



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO
CERRADO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UN
HORNO INDUSTRIAL DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO”**

Trabajo de titulación

Tipo: Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTORES: EDISON FIDEL SAAVEDRA CAPA

FANNY ELIZABETH SANGUCHO TACO

DIRECTOR: Ing. MARCO ANTONIO VITERI BARRERA

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Fanny Elizabeth Sangucho Taco & Edison Fidel Saavedra Capa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de los Autores.

Nosotros, Fanny Elizabeth Sangucho y Edison Fidel Saavedra Capa, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados. Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 22 de diciembre 2021



Fanny Elizabeth Sangucho Taco

CI: 050369895-3






Edison Fidel Saavedra Capa

CI: 220027068-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA.
CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; Tipo: Dispositivo Tecnológico. “**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN UN HORNO INDUSTRIAL DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO**”, realizado por la señorita y el señor: **FANNY ELIZABETH SANGUCHO TACO y EDISON FIDEL SAAVEDRA CAPA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Paul Patricio Romero Riera. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado digitalmente por PAUL PATRICIO ROMERO RIERA Fecha: 2022.01.31 13:28:24 -05'00'	2021-12-22
Ing. Marco Antonio Viteri Barrera. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado digitalmente por MARCO ANTONIO VITERI BARRERA Fecha: 2022.01.19 21:08:30 -05'00'	2021-12-22
Ing. Jorge Luis Hernández Ambato PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado digitalmente por: JORGE LUIS HERNANDEZ AMBATO	2021-12-22

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado con mucho cariño para mis padres, en especial a mi madre, por sus consejos y el apoyo incondicional que me ha dado. A mis hermanos y demás familiares por brindarme su apoyo cada día y alentarme para seguir cumpliendo cada una de mis metas.

Fanny

A mi familia que me han apoyado incondicionalmente durante todos estos años de carrera y de manera muy especial a mi madre María y mi hermano Adrián. Gracias por estar ahí siempre conmigo en los buenos y malos momentos.

Edison

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas las oportunidades que me ha dado en la vida, y un agradecimiento especial a quienes han forjado mi camino, a mi madre, mi familia, a mi tutor por guiarme en este trabajo de titulación, y a cada uno de los docentes a los que he tenido la oportunidad de conocer, gracias por brindarme sus conocimientos y formarme como profesional.

Fanny

Antes que nada, agradezco a Dios por la vida y por acompañarme en cada paso de mi camino. Agradezco a mi familia en especial a mi madre y mis hermanos por siempre brindarme su amor y cariño incondicionalmente. A los docentes por su ayuda y guía a lo largo de la carrera.

Edison

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMEN	xv
SUMMARY	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Hornos de Fundición.....	5
1.1.1. <i>Horno de Fundición Rotativo.</i>	5
1.2. Fundición de Aluminio	6
1.3. Quemadores Industriales	7
1.3.1. <i>Quemador Atmosférico</i>	7
1.3.2. <i>Quemador de Tiro Forzado</i>	7
1.4. Sensores.....	7
1.4.1. <i>Detector de llama.</i>	7
1.4.2. <i>Sensor de Temperatura Termopar</i>	8
1.4.2.1. <i>Tipos de Termopares</i>	9
1.4.2.2. <i>Compensación de la unión fría</i>	10
1.5. Sistemas de Control	11
1.5.1. <i>Sistemas de Control de Lazo Abierto.</i>	12
1.5.2. <i>Sistema de Control de Lazo Cerrado</i>	12
1.6. Métodos de control en sistemas de lazo cerrado.....	12
1.7. Sistemas de control discontinuos	13
1.7.1. <i>Control todo o nada</i>	13
1.8. Controlador Lógico Programable (PLC).....	14
1.8.1. <i>Arquitectura de los PLC</i>	14
1.8.2. <i>Tipos de PLC</i>	15
1.8.2.1. <i>PLC Tipo Compactos</i>	15
1.8.2.2. <i>PLC Tipo Modulares</i>	15

1.9.	Norma IEC 61131-3	15
1.9.1.	Lenguajes de programación según la norma IEC 61131-3	16
1.9.1.1.	<i>Lista de Instrucciones</i>	16
1.9.1.2.	<i>Lógica de Contactos, o Lenguaje de Escalera (LadDer)</i>	16
1.9.1.3.	<i>Lenguaje de Bloques Funcionales</i>	16
1.9.1.4.	<i>Texto Estructurado</i>	16
1.9.1.5.	<i>Gráfico Secuencial de Funciones</i>	16
1.10.	Transmisores de señal	17
1.11.	Actuadores	17
1.11.1.	<i>Válvulas de Control</i>	17
1.12.	Ventilador Centrifugo	17
1.13.	Bomba Hidráulica	18
1.13.1.	<i>Bomba Sumergible de Combustible</i>	18
1.13.1.1.	<i>Funcionamiento</i>	18
1.13.1.2.	<i>Características</i>	19
1.14.	Bobinas de Encendido	19
1.15.	Tablero de Control	20
1.16.	Interfaz Humano Máquina – HMI	20
1.16.1.	<i>Estándar ISA-101</i>	21
1.16.2.	<i>Modelo de Ciclo de Vida</i>	22
1.16.2.1.	<i>Estándares del Sistema</i>	22
1.16.2.2.	<i>Diseño</i>	23
1.16.2.3.	<i>Implementación</i>	23
1.16.2.4.	<i>Operación</i>	23
1.16.3.	<i>Principios Para Diseñar Apropiadamente Interfaces HMI</i>	23
1.16.3.1	<i>Mostrar Información en Lugar de Datos</i>	23
1.16.3.2.	<i>Uso Apropiado de Colores</i>	24
1.16.3.3.	<i>Mostrar una Jerarquía</i>	25
1.17.	Comunicación RS-232	27

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLOGICO	29
2.1.	Introducción	29
2.2.	Diseño del sistema de control	29
2.2.1.	<i>Controlador.</i>	30
2.2.2.	<i>Actuadores.</i>	32

2.2.2.1.	<i>Encendido por arco eléctrico</i>	32
2.2.2.2.	<i>Electroválvula de combustible</i>	34
2.2.2.3.	<i>Ventilador centrífugo</i>	36
2.2.3.	Horno de Fundición.	36
2.2.4.	<i>Sensor de Temperatura.</i>	37
2.2.5.	<i>Acondicionamiento.</i>	37
2.3.	Programación del PLC	39
2.4.	Diseño de tablero de control	43
2.5.	Sistema de Inyección de Combustible	47
2.6.	Diseño de Interfaz Humano-Máquina (HMI)	50
2.7.	Diseño mecánico	53

CAPÍTULO III

3.	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
3.1.	Introducción	55
3.2.	Análisis de funcionamiento	55
3.2.1.	<i>Análisis de Funcionamiento en Modo Manual</i>	55
3.2.2.	<i>Análisis de Funcionamiento en Modo Automático</i>	56
3.2.3.	<i>Evaluación de Sistema de Control de Temperatura</i>	57

CAPÍTULO IV

4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	60
4.1.	Análisis de Costos de Implementación	60
4.1.1.	<i>Costos de Materiales de Construcción de la Mesa.</i>	60
4.1.2.	<i>Costos de Implementación de Tablero de Control</i>	60
4.1.3.	<i>Costos de Sistema de Inyección de Combustible</i>	61
4.1.4.	<i>Costo Total de Implementación</i>	62
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	64

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 -1:	Características del aluminio.	6
Tabla 2 -1:	Tipos de termopares comunes	9
Tabla 3 -1:	Tipos de sistemas de control automático.....	13
Tabla 4 -1:	Especificaciones y características de las bobinas de encendido.....	20
Tabla 5 -1:	Ejemplo de una paleta de colores funcional en el diseño de HMI.....	25
Tabla 1 -2:	Entradas digitales del PLC requeridas.....	31
Tabla 2 -2:	Salidas digitales del PLC requeridas.	31
Tabla 3 -2:	Características de PLC FX3U 14MT 6AD2DA	32
Tabla 4 -2:	Especificaciones técnicas de electroválvulas PU220ARV-02N-S9	35
Tabla 5 -2:	Características técnicas del ventilador.....	36
Tabla 6 -2:	Detalle de las entradas digitales	39
Tabla 7 -2:	Detalle de las salidas digitales.....	40
Tabla 8 -2:	Detalle de las borneras de distribución.....	45
Tabla 9 -2:	Cálculo de termomagnético y calibre de conductores	46
Tabla 10 -2:	Características técnicas de la bomba de combustible BOSCH.....	49
Tabla 1 -3:	Tabla de mediciones de temperatura.	59
Tabla 2 -3:	Cálculo del valor t.	59
Tabla 3 -3:	Cálculo de la t crítica.....	59
Tabla 1 -4:	Costo de materiales para construcción de mesa de soporte.....	60
Tabla 2 -4:	Costo de dispositivos instalados en el tablero de control.	61
Tabla 3 -4:	Costo de sistema de inyección de combustible	62
Tabla 4 -4:	Costo total de implementación.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – 1:	Horno Rotativo: a) Vista frontal y b) Lateral	6
Figura 2 – 1:	Fotocélula de cadmio.....	8
Figura 3 – 1:	Posición de la fotocelda en un ventilador.....	8
Figura 4 – 1:	Voltajes de salida de termopares tipo J, K y S	9
Figura 5 – 1:	Coeficientes de Seebeck en función de la temperatura.	10
Figura 6 – 1:	Esquema de la compensación de la unión fría.....	11
Figura 7 – 1:	Representación de un sistema.....	11
Figura 8 – 1:	Diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado.	12
Figura 9 – 1:	Diagrama de tiempo de las señales que intervienen	13
Figura 10 – 1:	Arquitectura de un PLC.....	14
Figura 11 – 1:	Imagen de un soplador.	18
Figura 12 – 1:	Bomba de combustible	19
Figura 13 – 1:	Varios tipos de bobinas de encendido.	19
Figura 14 – 1:	Ejemplos de interfaces HMI.....	21
Figura 15 – 1:	Modelo de ciclo de vida para el desarrollo y gestión de una HMI.....	22
Figura 16 – 1:	Ejemplo de una HMI que muestra la información con indicadores numéricos sin contexto y una HMI que muestra la información con indicadores analógicos en un contexto.	24
Figura 17 – 1:	Jerarquía de las pantallas de una HMI.....	26
Figura 18 – 1:	Red de comunicación punto a punto RS-232.	27
Figura 19 – 1:	Pines de conector DE-9.	28
Figura 1 – 2:	Esquema del sistema de control en lazo cerrado	30
Figura 2 – 2:	PLC FX3U 14MT 6AD2DA	32
Figura 1 – 2:	Circuito generador de arco eléctrico.....	33
Figura 2 – 2:	Bobina de encendido.	34
Figura 3 – 2:	Electroválvula de combustible SHAKO.....	35
Figura 4 – 2:	Ventilador centrífugo.	36
Figura 5 – 2:	Horno de fundición de aluminio.....	37
Figura 6 – 2:	Sensor de temperatura Termocupla tipo K.....	37
Figura 9 – 2:	Lectura de la temperatura y conversión del valor a grados centígrados.....	41
Figura 10 – 2:	Selección del modo de operación.....	42
Figura 11 – 2:	Etapas de control del modo automático	42
Figura 12 – 2:	Activación de las salidas.	43
Figura 13 – 2:	Diseño de Tablero de Control.....	44

Figura 14 – 2: Relé EBCHP 47400.....	45
Figura 15 – 2: Interruptor termomagnético general.....	46
Figura 16 – 2: Fuente de alimentación SIEMENS 6EP1-332-1SH41.....	46
Figura 17 – 2: Fotografía de tapa y parte interna del tablero de control.....	47
Figura 18 – 2: Sistema hidráulico de inyección de combustible.....	47
Figura 19 – 2: Tanque de combustible.....	48
Figura 20 – 2: Bomba de combustible Bosch.....	48
Figura 21 – 2: Manguera de poliuretano número 10.....	49
Figura 22 – 2: Jerarquía de las pantallas en la interface HMI.....	50
Figura 23 – 2: Pantalla principal de la HMI.....	51
Figura 24 – 2: Pantalla correspondiente al modo de control manual.....	51
Figura 25 – 2: Pantalla de GRÁFICA del modo manual.....	52
Figura 26 – 2: Pantalla correspondiente al modo automático.....	52
Figura 27 – 2: Pantalla de GRÁFICA del modo automático.....	53
Figura 28 – 2: Diseño mecánico de la mesa.....	53
Figura 29 – 2: Fotografía de la mesa.....	54
Figura 1 -3: Prueba de funcionamiento de la pantalla HMI.....	55
Figura 2 -3: Prueba de funcionamiento de la chispa de ignición en modo manual.....	56
Figura 3 -3: Pantalla del modo manual antes y después de activar los actuadores.....	56
Figura 4 -3: Pantalla principal con el modo automático seleccionado.....	57
Figura 5 -3: Horno encendido en modo automático.....	57

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -3:	Gráfico de mediciones de temperatura.....	58
----------------------	---	----

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DIAGRAMAS DE CONEXIÓN2

ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL ACONDICIONADOR WAGO 857-810

ANEXO C: DATASHEET DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN

ANEXO D: CONTROLADOR FUNCIONANDO

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AC:	Corriente alterna
A:	Amperio
°C:	Grados Centígrados
DC:	Corriente directa
F:	Frecuencia
GRAFCET:	Diagrama de Control con Etapas y Transiciones
HMI:	Interfaz hombre máquina
Hz:	Hertz
IEC:	Comisión Electrotécnica Internacional
ISA:	Sociedad Americana de Instrumentación
J:	Joulio
Kcal:	Kilocalorías
Kg:	Kilogramos
kV:	Kilovoltio
ms:	Milisegundo
mV:	Milivoltios
NEC:	Norma Ecuatoriana de Construcción
PLC:	Controlador Lógico Programable
PSI:	Libra por pulgada cuadrada
P&ID:	Diagrama de tuberías e instrumentación
Seg:	Segundo
SFC:	Sequential Function Chart
T:	Periodo
VAC:	Voltios en corriente alterna
VDC:	Voltios en corriente directa
μV:	Microvoltios

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se implementó un sistema de control de lazo cerrado para el control de temperatura en un horno industrial de fundición de aluminio para la empresa Fundymec. Se desarrolló un control de tipo encendido-apagado programado en un Controlador Lógico Programable (PLC), para lo cual fue necesario implementar un sistema de encendido por arco eléctrico, se diseñó un interfaz humano máquina (HMI), desde la cual se interactúa con el sistema en dos formas; tanto en modo manual como automático, se implementó también un nuevo sistema para la inyección de combustible diésel. Se describe los dispositivos utilizados y que fueron instalados en un tablero de control, diseñado en AutoCAD Electrical. Las pruebas de funcionamiento del sistema de control fueron exitosas, tanto en modo manual como en modo automático se establece comunicación entre el PLC y la pantalla HMI y permite al usuario interactuar con el sistema. El sistema de control mantiene la temperatura en el valor deseado, como se trata de un control de encendido-apagado la gráfica de temperatura presenta una oscilación cuyo valor medio no es significativamente diferente al valor establecido por el usuario, como se demostró mediante las imágenes obtenidas en el HMI y el análisis estadístico T-Student, con treinta muestras de temperatura tomados en intervalos de tiempo. Para realizar el control de temperatura en procesos de fundición de metales, se recomienda realizar primero el estudio sobre el elemento que actúa como combustible, ya que existen varios tipos o energía utilizada para la fundición, ya que se trabajará específicamente sobre este elemento.

