccionar los contactores se tomó como principal parámetro de selección las características eléctricas requeridas por la carga a la cual estarían conectados, por lo tanto, la elección del modelo se realizó de acuerdo al voltaje de operación y la corriente máxima de sus contactos, esta última es especificada por el fabricante de acuerdo a las categorías operativas definidas por la IEC 60947. Por último, se tomó en cuenta el voltaje requerido para la activación de su bobina de control.
6. *Relevadores*: La elección del modelo del relevador consideró al dispositivo encargado de su activación, la frecuencia con la cual sería accionado, y la cantidad de dispositivos conectados a sus terminales; es por esto que se buscó seleccionar un modelo cuyo tipo, cantidad de contactos, y valores operativos de voltaje y corriente, fueran los adecuados para las necesidades del sistema.

7. *Ventiladores*: Debido a que ciertos dispositivos previamente escogidos eran susceptibles a calentarse durante su operación, para su refrigeración fue necesaria la instalación de ventiladores, los cuales fueron escogidos tomando en cuenta el caudal de aire requerido por el dispositivo, su montaje, voltaje de alimentación y dimensiones. Cabe mencionar que también se ocuparon los mismos criterios de selección para el ventilador cuyo propósito era regular la temperatura interna del gabinete, por medio de la extracción del aire caliente de su interior.
8. *Controlador*: Debido a los resultados que arrojó la investigación y evaluación de los controladores elegibles, se eligió la opción que cumplió con los requisitos funcionales definidos previamente.
9. *Fuente de alimentación de corriente directa*: Para elegir el modelo de este componente se tomó en cuenta el voltaje y demanda de potencia de los dispositivos que requerían de un suministro de energía eléctrica con corriente directa para su funcionamiento. Adicionalmente, se procuró que las características eléctricas requeridas por la fuente de alimentación correspondieran con las proporcionadas por la instalación eléctrica de la compañía.
10. *Protecciones eléctricas*: El principal factor considerado para la elección de las protecciones eléctricas fue la carga o sección del circuito que protegerían, por lo tanto, se procuró que el tipo de protección, corriente nominal, y los requisitos operativos y de instalación del modelo elegido, fueran los adecuados para las necesidades del sistema.
11. *Interruptor principal*: Ya que este dispositivo está encargado de cortar el suministro de energía eléctrica de todo el horno, la capacidad interruptiva de corriente del modelo fue un factor crucial para su selección. Es importante señalar que debido a la relevancia que tiene dicho dispositivo en la instalación eléctrica, también se invirtió tiempo en la selección de accesorios que permitieran brindar mayor seguridad y practicidad en la operación del interruptor.

Respecto a los motores eléctricos de los agitadores de aire de la cabina de horneado, y las resistencias eléctricas de calentamiento, no fueron incluidos en la lista anterior debido a que su selección estuvo a cargo del ingeniero de diseño mecánico y del ingeniero líder de proyecto.

Cabe señalar que se procuró escoger dispositivos con diseños estandarizados. Además, para los componentes aplicables, se optó por utilizar aquellos con montaje de tipo rail DIN. Cabe recalcar que la selección de cada elemento tuvo que ser aprobada por el ingeniero líder del proyecto, ya que era necesario asegurarse que los costos y tiempos de entrega estuvieran dentro de los requerimientos del proyecto.

## 4.6. Programación del controlador

Antes de programar el controlador elegido por el ingeniero líder de proyecto, primero leí su manual de programación, elaboré ensayos de programa, y ejecuté sus respectivas pruebas de funcionamiento. Lo anterior se realizó con el objetivo de asegurar una programación correcta y eficiente, cuyo lenguaje de desarrollo era del tipo FBD.

Posteriormente, con los conocimientos adquiridos y tomando en cuenta lo establecido en el diagrama eléctrico, realicé el programa final del horno buscando concentrar la mayor cantidad de funciones deseadas en el controlador. Además, busqué la incorporación de alarmas y otros elementos de supervisión que facilitaran la detección de fallas, y complementaran la seguridad brindada por los dispositivos de protección instalados.

## **4.7. Supervisión de conexionado de fuerza y control de gabinete eléctrico**

Debido a que el personal técnico era responsable de realizar las conexiones de fuerza y control, durante la fase de instalación y cableado me dediqué a resolver las dudas relacionadas con los diagramas eléctricos, y supervisar la congruencia del conexionado elaborado con lo especificado en el diseño. Esto último lo realicé midiendo la resistencia entre conexiones para verificar la correcta continuidad y la ausencia de cortocircuitos. Por último, vale la pena mencionar que el ingeniero de diseño mecánico fue el encargado de definir la distribución de los componentes dentro del gabinete, lo cual realizó después que todos los dispositivos del sistema de control fueron seleccionados.