Palabras claves: <SISTEMA DE CONTROL REALIMENTADO> <CONTROL DE TEMPERATURA> <HORNO INDUSTRIAL> <FUNDICIÓN DE ALUMINIO> <AUTOCAD ELECTRICAL (SOFTWARE)>.



1858-DBRA-UPT-2021

2021-10-06

SUMMARY

The aim of this graduate research project was to implement a closed-loop control system for temperature control in an industrial aluminum smelting furnace for the FUNDYMEC Company. An on-off type control programmed in a Programmable Logic Controller (PLC) was developed, for which it was necessary to implement an electric arc ignition system, a human-machine interface (HMI) was designed, interacting with the system in two ways: in both manual and an automatic mode, a new system for diesel fuel injection was also implemented. It is described the devices used and installed in a control board designed in AutoCAD Electrical. The control system operation tests were successful, both in manual and automatic mode, establishing communication between the PLC and the HMI screen and allowing the user to interact with the system. The control system maintains the temperature at the desired value; as it is on-off control, the temperature graph presented an oscillation whose average value is not significantly different from the established value by the user, as demonstrated by the images obtained. In the HMI and the T-Student statistical analysis, thirty temperature samples were taken at time intervals. To carry out temperature control in metal smelting processes is recommended firstly to carry out a study on the element that acts as fuel since several types of energy are used for smelting.

Key words: <FEEDBACK CONTROL SYSTEM> <TEMPERATURE CONTROL>
<INDUSTRIAL FURNACE> <ALUMINUM SMELTING> <AUTOCAD ELECTRICAL
(SOFTWARE)>



INTRODUCCIÓN

La temperatura es una variable predominante en gran número de procesos industriales, y su control debe ser preciso y estable, ya que el control de temperatura requiere de un especial cuidado debido a la naturaleza del comportamiento exponencial, sin embargo, el desarrollo tecnológico que se puede encontrar, en muchas de las empresas de fundición a nivel nacional, es casi nula, incluso se podría decir que realizan su actividad de manera artesanal. Una de las conclusiones a la que llega el autor (Sandoval y Irene 2018, p. 78) , es que las empresas del sector metalmeccánico, que fabrican metales comunes en el Ecuador, tienen poca innovación tecnológica. Por lo cual el autor plantea como estrategia, la implementación de nuevas tecnologías, para mejorar la calidad de sus productos y lograr procesos de producción más eficientes y eficaces. En la actualidad la aplicación de sistemas de control ha tomado mayor fuerza en la industria para producir más en menos tiempo y menos costo, ya que control es de suma importancia en la operación de cualquier sistema, en este caso sino se tiene un buen sistema de control no se pueden tener temperaturas estables en el rango deseado de temperatura máxima y mínima durante el tiempo requerido.

El problema que se presenta en la fábrica FUNDYMEC, es en el horno industrial de fundición de aluminio, ya que el proceso de encendido se realiza de forma manual e insegura y no se tiene ningún tipo de control de la temperatura, lo que es esencial ya que gracias a ésta se va a llevar el proceso de fundición. Es por esta razón que se busca desarrollar un control automático de la temperatura del horno de aluminio.

En el primer capítulo se aborda teoría acerca de los hornos de fundición y propiedades del aluminio que es el metal que se va a fundir, se define lo que es un sistema de control realimentado y describe los elementos utilizados para la implementación del lazo de control, se definen los Controladores Lógico Programables, así como sus lenguajes de programación, se detalla los dispositivos electrónicos empleados para la implementación de sistema de encendido por arco eléctrico, concluyendo con bases teóricas para el diseño de interfaces HMI.

En el segundo capítulo se presenta los cálculos del circuito de la chispa de ignición ya que es la primera etapa del proceso, seguido se explica el proceso que va a realizar el PLC, las salidas sobre las que va actuar y sus conexiones tanto entradas como salidas, se presenta el diseño del HMI tanto en modo manual como en automático, se realiza una breve explicación sobre la conexión eléctrica y se explica el funcionamiento de los actuadores, se presenta el tablero de control y el sistema ya montado.

En el tercer capítulo se realizan las pruebas de funcionamiento de los distintos actuadores del sistema, usando el modo manual programado en el PLC. Se tomaron mediciones de temperatura cada 5 minutos durante 4 horas y 25 minutos, con y sin sistema de control, se graficaron y compararon ambas gráficas. Se determinó que la temperatura controlada tiene un valor que no es

significativamente diferente al valor de setpoint mediante una prueba T-Student. Para finalizar se realizó un análisis económico de implementación.

Antecedentes

La fundición de metales es una de las actividades más difundidas a nivel mundial, en escalas artesanal e industrial debido al uso extendido de productos metalúrgicos para la construcción de máquinas e infraestructuras y el reciclaje de materiales ya procesados (Aguirre Guachamín y Plasencia Lema, 2018).

La fundición en nuestro país comenzó con la revolución industrial, la necesidad de procesar hierro y acero a gran escala dieron como nacimiento las grandes industrias siderúrgicas. En los años 60's se crearon las dos más grandes industrias que existen en la actualidad Andec y Adelca, las cuales abarcan la demanda nacional de acero, la restante industria es de poco desarrollo y de procesos pocos eficientes, realizando procesos artesanales y de no muy buena calidad. (Adelca, 2015), (ANDEC, 2014).

Dadas las características de las fundiciones nacionales, el control existente sobre estos parámetros es prácticamente nulo y la calidad de las fundiciones está supeditada a la experiencia o al buen criterio del fundidor. Los controles de la temperatura se los hace de manera manual apreciando el color y textura del metal, lo que puede ser una buena referencia empírica pero que no es confiable en todos los casos. Pocas son las fundiciones que cuentan con pirómetros (ópticos o de inmersión) que servirían para este propósito. La velocidad de enfriamiento se ve afectada por las operaciones manuales en el transporte de la colada y el movimiento de materiales. Debe propenderse a la mecanización, aun cuando sea con instalaciones simples, a base de rieles y cucharas operadas con elevadores eléctricos; estas modificaciones sin ser costosas constituirían un apoyo positivo a las operaciones de colado del metal fundido.

Los resultados de las investigaciones en pequeñas industrias del país se pueden concluir que en Ecuador la industria del metal, no se ha superado aún la fase de automatización, aun se realiza los procesos de forma artesanal según indica Guillermo Pavón, director general de la Federación Ecuatoriana de la Industria del Metal, Fedimetal. Menciona que una buena parte de la industria no cuenta con tecnología para el control de procesos y la automatización de operaciones de producción. Es una necesidad que Ecuador avance en materia de innovación tecnológica, sobre todo cuando se encuentra a 20 años de distancia de los países de su entorno (TELEAMAZONAS, 2019).

Formulación del problema

¿Cómo eliminar las variaciones bruscas de temperatura en un horno industrial de fundición de aluminio cuando el metal llega a su punto de fusión?

Sistematización del problema

¿Cuáles son las diferentes variables que intervienen en la automatización de un proceso de fundición de aluminio?

¿Cómo conseguir que la temperatura de fusión del aluminio permanezca constante en un valor determinado?

¿Qué dispositivos de hardware, sensores y actuadores tienen las mejores prestaciones para la aplicación que se busca implementar?

¿Cómo visualizar en tiempo real el desempeño de un sistema de control de un proceso de fundición?

¿De qué manera comprobar que el control implementado es satisfactorio?

Justificación

Justificación teórica

El proyecto propone el desarrollo industrial en la empresa FUNDYMEC al implementar el sistema de control en lazo cerrado en el horno industrial para fundición de aluminio, esta automatización significara un aprovechamiento más eficiente de los recursos de la empresa en el proceso de producción. Llevar a cabo este proyecto implica la aplicación de varias áreas estudiadas en la carrera: será necesario la parte electrónica para el acondicionamiento de señales provenientes de sensores, etapas de amplificación para señales que van a actuadores, y generar la chispa de ignición, se trabaja con PLC para automatizar el proceso y comunicarlo con la pantalla HMI para monitorear el proceso de control de temperatura y sea de fácil manejo para el operador.

Justificación aplicativa

En la actualidad la empresa FUNDYMEC no cuenta con tecnologías que facilite el proceso de fundición, ya que todo el proceso es totalmente manual, actualmente, una vez que el metal ha alcanzado la temperatura de fundición, un operador regula la entrada de combustible al horno, basándose en la experiencia y la lectura de un pirómetro, con el objetivo de evitar que el metal se enfríe demasiado o que se quemé.

Al ser controlado manualmente este proceso, se producen pérdidas de tiempo, mano de obra y combustible, además los dispositivos eléctricos trabajan de manera innecesaria. Mediante la implementación del sistema se pretende controlar la temperatura dentro del horno industrial donde se produce la fusión del metal de manera óptima, evitar pérdidas de producción, dentro del proyecto se propone también diseñar un sistema HMI para facilitar la visualización del proceso.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema de control en lazo cerrado para el control de temperatura en un horno industrial de fundición de aluminio.

Objetivos Específicos

- Estudiar y conocer el proceso fundición de aluminio para determinar los componentes de un lazo de control y la panorámica general de un Sistema de Control.
- Diseñar el sistema de control de lazo cerrado para que la temperatura de un horno industrial se mantenga constante en el valor de la temperatura de fusión del aluminio.
- Construir el sistema de control mediante dispositivos y equipos electrónicos.
- Implementar un HMI para monitorear el proceso automatizado de fundición.
- Presentar resultados obtenidos con una tabla de comparaciones.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Hornos de Fundición

Un horno de fundición tiene como objeto el calentar el metal para fundirlo y recalentarlo hasta el punto en que adquiere la suficiente fluidez para adoptar la forma del molde en que se va a vaciar. La fusión consiste en hacer pasar los metales del estado sólido al estado líquido, para lo cual se necesita generar una cantidad de calor bien específica y característica para cada metal. Una vez que se ha alcanzado la temperatura para fusión del metal, es necesario generar más calor para poder transformar el metal de estado sólido a estado líquido, este calor con el que se disgrega el estado sólido se llama calor latente de fusión. Si se continúa generando calor con el metal ya en estado líquido, se aumenta la temperatura y el metal se recalienta (Capello, 1971, p. 147).

1.1.1 Horno de Fundición Rotativo.

Un horno rotativo consiste en un tambor cilíndrico de acero, cubierto internamente con material refractario. La alimentación de chatarra se carga en el horno rotativo, que se calienta con un quemador de diésel. Los hornos rotativos son más rápidos y eficientes que los hornos reverberos ordinarios ya que tiene dos canales de rodadura que permiten realizar el movimiento de rotación, proporcionando una mejor homogeneización de la carga y recuperación de calor en el refractario superior expuesto a la llama. Los hornos rotativos se caracterizan por tener baja convección y alta irradiación del refractario, maximizando la transferencia de calor entre la pared del horno y la carga que se está fundiendo, acortando el tiempo necesario para el proceso de precalentamiento. Este tipo de horno logra velocidades de fusión más altas, emisiones reducidas, composición de metal consistente y menor consumo de combustible. Esto se debe en parte a la rotación del refractario interno caliente, que transfiere más calor a la carga a través del contacto directo (Gethin, 2003).

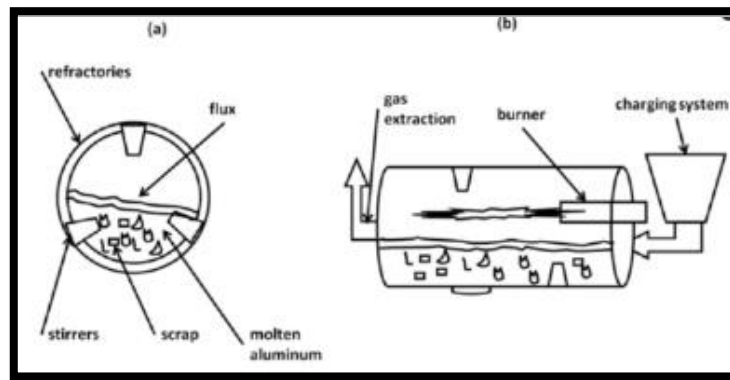


Figura 1 - 1. Horno Rotativo: a) Vista frontal y b) Lateral
Fuente: (Kamimartyn 2015)

Los hornos rotativos son más caros de instalar y más difíciles de mantener. Como resultado, generalmente son los más adecuados para derretir escoria y otros desechos oxidados, la innovación más importante para los hornos rotativos es la transición de tambores estacionarios a tambores basculantes. La capacidad del horno para inclinarse minimiza la cantidad de tiempo que se dedica a operaciones que no se derriten, como cargar, golpear, escoriar y limpiar. Los hornos rotativos basculantes pueden fundir chatarra de alta calidad sin el uso de fundentes.

1.2 Fundición de Aluminio.

El aluminio es un metal no ferromagnético, los compuestos de aluminio forman gran parte de la corteza terrestre y es el tercer elemento más común sobre ella. Su extracción se realiza del mineral bauxita aunque se necesitan grandes cantidades de energía eléctrica, pero esto se ve compensado por la facilidad y bajo costo para ser reciclado. Este metal tiene gran resistencia a la corrosión, una baja densidad, se puede aumentar su resistencia mecánica mediante aleaciones adecuadas, es un buen conductor de calor y electricidad, es fácil de mecanizar y es barato (Aluminio, 2021).

En la tabla se detalla las características del aluminio que más pueden interesar para su fundición.

Tabla 1 -1: Características del aluminio.

CARACTERÍSTICAS DEL ALUMINIO	
Temperatura de fusión	657 °C
Temperatura de ebullición	2200 °C
Calor específico	0,22 kcal/kg.°C
Calor latente de fusión	93 kcal/kg
Calor de combustión	7200 kcal/kg
Contracción lineal	1,65 %
Coefficiente de dilatación	24.10 ⁻⁶
Conductibilidad térmica	0,52 kcal/seg.dm ³ .°C

Fuente: (Capello 1971).

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

1.3 Quemadores Industriales

Existen dos categorías de quemadores industriales. El primer tipo se conoce como quemador atmosférico o de tiro natural y el segundo tipo se conoce como quemador de tiro forzado o mecánico (Suárez, 2002).

1.3.1 Quemador Atmosférico

Estos quemadores trabajan con combustibles gaseosos y solo necesitan el tiro suficiente y la presión del combustible. La ignición del gas se puede hacer de manera manual, que se hace con quemadores pequeños, o se puede hacer de manera automática, donde un control proporciona una llama piloto y detecta la presencia de la llama de ignición, el piloto solo opera durante el periodo de ignición. Estos quemadores cuentan con un derivador que sirve para modificar el tiro, permitiendo que el aire para compensar el tiro creado por la chimenea (Suárez, 2002).

1.3.2 Quemador de Tiro Forzado

Este tipo de quemador cuenta con un ventilador para forzar aire para la combustión. Cuentan con un mejor rendimiento que los quemadores atmosféricos y facilitan el uso de combustibles como el diésel o el bunker, los cuales son atomizados antes de ser inyectados a la cámara de combustión. En este tipo de quemador se instala un damper en la chimenea para el control del tiro (Suárez, 2002).

1.4 Sensores

1.4.1 Detector de llama.

En el control de quemadores industriales, los detectores de llama se utilizan para determinar si se ha producido la combustión y así desconectar la chispa de ignición o apagar la llama piloto. Generalmente se utiliza una fotocélula, que es una resistencia eléctrica sensible a la luz y cuyo valor es de pocos ohmios cuando hay luz incidiendo en ella y muy alta, de varios mega ohmios sin la presencia de luz (Fotorresistor, 2020).



Figura 2 - 1. Fotocélula de cadmio.

Fuente: <https://www.venamet.com/producto/fotocelula-de-cadmio-honeywell-c554a1463-2/>

Se instalan en el ventilador de manera que la luz que produce el fuego incida sobre la fotocelda como se observa en la figura 3 - 1.

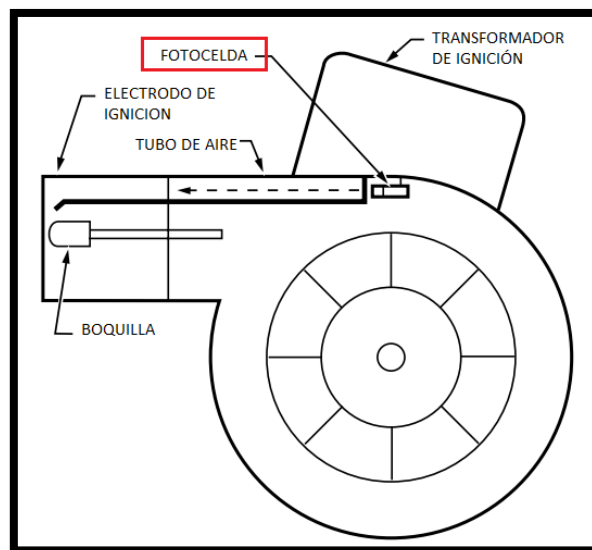


Figura 3 - 1. Posición de la fotocelda en un ventilador.

Fuente: <https://www.venamet.com/wp-content/uploads/2019/06/c554a1463.pdf>

1.4.2 Sensor de Temperatura Termopar

Es un sensor de tipo generador, ya que produce una señal eléctrica, función de la temperatura, debido a la energía térmica que está midiendo. Están basados en el efecto Seebeck, el efecto Peltier y en el efecto Thompson (Areny, 2005, p. 273). El termopar se construye con dos cables conductores hechos de distintos metales. Los cables se sueldan para crear una junta. Mientras la temperatura varía desde la junta hasta el final de los conductores, aparece un voltaje a través de la junta (Wu, 2018, p. 3).

1.4.2.1 Tipos de Termopares

Una sola letra se designa para identificar la construcción de cada tipo de termopar. Las propiedades termoeléctricas de cada tipo están estandarizadas, y así se obtienen mediciones de temperatura repetibles (Wu, 2018, p. 4).

En la siguiente tabla se enlista las características de los termopares más comunes.

Tabla 2 -1: Tipos de termopares comunes

TIPO	CONDUCTOR DE METAL A (+)	CONDUCTOR DE METAL B (-)	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	EMF SOBRE EL RANGO DE TEMPERATURA (mV)	COEFICIENTE DE SEEBECK ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ a 0°C)
J	Hierro	Constantan	-210 a 1200	-8.095 a 69.553	50.37
K	Chromel	Alumel	-270 to 1370	-6.458 to 54.886	39.48
T	Copper	Constantan	-200 to 400	-6.258 to 20.872	38.74
E	Chromel	Constantan	-270 to 1000	-9.385 to 76.373	58.70
S	Platino y 10% Rodio	Platino	-50 to 1768	-0.236 to 18.693	10.19

Fuente: Wu, 2018.

Realizado por: Saavedra Capa, Edison, 2020.

En la Figura 4 – 1. Se muestra las curvas de voltaje versus temperatura de tres tipos de termopares comúnmente utilizados, con la unión de referencia a una temperatura fijada en cero grados Celsius. Estas curvas son características muy importantes a tener en cuenta cuando se diseñan circuitos de acondicionamiento de la señal de salida de los termopares, en los que se requieren amplificadores de alta ganancia y poco ruido (Kester, Bryant y Jung, 1999).

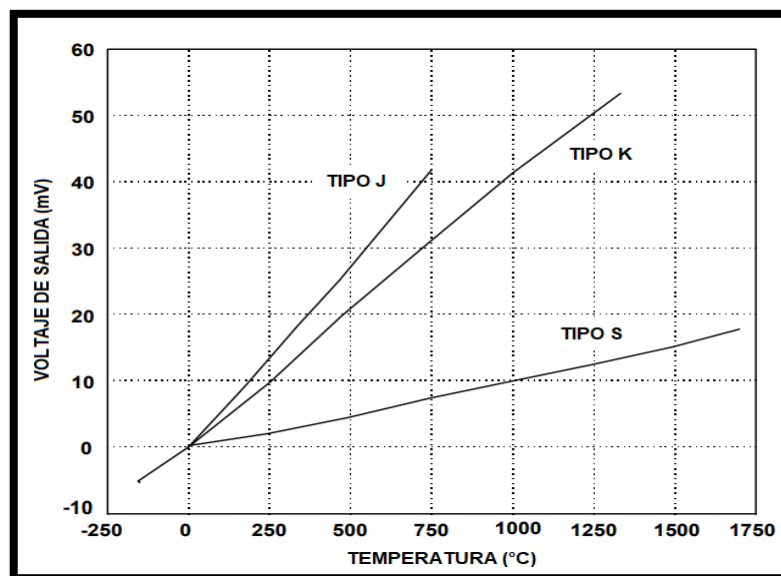


Figura 4 - 1. Voltajes de salida de termopares tipo J, K y S

Fuente: (Kester, Bryant y Jung 1999)

El coeficiente de Seebeck de un termopar representa como varía del voltaje de salida con un termopar, con un cambio de la temperatura en la unión de medición. En la Figura 5 – 1. se muestra las variaciones del coeficiente de Seebeck de los termopares tipo J, K y S, aun considerando una temperatura de la unión de referencia de 0°C (Kester, Bryant y Jung, 1999).

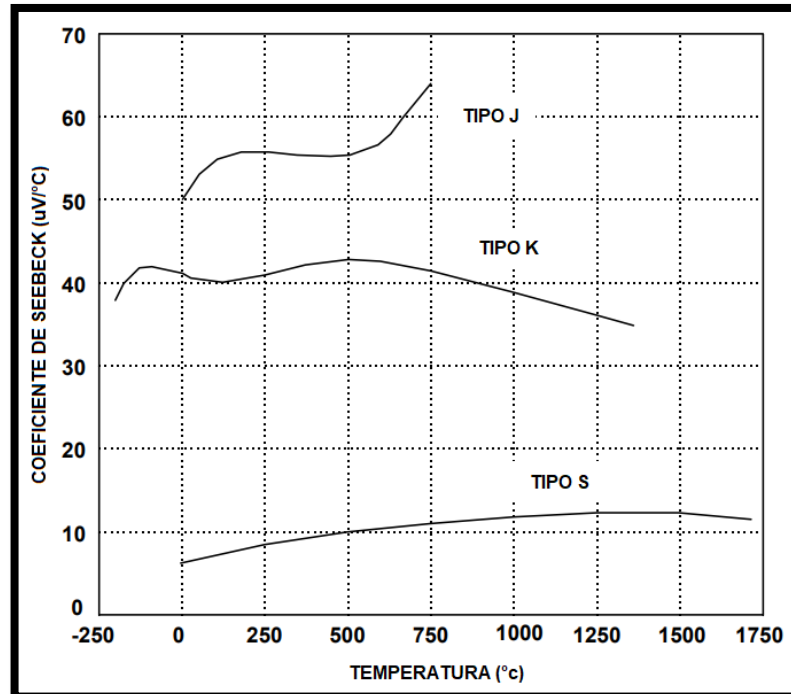


Figura 5 - 1. Coeficientes de Seebeck en función de la temperatura.
Fuente: (Kester, Bryant y Jung 1999)

1.4.2.2 Compensación de la unión fría

Un termopar puede medir la diferencia de temperatura entre las dos uniones de dos metales diferentes y no puede medir la temperatura absoluta de una de las uniones. Los voltajes de salida de los termopares están definidos con referencia a la temperatura de una unión de referencia de 0°C. Para tener mediciones exactas la unión de referencia debe estar a una temperatura bien definida que no necesariamente es de 0°C. Un sensor de temperatura de otro tipo se usa para establecer la temperatura de la unión de referencia y se usa para inyectar voltaje al circuito del termopar y así compensar la diferencia entre la temperatura real de la unión de referencia y la temperatura ideal, que usualmente es 0°C (Kester, Bryant y Jung, 1999).

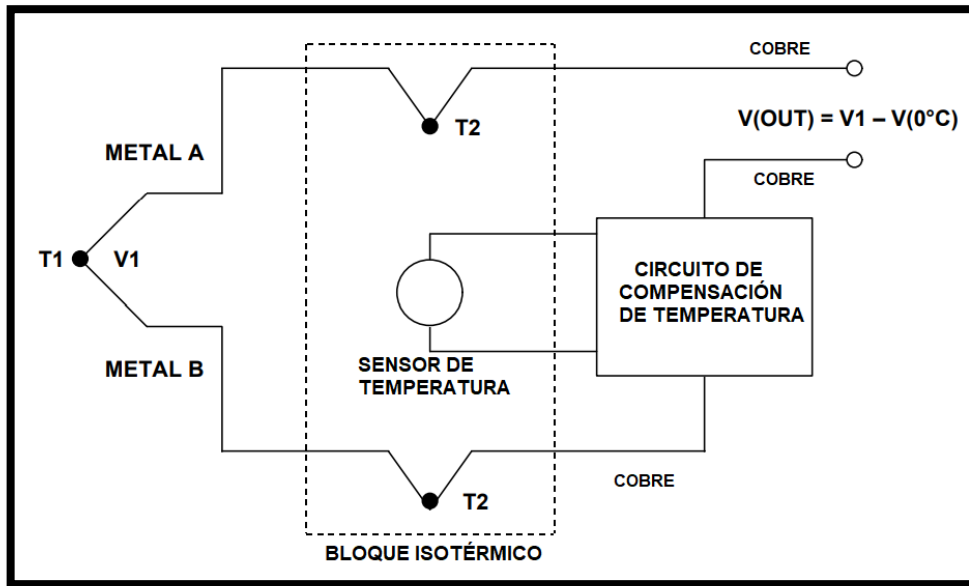


Figura 6 - 1. Esquema de la compensación de la unión fría.
Fuente: (Kester, Bryant y Jung 1999)

La unión de los metales del termopar con el cobre forma dos termopares que, si están a temperaturas diferentes, adicionan errores en la medición de la temperatura. Como se puede observar en la Figura 6 – 1. Se utiliza un bloque isotérmico para garantizar que ambas uniones con el cobre estén a la misma temperatura y se utiliza un sensor de temperatura para la compensación de la unión fría.