## **4.8. Pruebas de funcionamiento, calibración de sensores y ajuste de ganancias**

Finalizada la instalación de todos los elementos que componían al horno, se procedió con la realización de pruebas de funcionamiento, en donde se verificó que todos los dispositivos y componentes tuvieran los niveles de tensión requeridos, funcionaran adecuadamente en los tiempos definidos, y cumplieran correctamente el objetivo por el cual fueron instalados. Posteriormente, el ingeniero líder de proyecto efectuó la calibración de los sensores de temperatura utilizando un calibrador de procesos y alterando la longitud de las conexiones. Por último, se ejecutó el algoritmo de ajuste automático de ganancias del control PID que tenía el controlador elegido, cuya serie de pasos requería del ajuste por separado de cada lazo de control, y la modificación temporal del programa original.

## **4.9. Primeros ciclos de horneado y modificaciones sugeridas**

Después de haber terminado con las acciones de comisionamiento, se le dio la instrucción al personal de producción de realizar los primeros ciclos de horneado en el nuevo horno, con el fin de que lo probaran y comunicaran sus observaciones. Dicha retroalimentación fue la base para realizar las últimas modificaciones de programa, las cuales estuvieron encaminadas a facilitar la operación y mejorar la experiencia de usuario.

## **4.10. Generación de entregables del proyecto**

Para finalizar el proyecto generé los documentos necesarios para explicar la composición y funcionamiento del sistema de control del horno, con el objetivo de proporcionarle al personal operativo y de mantenimiento una guía escrita con temas de su interés, como la configuración y puesta en marcha del horno, la definición de un ciclo de horneado, las especificaciones de los componentes instalados, entre otras cosas.



## Capítulo 5

# Resultados

El sistema de control diseñado incorporó el método indirecto por resistencia eléctrica como alternativa de calentamiento, ya que dicha opción era la más segura y conocida por el personal de la compañía. Además, este esquema permitió obtener los múltiples beneficios que ofrecen los sistemas de calentamiento eléctrico, y no requirió de grandes inversiones o modificaciones a las instalaciones de la nave industrial.

Debido a la complejidad y dimensiones físicas del horno, se eligió la arquitectura de automatización *todo en un panel* como lo muestra la Figura 5.2, por lo tanto, el controlador elegido por el ingeniero líder de proyecto se desempeña como la unidad de control. Respecto a la supervisión operativa, se incorporaron 4 sensores de temperatura del tipo RTD Pt100, y sensores de proximidad inductivos para el monitoreo de posición de las superficies metálicas de interés.

En cuanto al control de temperatura, se utilizaron dos lazos cerrados de control, por lo tanto, a cada mitad del horno le corresponde un lazo con el algoritmo PID como mecanismo de control, cuya señal de retroalimentación provenía de un cálculo matemático que utilizaba las mediciones registradas por los sensores RTD ubicados en dicha sección. Cabe aclarar que la conmutación intermitente de las resistencias de calentamiento fue la técnica de control implementada, por lo tanto, la salida de control calculada establecía el tiempo de encendido y apagado de las resistencias en un periodo definido, como lo muestra la Figura 5.1. Adicionalmente, para simplificar la instalación, operación, y control del horno, no se implementaron variadores de frecuencia en el sistema, ya que se buscaba un giro a velocidad constante de los agitadores de aire durante todas las etapas del ciclo de horneado.

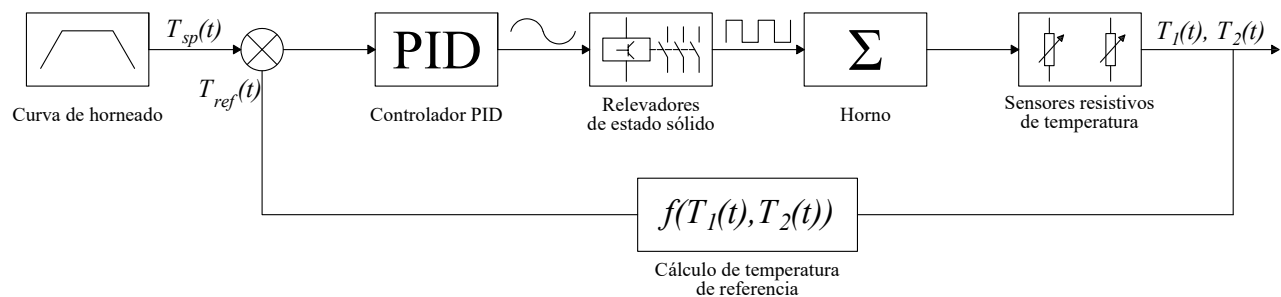


Figura 5.1 Lazo de control de temperatura

Respecto a la instalación, se incorporó un botón de paro de emergencia, disyuntores termomagnéticos para la protección de las cargas con mayor demanda de potencia, y termostatos para la protección