1.5 Sistemas de Control

Un sistema de control es una configuración o interconexión de varios elementos, de tal manera que esta configuración lleva al sistema a controlarse por sí mismo. En la figura se muestra un sistema $g(t)$ representado como un bloque, al cual se le aplica una señal de entrada $r(t)$ y se obtiene una respuesta $y(t)$. Existe una relación de causa y efecto entre la entrada y la salida del sistema, es decir que el proceso a controlar o la planta relaciona la salida con la entrada (Hernández Gaviño, 2010).

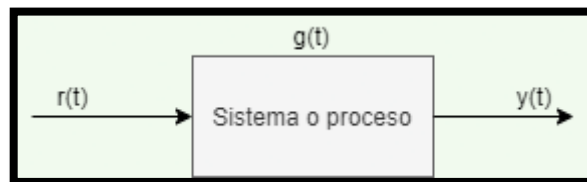


Figura 7 - 1. Representación de un sistema.
Fuente: (Hernández Gaviño 2010)

1.5.1 Sistemas de Control de Lazo Abierto.

Los sistemas de control de lazo abierto son aquellos en los cuales la acción de control no depende de la salida. Por lo general, en estos sistemas de control se utiliza un regulador o actuador para alcanzar una salida del sistema deseada. Estos sistemas funcionan basándose en el tiempo, como por ejemplo las lavadoras, hornos microondas, etc. (Hernández Gaviño, 2010).

1.5.2 Sistema de Control de Lazo Cerrado

En este tipo de sistemas la acción de control depende de la salida, comparan la salida del sistema obtenida mediante algún sensor con un valor de referencia. Por esto, los sistemas de control de lazo cerrado se los llama sistemas de control retroalimentados. La Figura 8 – 1 muestra un sistema de control retroalimentado (Hernández Gaviño, 2010).

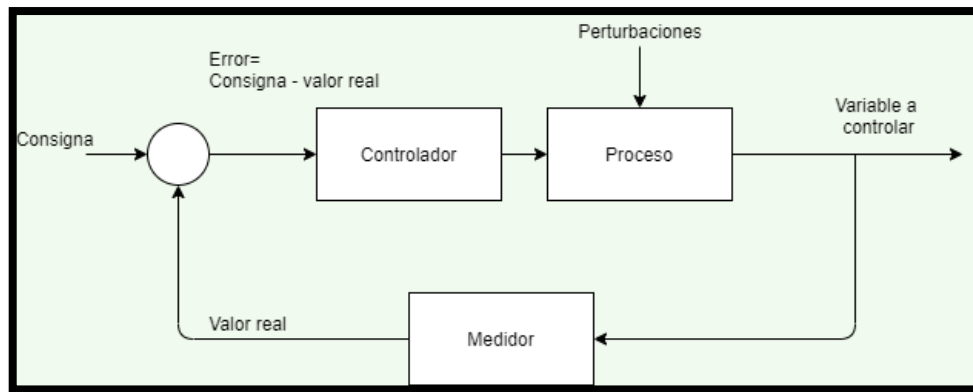


Figura 8 - 1. Diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado.
Fuente: (Bonilla Cisneros 2017)

Los Sistemas de Control de Lazo Cerrado derivan su valiosa exactitud de la retroalimentación de comparación. Un detector de error entrega una señal proporcional a la diferencia entre la referencia o ajuste y la retroalimentación de medición de la variable controlada. El sistema de control ajusta su salida hasta que se igualen referencia y retroalimentación y el error sea cero. Cualquier diferencia entre la salida real y la deseada producida por cambios en la carga, será automáticamente corregida en un sistema de control de Lazo Cerrado. Por medio de un diseño adecuado, el sistema puede hacerse relativamente independiente de entradas secundarias y cambios en características de componente (Sandoval y José, 1989, p. 4).

1.6 Métodos de control en sistemas de lazo cerrado.

En un sistema de control en lazo cerrado, el controlador examina la variable de proceso para después determinar la acción de control que lleve la variable controlado hacia la referencia.

En los sistemas de control de lazo cerrado se puede realizar una acción de control todo-nada, control proporcional, control derivativo e integral, que se pueden usar de manera individual o de manera combinada. De la combinación de estas se obtienen los tipos de sistema de control que se detallan en la siguiente tabla (Bonilla Cisneros, 2017).

Tabla 3 -1: Tipos de sistemas de control automático.

Sistemas de control	Acciones de control
Discontinuos	Control todo o nada
	Control de varias posiciones
Continuos	Control proporcional
	Control proporcional integral
	Control proporcional derivativo
	Control proporcional integral derivativo

Fuente: (Bonilla Cisneros 2017)

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

1.7 Sistemas de control discontinuos

1.7.1 Control todo o nada

La acción de control todo o nada es uno de los controles discontinuos más comunes. La señal de control alterna entre dos estados discretos. La señal de control se mantiene en su valor máximo mientras la variable de proceso con alcance el valor de referencia y una vez que el valor de la variable de proceso alcance el valor de referencia, la señal de control cambia al su valor mínimo. En la figura se puede observar un diagrama de tiempo que muestra el comportamiento de las variables de este tipo de sistemas de control. La variable controlada oscila alrededor de la referencia con una amplitud y frecuencia que depende directamente de la rapidez de respuesta del sistema. Este tipo de control se recomienda en sistemas de respuesta lenta.

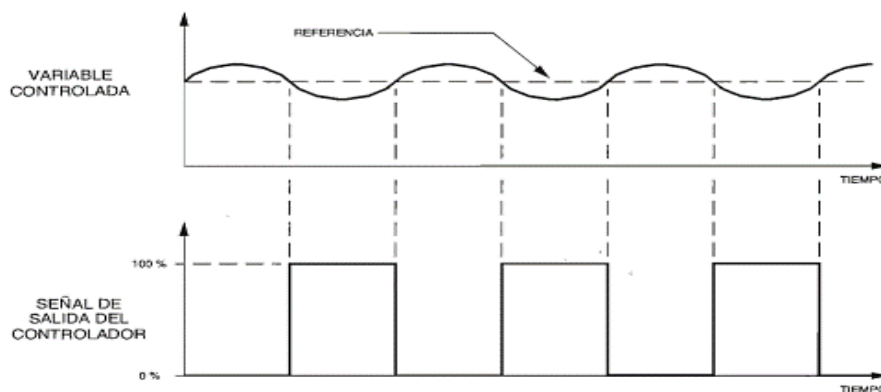


Figura 9 - 1. Diagrama de tiempo de las señales que intervienen

Fuente: <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/ManualesIng/EquipoDicacticoT-O.pdf>

1.8 Controlador Lógico Programable (PLC)

Un Controlador Lógico Programable es una computadora industrial que recibe señales desde dispositivos de entrada y después evalúa esas entradas con un programa almacenado en la memoria del PLC y genera señales salidas para controlar otros dispositivos (Kamel y Kamel, 2014, p. 28).

Los PLC tienen la ventaja de que no es necesario volver a conectar los cables de los dispositivos de entrada y salida para modificar el sistema de control; basta con que el programador cambie las instrucciones apropiadas en el programa. Los PLC son como computadoras pero pueden ser usados como controladores debido a que tienen ciertas características, como lo son:

- Son robustos y pueden resistir vibraciones, temperatura, humedad y ruido.
- La interfaz para las entradas y salidas está dentro del controlador.
- Son fáciles de programar (Bolton, 2013, p. 467).

1.8.1 Arquitectura de los PLC

La estructura interna de un PLC está compuesta básicamente por una unidad central de procesamiento (CPU), memorias y circuitos de entrada/salida. En la CPU se realiza el control y procesamiento de todas las operaciones del PLC a una velocidad determinada por un temporizador, que también sirve para la temporización y sincronización de los elementos del sistema. En un PLC se realiza la comunicación entre la CPU, memoria y unidades de entrada/salidas por medio de un sistema de buses, como se puede observar en la figura 9 - 1. Los elementos de memoria que se pueden encontrar en la arquitectura de un PLC son: una ROM en donde se guardan permanentemente información del sistema operativo, una RAM correspondiente al programa del usuario y por último una memoria buffer temporal para los canales de entrada y salida (Bolton, 2013, p. 468).

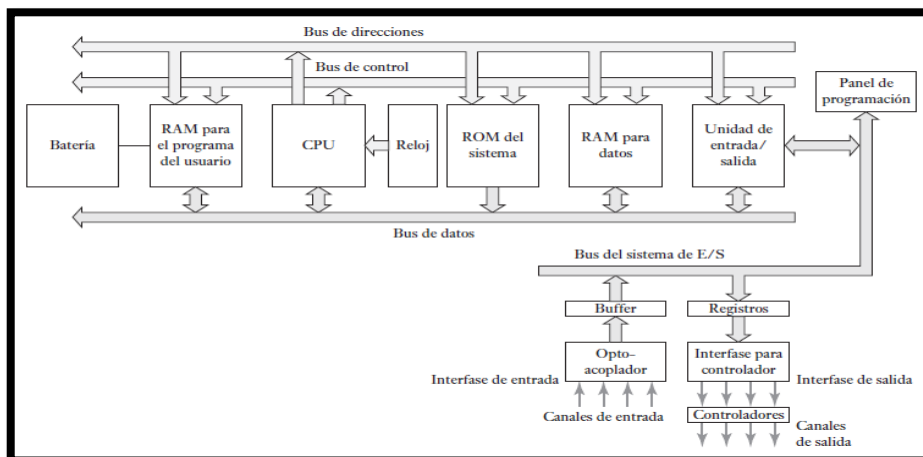


Figura 10 - 1. Arquitectura de un PLC.
Fuente: (Bolton 2013)

El PLC se comunica con el mundo externo a través de la unidad de entrada/salida. Las interfaces de entrada y salida cuentan con aislamiento, que generalmente se logran con optoacopladores, y acondicionamiento de manera que las señales externas se pueden conectar directamente. La señal de entrada compatible con el microprocesador generalmente es de 5V pero con aislamiento y acondicionamiento, según el tamaño del PLC se puede encontrar señales de entrada de 5V, 24V, 110V y 240V. Las salidas del PLC pueden ser de tipo relevador, transistor o tipo triac (Bolton, 2013, p. 469).

1.8.2 Tipos de PLC

Según como presenten sus componentes se puede encontrar dos tipos de PLC. Tipo compactos y PLC de tipo modular.

1.8.2.1 PLC Tipo Compactos

Los PLC de tipo compactos vienen como una caja pequeña con todos sus componentes, suministro de potencia, procesador, memoria y unidades de memoria, integrados en una sola unidad. Es común encontrar PLC compactos con 6, 8, 12 o 24 entradas y 4, 8, 16 salidas y memorias que pueden almacenar de 300 a 1000 instrucciones. Por ejemplo el PLC de la familia MELSEC FX3U se puede encontrar con 6, 8, 12 o 24 entradas y 4, 8 o 16 salidas y es capaz de almacenar de 300 a 1000 instrucciones.

1.8.2.2 PLC Tipo Modulares

Los PLC tipo modulares pueden tener un gran número de entradas y salidas. Los módulos están diseñados para ser insertados en racks y pueden servir para el suministro de potencia, el procesador, entradas, salidas, etc. se puede tener varios módulos que se combinan según una aplicación particular. Por ejemplo el PLC SIMATIC.

1.9 Norma IEC 61131-3

Esta norma busca estandarizar los lenguajes de programación en la automatización industrial. Especifica la sintaxis y semántica de un lenguaje de programación, incluyendo el modelo de software y la estructura del lenguaje (García, 2015).

1.9.1 Lenguajes de programación según la norma IEC 61131-3

La norma recoge cinco lenguajes de programación, los cuales se enlistan a continuación:

1.9.1.1 Lista de Instrucciones

Es el lenguaje más antiguo y actualmente el menos usado. Basado en el lenguaje ensamblador de los micro-controladores. Conlleva un elevado grado de dificultad, lo que ha ocasionado que sea poco conocido por los técnicos. Por otro lado ofrece un mayor grado de optimización de funcionamiento, ya que es bastante cercano al lenguaje nativo del controlador (Pineda Sánchez, 2013).

1.9.1.2 Lógica de Contactos, o Lenguaje de Escalera (Ladder)

Está basado en los diagramas de automatización con relés y contactores, por lo que ha resultado bastante familiar para técnicos electricistas. Ésta relativa sencillez es lo que no lo hace adecuado para automatizaciones complejas, en las que son necesarios elevados grados de matemáticas, de proceso y almacenamiento de datos y que pueden presentar elevadas necesidades de comunicación y de control distribuido (Pineda Sánchez, 2013).

1.9.1.3 Lenguaje de Bloques Funcionales

Los Bloques Funcionales proporcionan al usuario componentes necesarios para la automatización que sería muy complicado programar, ya que encapsula algoritmos de control muy complejos en módulos reutilizables. Los bloques funcionales son proporcionados por los diferentes fabricantes el software de programación del PLC, algunos ejemplos pueden ser temporizadores y contadores (Pineda Sánchez, 2013).

1.9.1.4 Texto Estructurado

Es un lenguaje de programación de alto nivel parecido a los lenguajes de programación de computadora “C” o “C++”. Es un lenguaje que puede parecer complejo pero también puede llevar a ser bastante potente para el técnico electricista (Pineda Sánchez, 2013).

1.9.1.5 Gráfico Secuencial de Funciones

Conocido como “SFC” (Sequential Function Chart) está basado en el lenguaje GRAFCET. Es un lenguaje gráfico optimizado para la resolución de problemas de automatización en los que se necesita ejecutar maniobras de carácter secuencial (Pineda Sánchez, 2013).

1.10 Transmisores de señal

Un transmisor de señal es definido como: “Un dispositivo que traduce la señal producida por un elemento sensor primario en una señal de instrumentación estandarizada, tal como una presión de aire de 3-15 PSI o una corriente eléctrica DC de 4-20mA, la cual va a ser transportada hacia un dispositivo indicador, un dispositivo controlador, o ambos”. Por ejemplo una termocupla entrega una señal dependiente de la temperatura en el orden de los microvoltios, ésta señal debe ser transformada en una señal apropiada para que pueda ser usada por un controlador como un PLC (Kuphaldt, 2008, p. 526).

1.11 Actuadores

Un actuador es un dispositivo que recibe la señal de salida de un controlador e influye directamente en el proceso, por ejemplo, un calentador eléctrico, una válvula de control, etc. Se le conoce también como “Elemento Final de Control” (Kuphaldt, 2008, p. 499).

1.11.1 Válvulas de Control

Las válvulas de control sirven para controlar el flujo desde una parte, hacia otra parte, de un sistema hidráulico. Por ejemplo, sirven para limitar la velocidad máxima de cilindros y motores, limitan la potencia máxima que se suministra a sub-circuitos, controlando el flujo hacia ellos, o proporcionalmente regulan el flujo de una bomba a varias ramas de un circuito (Jelali y Kroll, 2012, p. 11).

1.12 Ventilador Centrífugo

La función de ventilador en un quemador industrial es proporcionar un flujo de aire estable, necesario para lograr una combustión completa. Un ventilador centrífugo se denomina así porque el flujo de aire que entrega es tangencial al movimiento del eje del motor y también la salida de flujo de aire es perpendicular a la salida (Lopez, 2017).



Figura 11 - 1. Imagen de un ventilador centrífugo.
Fuente: <https://www.jumia.com.eg/ingco-blower-400-w-17563231.html>

1.13 Bomba Hidráulica

Las bombas hidráulicas son dispositivos que convierten la energía mecánica en energía hidráulica. Normalmente son accionados de manera rotacional. Son construidas de diversas formas, tamaños, mecanismos de bombeo y usualmente son de tipo “desplazamiento positivo”. El desplazamiento o salida de flujo, de una bomba, es lo mismo que el volumen de fluido hidráulico que es transportado por una sola rotación del eje de accionamiento del motor (Jelali y Kroll, 2012, p. 26)

1.13.1 Bomba Sumergible de Combustible.

Las bombas sumergibles de combustible eléctricas son las encargadas de bombear el combustible y son de gran importancia en los sistemas de inyección en los automóviles. Fueron introducidas en los años 80 para reemplazar a las bombas de accionamiento mecánico (Donaire, 2020).

1.13.1.1 Funcionamiento

Funciona gracias a un diafragma, es accionada gracias a un solenoide que atrae una varilla de hierro y empuja el diafragma hacia abajo, con lo que provoca que el combustible ingrese a la recámara. Al llegar al final del recorrido se corta la alimentación al solenoide y se interrumpe el tirón sobre el diafragma. La varilla regresa a su posición inicial, por acción de un resorte de retorno, para que los contactos se cierran y esto hace que el solenoide empuje la varilla y el diafragma de nuevo (Donaire, 2020)

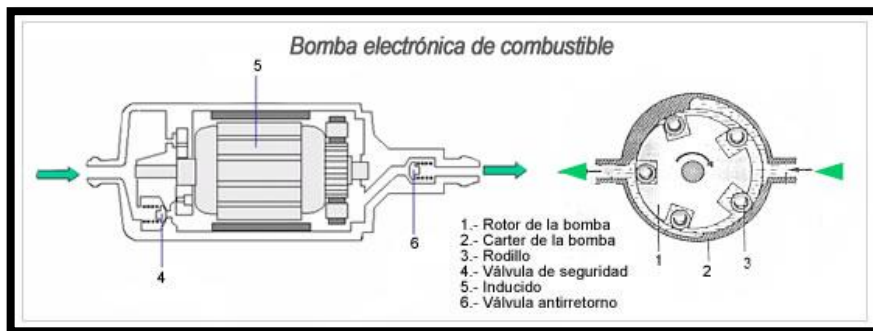


Figura 12 - 1. Bomba de combustible

Fuente: <https://www.ro-des.com/mecanica/bomba-de-gasolina-que-es-y-como-funciona/>

1.13.1.2 Características

Las bombas de combustible eléctricas se suelen instalar en el interior del depósito de combustible, se alimentan con 12v y tienen como ventajas su ligereza, su tamaño reducido y no se sobrecalientan al estar sumergidas en el tanque. Son capaces de trabajar con presiones entre 3 y 4.5 bares, aunque las hay que alcanzan 5.8 bares (Donaire, 2020).

1.14 Bobinas de Encendido.

Se puede encontrar bobinas de encendido de muchas formas y tamaños, pero su función siempre es la de generar un alto voltaje para producir una chispa. Las bobinas de encendido son un tipo de transformador compuestas por un bobinado primario de pocos cientos de vueltas, un circuito secundario de varios miles de vueltas y un núcleo de hierro. Cuando una corriente circula por el circuito primario se crea un campo magnético alrededor del núcleo de hierro. Cuando se interrumpe dicha corriente el campo magnético se colapsa se induce un elevado voltaje en el secundario, necesario para generar la chispa (Ignition Coil Diagnostics, 2012).



Figura 13 - 1. Varios tipos de bobinas de encendido.

Fuente: («Ignition Coil Diagnostics» 2012)

Las bobinas de encendido que funcionan en un automóvil están sometidas tensiones eléctricas, mecánicas y químicas muy elevadas. Deben cumplir con las especificaciones y características, que se especifican en la siguiente tabla.

Tabla 4 -1: Especificaciones y características de las bobinas de encendido.

Característica	Valores
Corriente primaria	6 a 20 A
Tiempo de carga	1.5 a 4 ms
Tensión secundaria	25 a 46 kV
Duración de la chispa	1.3 a 2 ms
Energía de la chispa	10 a 140 mJ
Corriente de la chispa	80 a 115 mA
Resistencia de bobinado primario	0.3 a 0.6 ohmios
Resistencia de bobinado secundario	5 a 20 kilo ohmios
Número de vueltas en el bobinado primario	100 a 250
Número de vueltas en el bobinado secundario	10000 a 25000

Fuente: («Componentes de encendido BERU | BERU – Su Experto en Encendido» [sin fecha])

Realizado por: Saavedra E. 2020.

1.15 Tablero de Control

Según la NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC en su capítulo 15 de INSTALACIONES ELECTROMECAÓNICAS publicada en enero de 2013, en el índice 15.1.6.0.1. define a los tableros como: “equipos eléctricos de una instalación, que concentran dispositivos de protección y de maniobra o comando, desde los cuales se puede proteger y operar toda la instalación o parte de ella y deben proveer un alto nivel de seguridad y confiabilidad en la protección de personas e instalaciones” (NEC, 2013, p. 27).

En ésta misma norma se clasifica a los tableros y en el índice 15.1.6.1.1.4. Se define a los tableros de control o de comando como: “tableros que contienen dispositivos de protección y de maniobra o únicamente dispositivos de maniobra y que permiten la operación de grupos de artefactos, en forma individual, en subgrupos, en forma programada o manual. Aquí se incluyen los tableros arrancadores para motores o los tableros tipo centro de control de motores” (NEC, 2013, p. 28)

1.16 Interfaz Humano Máquina – HMI

Una HMI es un medio por el cual la persona puede monitorear y ajustar los valores de ciertas variables dentro de un proceso. Las pantallas HMI se programan para leer y escribir datos vía una red digital hacia uno o más PLCs. Con objetos gráficos se imitan indicadores y conmutadores del mundo real, y así proveer una interfaz familiar al personal de operaciones. La tarea de

programar un HMI consiste en crear una base de datos de nombres etiquetas y después dibujar la pantalla para ilustrar el proceso con el nivel de detalle como necesite el operador (Kuphaldt, 2008, p. 851).

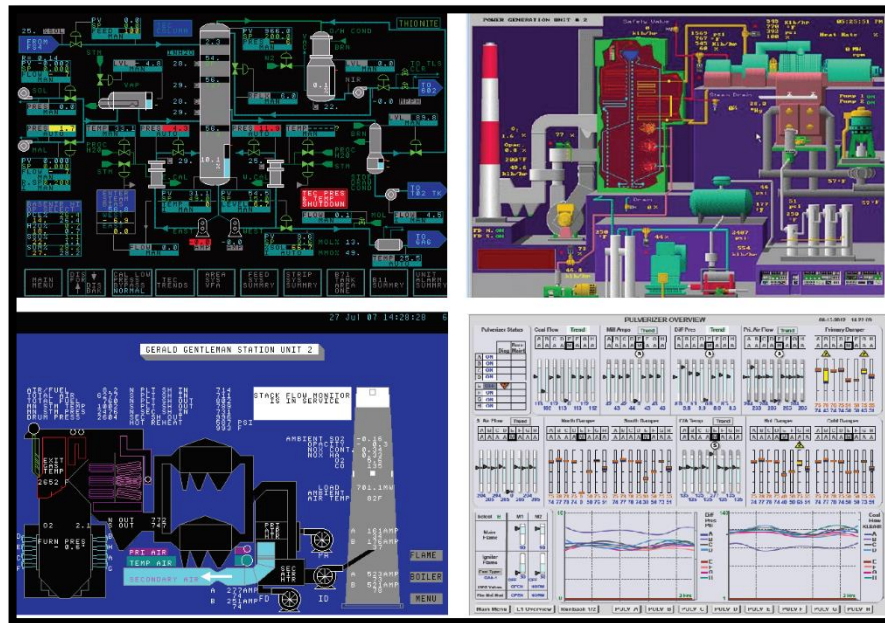


Figura 14 - 1. Ejemplos de interfaces HMI.
Fuente: (Hollifield 2020a)

En el mercado hay disponibles pantallas HMI de varios fabricantes, cada una con su correspondiente software para programar los controles e indicadores de la interfaz.

1.16.1 Estándar ISA-101

El Estándar ISA-101 es un documento que trata más del proceso de creación y operación de una Interface Humano Maquina que de indicar qué es una buena o mala interface HMI. El documento se comenzó a desarrollar en octubre del 2008. En junio de 2014 un borrador fue enviado al comité de la ISA-101, pero fue regresado con comentarios que debían ser corregidos. En marzo del 2015 el documento corregido fue enviado al comité y en agosto de 2015 fue publicado (Hollifield, 2020b).

El Estándar ISA-101 no brinda una lista de pasos a seguir para que un diseñador desarrolle una HMI de alto rendimiento. El documento organiza en etapas una serie de pautas que pueden ser de ayuda en éste proceso de desarrollo. En la primera etapa se define la HMI que se va a desarrollar, se especifica todo lo referente al dispositivo con el que se trabajará detallando resolución, funcionalidad y conectividad. La segunda etapa consiste en conocer el proceso del se va a realizar una adquisición de datos y sobre el cual se tomará acciones de control a través de la interface HMI. Con un diagrama P&ID se puede obtener información de los equipos que componen el proceso y el flujo de información durante su funcionamiento. La tercera etapa consiste en acudir

a los documentos desarrollados por los colaboradores del estándar ISA-101 en donde se detallan las fases de desarrollo que componen el ciclo de vida de una HMI (Bohórquez et al., 2019).

1.16.2 Modelo de Ciclo de Vida

El estándar ISA-101, establece un modelo de ciclo de vida para el desarrollo y gestión una interface HMI. En la Figura 19 – 1 se muestra el ciclo de vida de una HMI, donde se puede observar dos puntos de entrada para el ciclo de vida: el primero para cuando se va a desarrollar un sistema nuevo o cambios mayores en un sistema heredado y el segundo para cuando se va a realizar cambios en los displays. También se puede observar dos pasos de mejora continua (Armando Morales Sánchez, 2019).