contra sobretensión. Dichos elementos se interconectaron de tal forma que su activación corte el suministro de energía de los elementos del sistema que pudieran representar un peligro. Además, con el objetivo de aumentar la seguridad en el sistema de calentamiento y garantizar la correcta activación y desactivación en los tiempos deseados de las resistencias eléctricas, se incorporaron dos tipos de relevadores para su operación: electromecánicos para controlar el suministro de energía, y de estado sólido para la regulación de temperatura. Cabe aclarar que se evitó la incorporación de componentes con diseños especiales o no estandarizados en el sistema.

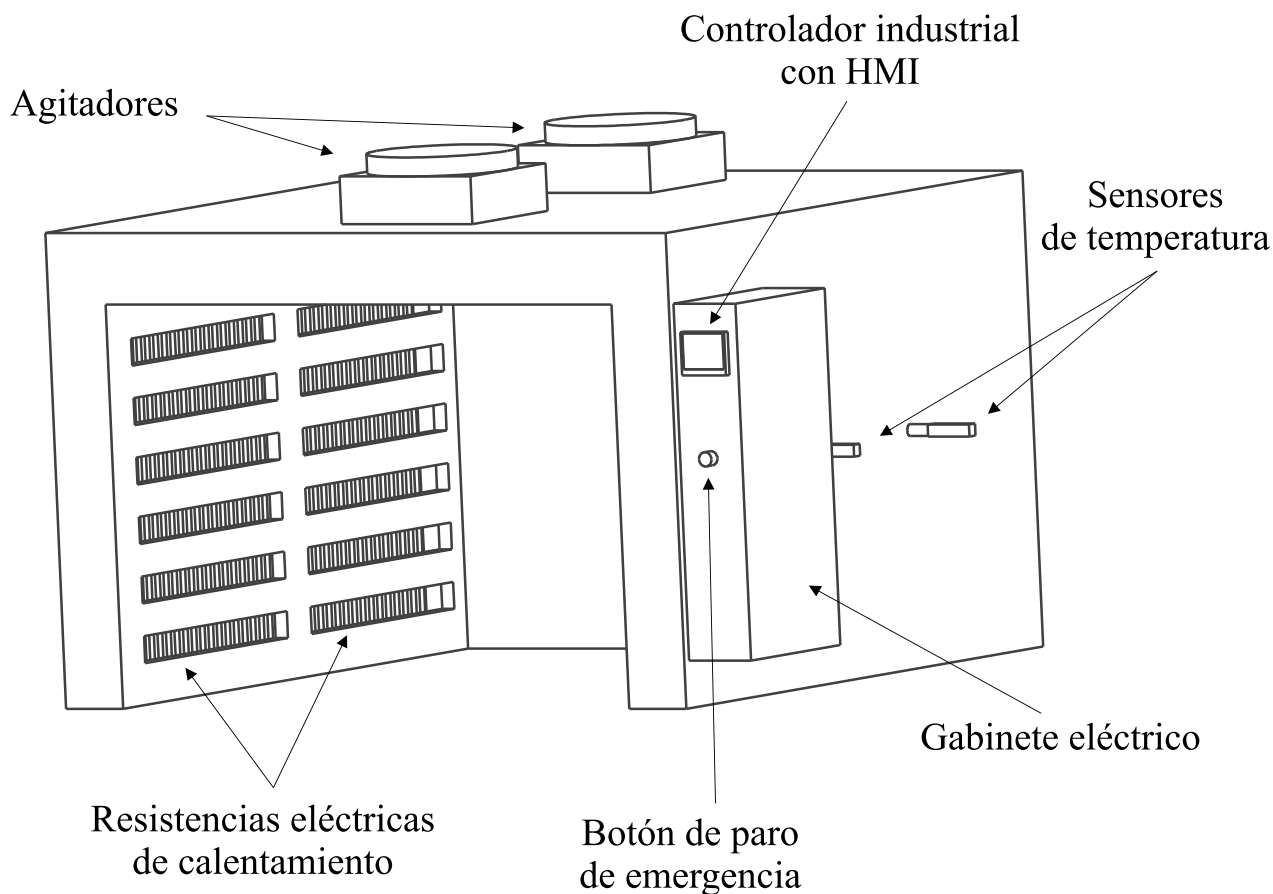


Figura 5.2 Esquema del horno construido

Sobre la programación del controlador, las funciones definidas facilitaron la capacitación del personal operativo, redujeron la cantidad de componentes instalados en el gabinete, simplificaron los pasos relacionados con la operación del horno, disminuyeron la probabilidad de errores operativos, y se desarrollaron de tal forma que tuvieran redundancia con las protecciones físicas. Además, se incluyó un control de usuarios para evitar la manipulación de parámetros sensibles del funcionamiento del sistema, y garantizar una correcta operación del horno.

Vale la pena mencionar que gracias a sus dimensiones físicas y capacidad de control, la implementación de este nuevo horno permitió aumentar la producción en más de un 30% sin comprometer la calidad, pues en comparación con otros hornos, logra mantener mayores cantidades de producto a las temperaturas deseadas, con una gran precisión, y exactitudes de  $\pm 5$  [°C]. Además, cuenta con una gran eficiencia térmica, ya que se observó que una vez alcanzado el punto de operación, se requiere activar por tiempos muy cortos las resistencias de calentamiento para mantener la temperatura deseada.



Finalmente, en cuanto al mantenimiento, al ser un sistema mayormente eléctrico se redujeron las actividades relacionadas con este aspecto, se mejoró la detección de fallas por las alarmas incluidas en la programación y la capacidad de registro del controlador (la cual también permitió evaluar a detalle el desempeño del horno). Adicionalmente, la inclusión de componentes estándar incrementó la disponibilidad de las refacciones en caso de alguna falla.

Por último, cabe destacar que gracias a los buenos resultados obtenidos por el horno, la satisfacción operativa por su facilidad de uso, y las metas de productividad de la compañía, se construyó un segundo horno con el sistema previamente diseñado.



## Capítulo 6

# Conclusiones

Por los múltiples beneficios y la relevancia que llegan a tener los sistemas de control y automatización en la producción de una compañía, su diseño es una tarea compleja que requiere conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería, y un amplio entendimiento del proceso para el cual se diseña. Cabe señalar que una buena comprensión de los objetivos del sistema, y la existencia de una buena comunicación dentro del equipo de trabajo, son factores primordiales para asegurar que las acciones tomadas a lo largo del proyecto permitan lograr las metas establecidas, sin desperdiciar los recursos asignados.

Para que el diseño cumpla con las expectativas deseadas, es importante que antes de planear o definir aspectos del sistema, se tenga acordado con el cliente los alcances y características del mismo. También, es recomendable que el resultado sea flexible ante futuras modificaciones, ya que existe la posibilidad que por cambios en el proceso o cuestiones no contempladas, sea necesario realizar adaptaciones al sistema.

En cuanto a la seguridad operativa, siempre debe priorizarse el bienestar del personal involucrado sobre el producto, componentes de la instalación, o cualquier otro elemento relacionado con el proceso; dicha prioridad tiene que ser considerada durante el diseño de todos los aspectos del sistema, desde la estructura física, hasta la programación del controlador. Cabe señalar que es fundamental contemplar el peor de los escenarios y procurar la redundancia durante la elaboración de los mecanismos de protección, ya que dichas acciones permiten aumentar su efectividad y disminuyen la probabilidad de ocurrencia de fallas de alto impacto.

El seguimiento de una metodología durante el desarrollo de un proyecto trae múltiples beneficios para su ejecución, pues se tiene mayor claridad al momento de diseñar cada aspecto del sistema, evita la repetición de determinadas acciones, la probabilidad de cometer errores disminuye, entre otras cosas. Respecto a los sistemas de control y automatización, una vez que se tenga establecido su propósito general, es recomendable continuar con la definición de su arquitectura elaborando sus respectivos diagramas eléctricos; después, debe seleccionarse de manera informada el modelo de cada componente de la instalación, empezando por los actuadores y sensores. Dicho orden de acciones es importante, pues garantiza que los dispositivos seleccionados no sean una limitante para cumplir con los objetivos establecidos, y se reducen los posibles inconvenientes que puedan presentarse por los tiempos de entrega. Finalmente, debe realizarse la programación, configuración, e instalación de cada componente seleccionado.