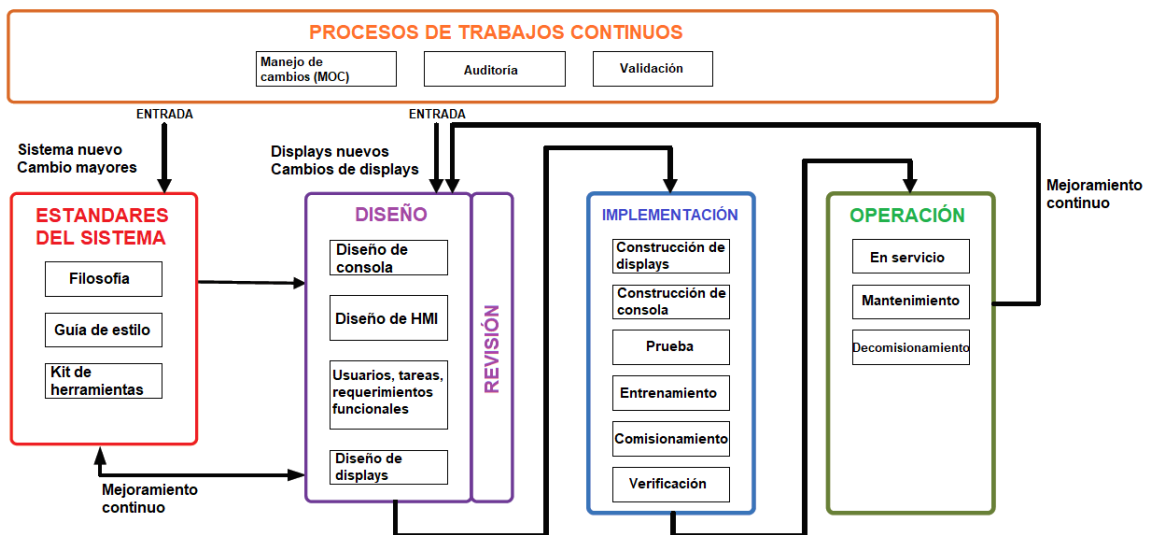


Figura 15 - 1. Modelo de ciclo de vida para el desarrollo y gestión de una HMI.
Fuente: (Hollifield 2020b)

1.16.2.1 Estándares del Sistema

Ésta primera etapa del ciclo de vida incluye el desarrollo de la filosofía de la HMI, la cual debe tener en cuenta factores humanos como requerimientos funcionales, normas, prácticas de trabajo y seguridad, que deben guiar en el diseño y gestión de la HMI (Armando Morales Sánchez, 2019).

La guía de estilo consiste en desarrollar una plantilla de la HMI teniendo en cuenta los conceptos de la filosofía y un esquemático del proceso que se controla en el que se especifique la relación entre los distintos elementos, la información relevante, información de alarmas y seguridad (Bohórquez et al., 2019).

El desarrollo del kit de herramientas implica documentar los elementos necesarios para el diseño de la HMI, como el software a utilizar, el entorno de programación, junto con información del

proceso como alarmas y modos de operación. Teniendo en cuenta siempre la filosofía de diseño y la guía de estilo (Bohórquez et al., 2019).

1.16.2.2 Diseño

La etapa de diseño de una HMI se compone de diseño de la consola, que trata de la configuración del micro-entorno del operador; diseño de la HMI, donde se selecciona la plataforma de control, sistema operativo, roles de usuario y seguridad; requerimientos funcionales de usuarios y tareas, donde se indican las funciones, usuarios primarios, usuarios secundarios, condiciones de operación normales y anormales (Armando Morales Sánchez, 2019).

1.16.2.3 Implementación

En esta etapa se utilizan los resultados obtenidos en las etapas anteriores para integrar la HMI en el software y hardware. Los procesos que componen esta etapa son: construcción de pantallas, construcción de consola, pruebas, capacitación, comisionamiento y verificación (Armando Morales Sánchez, 2019).

En la etapa de implementación del ciclo de vida se evalúa cómo el usuario ve la información en pantalla, se determina si ésta es precisa y requerida, se contemplan los resultados obtenidos en pruebas y el sistema HMI resultante será materia de capacitación para el personal que intervendrá en él (Bohórquez et al., 2019).

1.16.2.4 Operación

Esta etapa está constituida por los procesos de puesta en servicio, el mantenimiento y decomisionamiento. La puesta en servicio se da cuando se determina que se ha cumplido con todos los requisitos mediante pruebas con conexión de la HMI con el proceso. En el mantenimiento de una HMI se realizan cambios según se requiera con las correspondientes copias de seguridad. El decomisionamiento es el proceso en el que se saca de servicio a una HMI (Bohórquez et al., 2019).

1.16.3 Principios Para Diseñar Apropiadamente Interfaces HMI

1.16.3.1 Mostrar Información en Lugar de Datos

El principio fundamental en el diseño de pantallas HMI de alto rendimiento es que los valores de las variables de un proceso se deben mostrar en un contexto informacional y no solo con simples indicadores numéricos esparcidos por la pantalla.

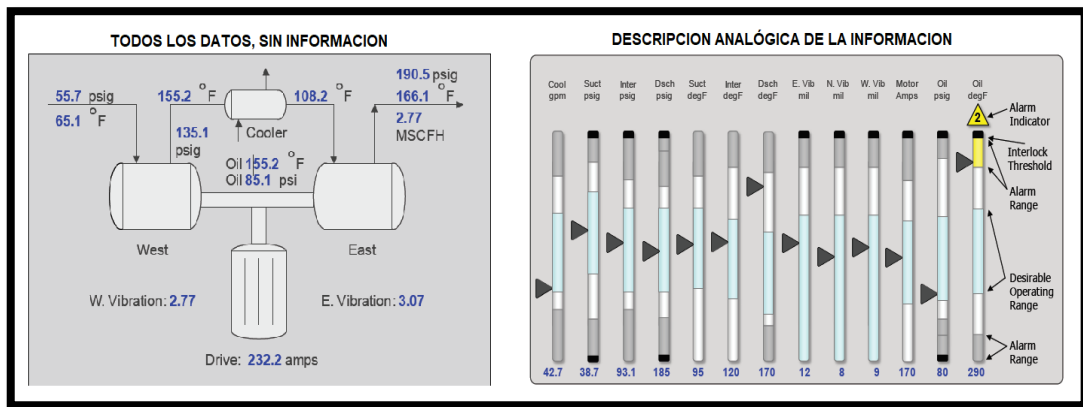


Figura 16 - 1. Ejemplos de una HMI con información sin contexto y una HMI con información contexto.
Fuente: (Hollifield 2020a)

En la Figura 20 - 1 se puede observar dos HMI para un mismo proceso de un compresor. En el HMI de la izquierda se muestra un esquema y se puede ver los valores reales de cada una de las variables, sin embargo, un operador no podría decir a simple vista si el compresor está trabajando con la mayor eficiencia posible o si está a punto de fallar. En el HMI de la derecha se puede observar un conjunto de indicadores analógicos que presentan las variables del proceso de una manera más efectiva. Con una sola mirada a los indicadores analógicos, el operador puede decir si alguna de las variables está fuera del rango normal, por cuanto y la proximidad de la lectura a ambos rangos de alarma (Hollifield, 2020a).

1.16.3.2 Uso Apropiado de Colores

El color no debe ser usado como único diferenciador de una condición o estado importante. Se debe usar una limitada paleta de colores, distinguibles entre sí. Los colores brillantes se usarán para llamar atención a situaciones anormales, colores como el rojo o amarillo brillante sólo se usan para describir condiciones de alarma y no para cualquier otro propósito. Para describir condiciones de operación normales no se usarán colores saturados brillantes, tales como el rojo o el verde para bombas, equipos, válvulas y objetos similares (Hollifield, 2020a).

En la tabla se muestra una paleta funcional de colores, no debe haber demasiados colores y todos deben ser fácilmente distinguibles.

Tabla 5 -1: Ejemplo de una paleta de colores funcional en el diseño de HMI

Color	Valores RGB	Muestra	Usos Definidos
Gris	213,213,213		Fondos de pantalla
Blanco	255,255,255		Para resaltar objetos pequeños
Gris Claro	243,243,243		Indicador de encendido para equipos
Gris	136,136,136		Indicador de apagado para equipos
Gris Oscuro	74,74,74		Texto, líneas de proceso menores
Negro	0,0,0		Texto y etiquetas, líneas principales de proceso
Azul Oscuro	0,0,215		Valores de proceso, salidas y modos de controladores, líneas en gráficos de tendencias
Verde Oscuro	0,128,0		Valores de consigna de controladores y otras entradas, líneas en gráficos de valores de consigna
Verde Claro	153,255,102		Posible verde tenue para algunos resaltados específicos
Azul Claro	187,224,227		Rangos o condiciones de operación deseados
Cian	0,255,255		Nivel en contenedores, líneas de tendencia
Café	204,102,0		Líneas de tendencia, indicador de posición de retroalimentaciones
Rosado	255,153,204		Posible rojo tenue para algunos indicadores específicos
Rojo	255,0,0		Nivel máximo, alarma de prioridad uno
Amarillo	255,255,0		Alarma de prioridad dos
Naranja	255,102,0		Alarma de prioridad tres
Magenta	255,0,255		Alarma de prioridad cuatro
Magenta Oscuro	204,0,102		Líneas de tendencia

Fuente: (Hollifield 2020a)

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

1.16.3.3 *Mostrar una Jerarquía*

En una HMI de alto rendimiento se debe notar una jerarquía en el despliegue de las pantallas que lo componen, de manera que progresivamente va exponiendo todos los detalles de un proceso.

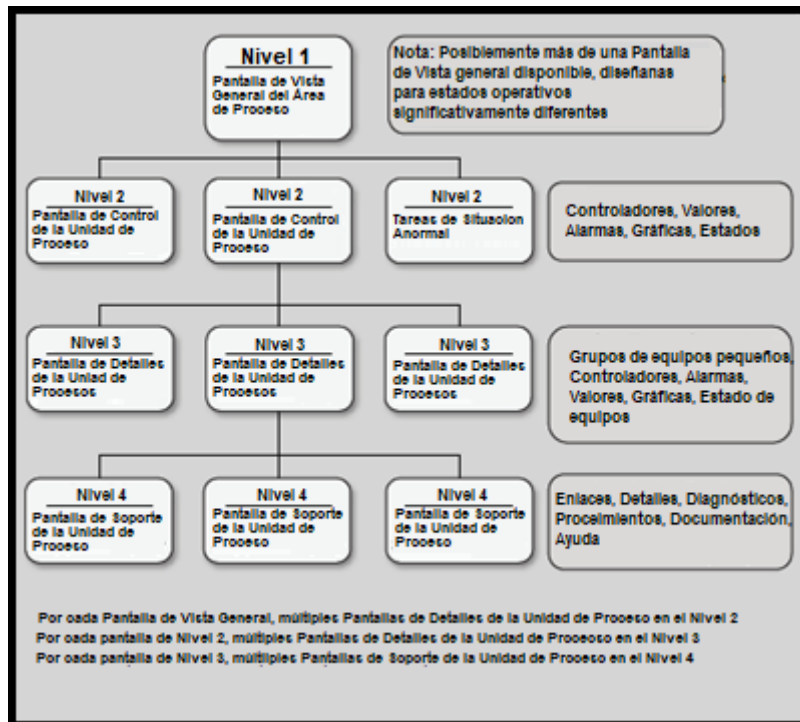


Figura 17 - 1. Jerarquía de las pantallas de una HMI.

Fuente: (Hollifield 2020a)

Los niveles que conforman la jerarquía de una HMI de alto rendimiento se detallan a continuación:

- **Nivel 1 – Supervisión de Operación.**

Usualmente este nivel no se diseña para realizar acciones de control. Ofrece al operador una imagen entera de todo lo que abarca el control. Es un indicador general del proceso, muestra claramente su estado actual mediante los indicadores claves.

- **Nivel 2 – Unidad de Control.**

Existe una pantalla de Nivel 2 para cada unidad de operación principal. Se diseñan para contener toda la información y todos los controles requeridos para que el operador ejecute casi todas las operaciones asociadas a esa sección.

- **Nivel 3 – Unidad de Detalle**

Las gráficas proporcionan todos los detalles de una sola pieza de un equipo, se usan para diagnosticar detalladamente problemas. Una descripción mediante un esquema como un P&ID a menudo es deseable en el Nivel 3.

- **Nivel 4 – Pantallas de Soporte y Diagnóstico**

Las pantallas de Nivel 4 proveen mayores detalles de subsistemas, de componentes individuales o sensores. Brindan información miscelánea, lo más detallada posible (Hollifield, 2020a).

1.17 Comunicación RS-232

El estándar EIA/TIA-232C, comúnmente conocido como RS-232, es uno de los estándares de comunicación más simples que se encuentran en la industria. Las redes de comunicación RS-232 son de tipo “punto a punto” destinadas a conectar solo dos dispositivos. Se usa un conductor para transferir los datos en cada dirección. El respectivo voltaje de cada señal está referenciado a un conductor de “ground” común (Kuphaldt, 2019, p. 1052).

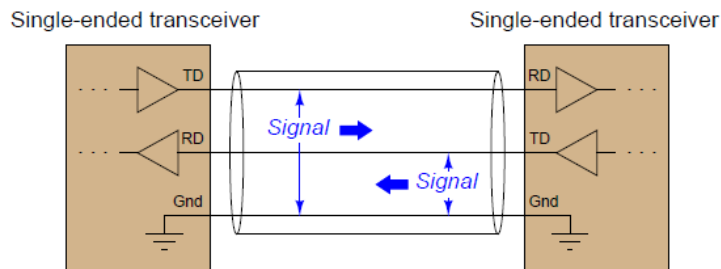
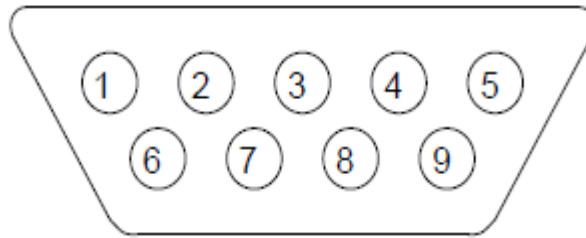


Figura 18 - 1. Red de comunicación punto a punto RS-232.
Fuente: (Kuphaldt 2019)

El estándar RS-232 define los niveles de voltaje de las señales digitales: cualquier señal más negativa que -3 voltios es considerada como un “uno” lógico y cualquier señal más positiva que +3 voltios es considerada como un “cero” lógico. El estándar RS-232 también especifica los conectores de los cables. El conector más comúnmente usado es el DB-9, de nueve pines. En la Figura 22 – 1 se puede observar los pines de un conector DB-9 para cualquier dispositivo DTE (Equipo Terminal de Datos) (Kuphaldt, 2019, p. 1053).



Número de pin	Asignación	Abreviación
1	Detección de portador	CD
2	Datos recibidos	RD
3	Datos transmitidos	TD
4	Terminal de datos lista	DTR
5	Tierra de señal	<u>Gnd</u>
6	Conjunto de datos listo	DSR
7	Solicitud para enviar	RTS
8	Limpiar para enviar	CTS
9	Indicador de anillo	RI

Figura 19 - 1. Pines de conector DB-9.

Fuente: (Kuphaldt 2019)

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico de la Implementación de un Sistema de Control en Lazo Cerrado para el Control de Temperatura en un Horno Industrial de Fundición de Aluminio, para la empresa de fundición y mecanizado FUNDYMEC.

Se presenta el diseño e implementación de un sistema de control realimentado, mostrando los distintos dispositivos que lo componen así como sus características y justificando su elección. Se implementa un controlador programado en PLC que va a actuar sobre la dosificación de combustible a un quemador, mostrando los pasos, comandos y registros utilizados. Además en este capítulo se presenta el diseño e implementación un sistema de inyección del combustible y el diseño de una interface HMI.

Para construir el sistema de control mediante dispositivos y equipos electrónicos e implementar un HMI para monitorear el proceso automatizado de fundición es necesaria un tipo de investigación aplicada, ya que implica la utilización de la información recopilada sobre el sistema a controlar y la puesta en práctica de los conocimientos estudiados en la carrera, sobre sistemas de control, programación de PLC, sensores e instrumentación, etc.

2.2 Diseño del sistema de control

Es necesario conocer el proceso de fundición de aluminio para implementar un dispositivo tecnológico que lo automatice. Actualmente en la empresa existe un sistema que quema el diésel de manera segura pero que tiene algunos inconvenientes al momento de arrancar el quemador. Por ejemplo, el quemador está montado sobre una mesa de metal a la que hay que mover para introducir un papel encendido y que cuando se encienda la bomba se dé ignición del combustible diésel.

El sistema actual se lo controla de manera manual mediante un interruptor, con el que se enciende y apaga la bomba sin ningún tipo de realimentación de la temperatura. Se va a implementar un sistema de control como el que se observa en la Figura 4 – 2 que consiste en un lazo cerrado simple con realimentación negativa de la temperatura del horno.

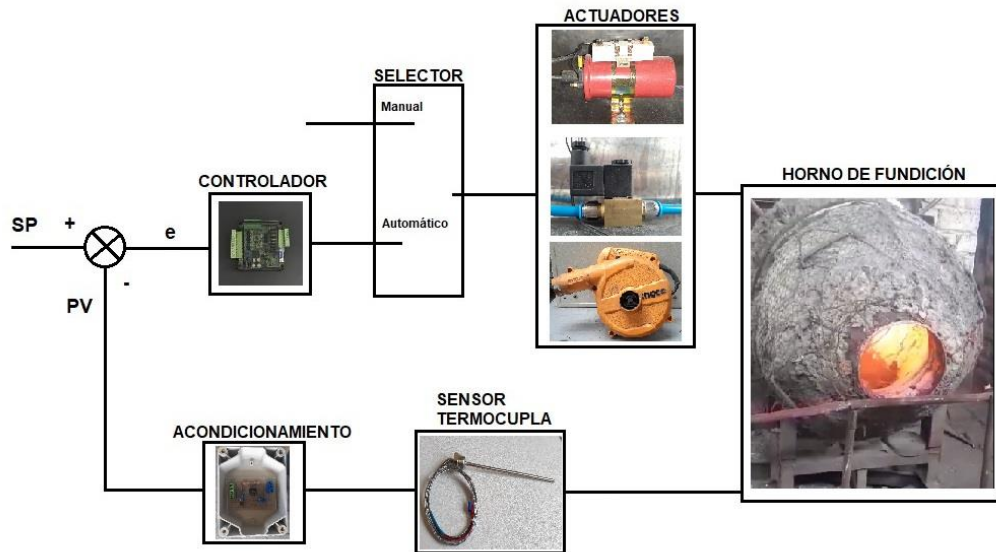


Figura 1 - 2. Esquema del sistema de control en lazo cerrado
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E. 2020

Con ayuda de una pantalla HMI se especifica el valor de SETPOINT al cual se desea llevar la variable del proceso, es decir la temperatura del horno.

Siempre que con el selector se escoja el modo de control automático, el controlador, es decir un PLC, ejercerá las acciones de control de manera autónoma. Cuando con el selector se seleccione el modo de control manual, será el operador el que ejerza las acciones de control a través de la pantalla HMI.

La planta del sistema será el horno de fundición cuya temperatura va a ser nuestra variable de proceso y es la variable que deseamos controlar. El elemento mediante el cual se va a medir la temperatura es una termocupla tipo K cuya señal se debe someter a una etapa de acondicionamiento para poder realizar la comparación con el setpoint.

2.2.1 Controlador.

El controlador se debe seleccionar considerando las señales de entradas y salidas que se necesitan para automatizar un proceso industrial, además se debe considerar si puede conectarse a una pantalla HMI, así como el tipo de comunicación.

Los requerimientos de entradas digitales que debe cumplir el PLC se muestran en la Tabla 1 – 2. Se necesita que el PLC cuente con al menos cinco entradas digitales, dos pulsadores para el inicio y paro del proceso, un selector de dos posiciones con el que se selecciona el modo de funcionamiento del sistema de control y un sensor detector de llama.

Tabla 1 -2: Entradas digitales del PLC requeridas.

Requerimientos de Entradas del PLC		
Entrada	Símbolo	Función
1	INICIO	Pulsador con el que se inicia el proceso de control
2	PARO	Pulsador con el que se detiene el proceso de control
3	MODO MANUAL	Primera posición del selector correspondiente al modo manual de operación
4	MODO AUTOMÁTICO	Segunda posición del selector correspondiente al modo automático de operación
5	DETECTOR LLAMA	Sensor detector de llama con el que se determina si se ha encendido el combustible

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020

Las salidas digitales del PLC que se requieren se muestran en la Tabla 2 – 2. El PLC debe contar con al menos cinco salidas digitales, la primera para la activación de la bomba de combustible, la segunda para la activación de la electroválvula de combustible, la tercera para activar un arco eléctrico de ignición, la cuarta para encender las luces piloto y la quinta para activar un ventilador.

Tabla 2 -2: Salidas digitales del PLC requeridas.

Salida	Símbolo	Función
1	BOMBA DE COMBUSTIBLE	Salida digital utilizada para encender la bomba de combustible normalmente cerrada
2	VÁLVULA DE COMBUSTIBLE	Salida digital utilizada para activar la electroválvula de combustible normalmente cerrada
3	CHISPA DE IGNICIÓN	Salida digital utilizada para activar el arco eléctrico de ignición
4	LUCE PILOTO	Salida utilizada para encender las luces piloto de inicio y paro utilizando un contacto NO y un contacto NC de un relé.
5	VENTILADOR	Salida digital utilizada para encender el ventilador

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020

En un sistema de control retroalimentado es necesario una lectura de variable de proceso, por lo cual el PLC también debe contar con al menos una entrada analógica, para poder conectar el sensor de temperatura.

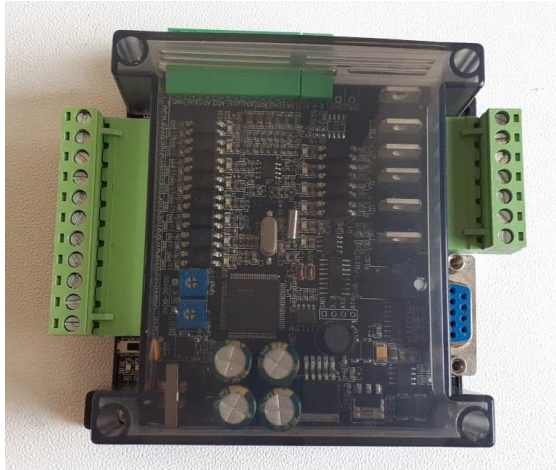


Figura 2 - 2. PLC FX3U 14MT 6AD2DA
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Se escoge un PLC de tipo compacto modelo FX3U 14MT 6AD2DA de la marca MITSUBISHI, como se puede ver en la Figura 2 - 2. Como se puede ver en la Tabla de características, el PLC cuenta con ocho entradas digitales, seis salidas digitales de tipo transistor, seis canales de entradas analógicas, dos salidas analógicas y carcasa para riel DIN. Se programa usando el software GX Developer.

Tabla 3 -2: Características de PLC FX3U 14MT 6AD2DA

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Voltaje de entrada	24 VDC
Entradas digitales	8
Salidas digitales	6, tipo transistor
Entradas analógicas	6, voltaje de 0 a 10v
Salidas analógicas	2, voltaje de 0 a 10v
Puertos de comunicación	RS232 y RS485

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.2.2 Actuadores.

2.2.2.1 Encendido por arco eléctrico

Para el encendido del horno se va implementar un circuito electrónico, diseñado con un transformador que va a generar un arco eléctrico que sea capaz de encender el diésel. Para generar un arco eléctrico, es necesario que circule corriente por el primario del transformador, la cual inducirá un campo magnético en el secundario y luego cortar el flujo de corriente en el primario para que colapse el campo magnético y se produzca un pico de tensión de varios miles de voltios en el secundario.

Se usa un circuito integrado NE555, en configuración astable para producir una señal de onda cuadrada con amplitud de 12 voltios que se usa para conmutar un transistor MOSFET IRF460N entre los estados corte y saturación, como se muestra en la Figura 1 – 2.

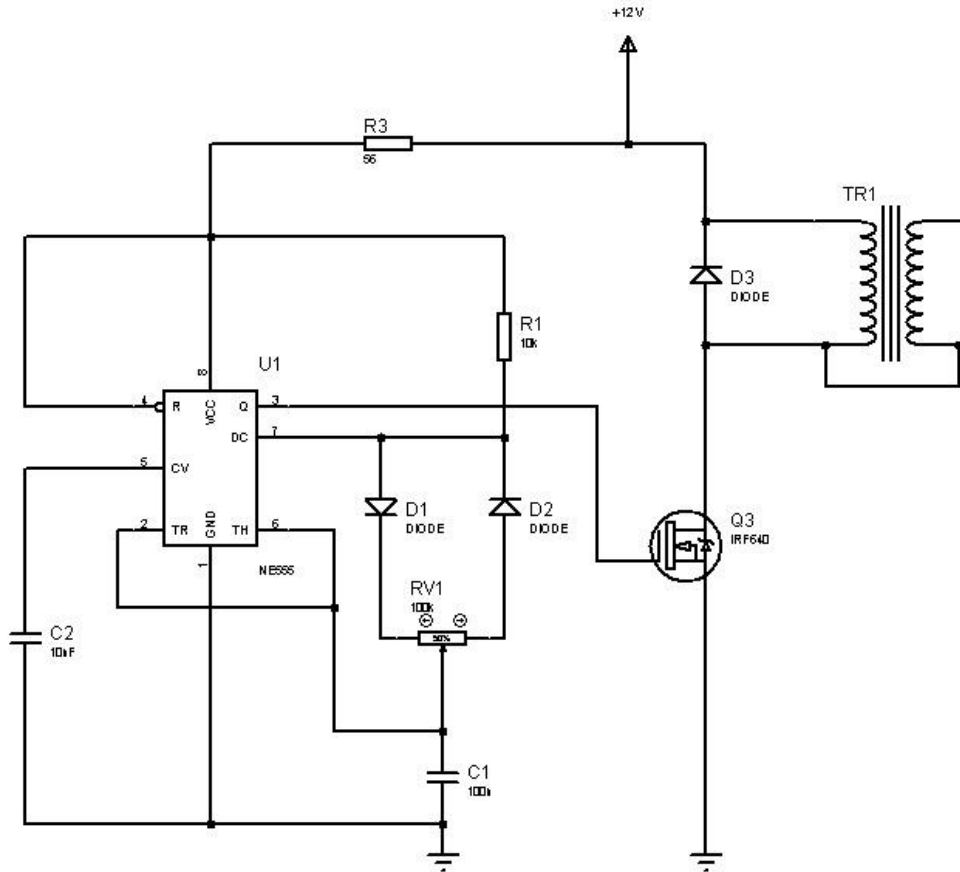


Figura 1 - 2. Circuito generador de arco eléctrico
Realizado por: Saavedra E. 2020.

El tiempo en alto de la onda cuadrada está determinado por el tiempo de carga de capacitor C1, el cual se carga a través de la resistencia R1 de 10k, el diodo D1 y el 50% del potenciómetro de 100k RV1. El tiempo en alto tiene un valor de:

$$t_1 = \ln(2) * R1 * C1$$

$$t_1 = \ln(2) * (60 \text{ k}\Omega) * (100 \text{ nF}) = 4.16 \text{ ms}$$

El tiempo en bajo de la onda cuadrada está determinado por el tiempo de descarga de capacitor C1, el cual se descarga a través del 50% de la resistencia variable RV1 de 100k y del diodo D2. El tiempo en alto tiene un valor de:

$$t_2 = \ln(2) * RV1 * C1$$

$$t_2 = \ln(2) * (100 \text{ k}\Omega) * (100 \text{ nF}) = 3.46 \text{ ms}$$

Entonces el periodo y la frecuencia de la señal cuadrada son de:

$$T = t_1 + t_2 = 7.62ms$$

$$F = 1/T = 131 Hz$$

Con un ciclo de trabajo de:

$$DT = \frac{t_1}{T} * 100\% = 54.6\%$$

El diodo D3 sirve para proteger al transistor MOSFET de picos de tensiones producidos por la bobina cuando se abre el circuito. Produce un camino para que la corriente, que se produce con la desconexión de la bobina, sea disipada por la resistencia de la bobina.