Una buena práctica al momento de definir los componentes de un sistema es la incorporación de dispositivos con diseños estandarizados, pues la búsqueda de refacciones se facilita, y se reduce

la dependencia tecnológica hacia un fabricante. Además, la instalación deberá de ser realizada por personal calificado, ya que aspectos menores como un apriete insuficiente en las conexiones, o un mal empalme de cables, puede derivar en fallas importantes en el sistema. Cabe señalar que la incorporación de controladores industriales disminuye la cantidad de dispositivos utilizados, ya que su tecnología les permite encargarse de una gran cantidad de tareas, por lo tanto, para reducir la ocurrencia de errores operativos, su programación debe ser realizada por personal calificado, y tener como objetivo la automatización de la mayor cantidad de acciones posibles relacionadas con el proceso, sin afectar la seguridad del mismo, y la calidad de los resultados.

Por último, es importante mencionar que la documentación técnica en conjunto con los entregables relacionados con el proyecto, la interacción hombre-máquina, y la capacitación operativa del personal, son aspectos con gran influencia en el éxito de un sistema de control y automatización, ya que de estos depende el grado de aprovechamiento que el usuario obtendrá de todas las funciones del sistema, por tal razón es primordial que dichos elementos sean elaborados de manera clara y sencilla.

# Referencias

- [ANSI, 1999] ANSI, A. N. S. I. (1999). *Ansi/ria r15.06-1999* [http://www.paragonproducts-ia.com/documents/RIA20R15\\_06-1999.pdf](http://www.paragonproducts-ia.com/documents/RIA20R15_06-1999.pdf). (Citado en página 21.)
- [Bishop, 2002] Bishop, R. H. (2002). *The mechatronics handbook*. CRC Press. (Citado en páginas 13, 18, 20 y 22.)
- [Ebel, 2008] Ebel, F. (2008). *Fundamentals of automation technology, technical book*. Festo Didactic. (Citado en páginas 1, 7, 10, 11, 16, 17 y 18.)
- [Escano, 2002] Escano, J. (2002). *Integración de sistemas de automatización industrial*. CRC Press. (Citado en páginas 9, 10, 14 y 15.)
- [Ingecom-Eléctricos, 2023] Ingecom-Eléctricos (2023). *Sensor Inductivo Autonics* <https://ingecomsas.com/producto/sensor-inductivo-autonics-pr08-1-5dn/>. (Citado en página 17.)
- [JMIndustrial-Technology, 2023] JMIndustrial-Technology (2023). *Pt1000* <https://www.jmi.com.mx/pt1000>. (Citado en página 16.)
- [Lamb, 2013] Lamb, F. (2013). *Industrial Automation Hands-On*. McGraw-Hill Education. (Citado en páginas 10, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 22, 23, 24 y 26.)
- [Lipták, 2003] Lipták, B. G. (2003). *Process Measurement and Analysis*. CRC Press. (Citado en páginas 16, 17 y 25.)
- [Mullinger, 2008] Mullinger, P. (2008). *Industrial and process furnaces: Principles, design and operation*. Elsevier. (Citado en página 3.)
- [Ogata, 1998] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Prentice-Hall. (Citado en página 11.)
- [RSPro, 2021] RSPro (2021). *Platinum Resistance Thermometer (PRT) selection guide* [https://assets.rs-online.com/image/upload/v1675700776/MKT/LP/Suppliers/rspro/pdf/RS\\_PRO\\_-\\_Platinum\\_Resistance\\_Thermometer\\_PRT\\_Selection\\_Guide.pdf](https://assets.rs-online.com/image/upload/v1675700776/MKT/LP/Suppliers/rspro/pdf/RS_PRO_-_Platinum_Resistance_Thermometer_PRT_Selection_Guide.pdf). (Citado en páginas 16 y 17.)
- [Schneider-Electric, 2008] Schneider-Electric (2008). *Automation solution guide*. Schneider Electric. (Citado en páginas 7, 8, 9, 18, 19, 20, 21, 23 y 24.)
- [Stansfield, 1907] Stansfield, A. (1907). *The electric furnace: its evolution, theory and practice*. Hill Publishing Company. (Citado en páginas 4 y 5.)
- [TC, 2023] TC (2023). *Esquema de conexión Termorresistencias de Platino* <https://www.tc-sa.es/rtd-pt100-reference/pt100-esquema-de-conexion.html>. (Citado en página 16.)
- [Theraja, 2007] Theraja, B. (2007). *A textbook of electrical technology - Volume III: transmission, distribution and utilization*. S. Chand Limited. (Citado en páginas 4, 5, 6 y 7.)
- [Zapata, 2021] Zapata, M. (2021). *Fundamentos de automatización y redes industriales*. Universidad Tecnológica Indoamérica. (Citado en páginas 10, 11, 12 y 13.)