El transformador que proporciona el alto voltaje en nuestro sistema de ignición por arco eléctrico es una bobina de encendido universal utilizada en automóviles, de la marca PORTER INDUSTRIES. En la bobina de encendido viene marcado donde conectar el voltaje positivo y en el centro tenemos la salida de alta tensión. Además, esta bobina cuenta con una resistencia externa de 2 ohmios.

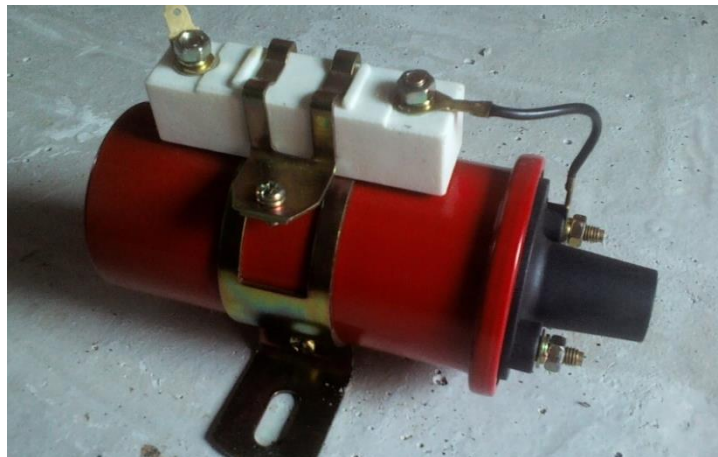


Figura 2 - 2. Bobina de encendido.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.2.2.2 *Electroválvula de combustible*

El elemento de actuador con el que se controla el paso de combustible es una electroválvula marca SHAKO, modelo PU220ARV-02N-S9, como se ve en la figura



Figura 3 - 2. Electroválvula de combustible SHAKO.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E. 2020

En la Tabla 4 - 2 se muestran las especificaciones técnicas de la electroválvula SHAKO PU220ARV-02N-S9 de combustible.

Tabla 4 -2: Especificaciones técnicas de electroválvulas PU220ARV-02N-S9

PARÁMETROS ELECTROVÁLVULA PU220ARV-02N-S9	
Tamaño del puerto	1 / 4 ”
Fluido	Aire comprimido, aceite ligero, agua
Presión de trabajo	0 ~ 7kgf/cm ²
Presión máxima	10kgf/cm ²
Material del cuerpo	Bronce forjado
Temperatura del fluido	-10 ~ 90 °C
Instalación	Cualquier dirección
Ciclo de trabajo	100% ED
Tipo de bobina	DIN
Grado de protección	IP65 (DIN 40 050)
Voltaje de operación	24 VDC
Tolerancia de voltaje	±10%
Consumo de potencia	4,8 W
Peso neto	255 g

Fuente: <https://www.shako.com.tw/pneumatic-solenoid-valve/PU220AR.htm>

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E. 2020.

2.2.2.3 Ventilador centrífugo

El elemento encargado de proporcionar el aire necesario para la combustión del combustible diésel es un ventilador centrífugo marca INCCO, como el que se observa en la Figura 5 – 2.



Figura 4 - 2. Ventilador centrífugo.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

A continuación, en la tabla se muestran las características con que cuenta este ventilador.

Tabla 5 -2: Características técnicas del ventilador.

CARACTERÍSTICAS DEL VENTILADOR CENTRÍFUGO INCCO	
Voltaje	110 - 120 V ~ 60 Hz
Potencia	600 W
Velocidad	0 – 16000 rev/min
Caudal	0 – 3.5 m ³ /min

Fuente: <https://incotools.com/products/100012>

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.2.3 Horno de Fundición.

El horno de fundición constituye la planta de nuestro sistema de control. Es de fabricación artesanal construida con acero, con una cubierta interna de cemento refractario y una cubierta externa de fibra de vidrio. Es de tipo rotatorio, cuenta con una boca principal por la que ingresa la flama producto de la combustión, otra boca por la que salen los gases producto de la combustión y una puerta lateral por la que se ingresa el aluminio que se va a fundir. Las dimensiones del horno son de 2 m de longitud, 1 m de diámetro, con una capacidad para 140kg de aluminio.



Figura 5 - 2. Horno de fundición de aluminio.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.2.4 *Sensor de Temperatura.*

El horno de fundición alcanza temperaturas de hasta 800 °C. El aluminio se funde a una temperatura de 660 °C y debido a estas temperaturas tan elevadas el sensor escogido para la medición de la temperatura es una termocupla tipo K, cuya señal de voltaje deberá ser acondicionada para poder ser utilizada en la entrada analógica del PLC.



Figura 6 - 2. Sensor de temperatura Termocupla tipo K.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.2.5 *Acondicionamiento.*

La señal de la termocupla tiene una resolución de aproximadamente 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, como se detalla en la Tabla 2 - 1 y en la Figura 5 - 1 del capítulo anterior. El Controlador PLC tiene dos entradas analógicas de 0 – 10v, por lo que se necesita un medio para acondicionar la señal de temperatura entregada por el sensor.

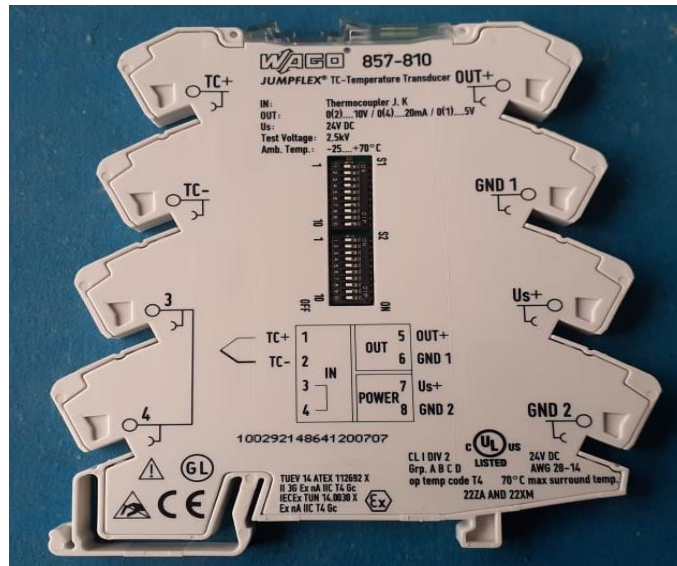


Figura 7 - 2. Acondicionador de señal WAGO 857-810.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Se utiliza el acondicionador WAGO 857-810 de señal de temperatura para termopares, como el que se muestra en la Figura 7 – 2. Éste dispositivo es un transductor de temperatura para termopares tipo J y K. Como salida puede entregar señales estandarizadas tanto de voltaje así como de corriente, se alimenta con 24 VDC y se configura mediante interruptores DIP.

DIP Switch S1

Cold junction compensation	Sensor type		Output signal				Measuring range underflow		Measuring range overflow		Wire break
1	2	3	4	5	6	7	8				
on		J				0 ... 20 mA		Lower limit of output range - 5 % *	Upper limit of output range + 2,5 % *	Upper limit of output range + 5 % *	
off	•	K	•			4 ... 20 mA					
			•	•		0 ... 10 mA	•	Lower limit of output range	Upper limit of output range + 2,5 %	Upper limit of output range + 5 %	
			•	•		2 ... 10 mA					
				•	•	0 ... 10 V		Lower limit of output range	Upper limit of output range	Upper limit of output range + 5 %	
				•	•	2 ... 10 V	•	Lower limit of output range	Upper limit of output range	Upper limit of output range + 5 %	
				•	•	0 ... 5 V	•	Lower limit of output range	Upper limit of output range	Lower limit of output range	
				•	•	1 ... 5 V	•	Lower limit of output range	Upper limit of output range	Lower limit of output range	

DIP 9 and 10 n.c.

* acc. to NAMUR NE 43

Figura 8 - 2. Configuración del DIP switch S1.
Fuente: <http://www.farnell.com/datasheets/2059997.pdf>

Se configuró el acondicionador, mediante el DIP switch S1 y el DIP switch S2, cada uno con diez interruptores. En la Figura 8 – 2 se muestra como configurar el acondicionador, el punto indica que se pone el interruptor en la posición ON. Para activar la compensación de unión fría se pone el interruptor en OFF. Para seleccionar el el tipo de termopar K se pone el interruptor 2 en ON y el 3 en OFF. Para escoger la señal de salida de 0 – 10v se pone los interruptores 4, 5 y 6 en OFF, OFF y ON, respectivamente. Los interruptores 7 y 8 se mantienen en OFF para mantener la configuración por defecto acerca de los límites superior e inferior de la señal de salida.

DIP Switch S2

Start temperature						End temperature																														
1	2	3	4	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F							
																			●	225	437						●	625	1157					●	1025	1877
●				-200	-328	●						0	32	●					●	250	482	●					●	650	1202	●				●	1050	1922
	●			-175	-283		●					10	50		●				●	275	527		●				●	675	1247		●			●	1075	1967
●	●			-150	-283	●	●					20	68	●	●				●	300	572	●	●				●	700	1292	●	●			●	1100	2012
		●		-125	-193			●				30	86			●			●	325	617			●			●	725	1337			●		●	1125	2057
●	●			-100	-148			●				40	104			●			●	350	662	●		●			●	750	1382	●		●		●	1150	2102
	●	●		-90	-130			●	●			50	122			●	●		●	375	707		●	●			●	775	1427		●	●		●	1175	2147
●	●	●		-80	-112	●	●	●				60	140	●	●	●			●	400	752	●	●	●			●	800	1472	●	●	●		●	1200	2192
			●	-70	-94				●			70	158				●	●	●	425	797				●	●	●	825	1517			●	●	●	1225	2237
●				-60	-76	●			●			80	176	●		●	●		●	450	842	●		●			●	850	1562	●		●	●	●	1250	2282
	●			-50	-58		●		●			90	194		●	●	●		●	475	887		●	●	●		●	875	1607		●	●	●	●	1275	2327
●	●			-40	-40	●	●		●			100	212	●	●	●	●		●	500	932	●	●	●			●	900	1652	●	●	●	●	●	1300	2372
		●	●	-30	-22			●	●			125	257			●	●	●	●	525	977			●	●		●	925	1697			●	●	●	1325	2417
●	●	●		-20	-4			●	●	●		150	302	●	●	●	●		●	550	1022	●	●	●			●	950	1742	●	●	●	●	●	1350	2462
	●	●	●	-10	14			●	●	●		175	347			●	●	●	●	575	1067		●	●	●		●	975	1787			●	●	●	1375	2507
●	●	●	●	0	32	●	●	●	●			200	392	●	●	●	●	●	●	600	1112	●	●	●	●	●	●	1000	1832	●	●	●	●	●	1400	2552

The minimum distance from the start temperature to the end temperature may not fall short of 100K degrees on the Celsius (C) scale or 212K degrees on the Fahrenheit (F) scale.

Figura 9 - 2. Configuración de DIP switch S2.

Fuente: <http://www.farnell.com/datasheets/2059997.pdf>

Como se puede ver en la Figura En el DIP switch S2 se configura el rango de temperatura. Con los interruptores 1, 2, 3 y 4 se configuran el rango temperatura de inicio, se ponen todos en ON para configurar 0 °C como temperatura de inicio. Con los interruptores 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se configura la temperatura final, poniendo todos excepto el interruptor 9 en ON se selecciona 1000 °C como temperatura final.

2.3 Programación del PLC

La programación del PLC se lo realiza utilizando el software GX-Developer utilizando el lenguaje LADDER. Las entradas digitales se denominan utilizando la letra X, como se presentó en la Tabla 1 - 2 se necesitan cinco entradas digitales, las cuales se detallan en la Tabla 6 – 2.

Tabla 6 -2: Detalle de las entradas digitales

Entrada digital	Símbolo	Descripción
X000	INICIO	Pulsador de inicio
X001	PARO	Pulsador de paro
X002	MANUAL	Posición del selector correspondiente al modo manual del control
X003	AUTOMATICO	Posición del selector correspondiente al modo automático del control
X004	S_LLAMA	Sensor detector de llama

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Las salidas digitales se denominan utilizando la letra Y, como se mostró en la Tabla 2 – 2, antes en los requerimientos del controlador, se necesitan cinco salidas digitales, las cuales se detallan en la Tabla 7 – 2.

Tabla 7 -2: Detalle de las salidas digitales.

Salida digital	Símbolo	Descripción
Y000	V_COMB	Salida que controla la válvula de combustible
Y001	B_COMB	Salida que controla la bomba de combustible
Y002	CHISPA	Salida que controla la chispa de ignición
Y003	PILOTOS	Salida que controla las luces piloto de inicio y paro a través de los contactos NO y NC de un relé
Y005	VENTILADOR	Salida que controla el encendido del ventilador centrífugo encargado de proporcionar el aire necesario para la combustión

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la Figura 10 – 2 se puede observar el diagrama de conexión del PLC, se muestra la alimentación de 24 VDC, cómo se conectaron las entradas digitales, las salidas digitales y la entrada analógica. Además, se puede observar la conexión del acondicionador de señal de temperatura, su alimentación de 24 VDC, la conexión del sensor termopar y su conexión con el PLC.

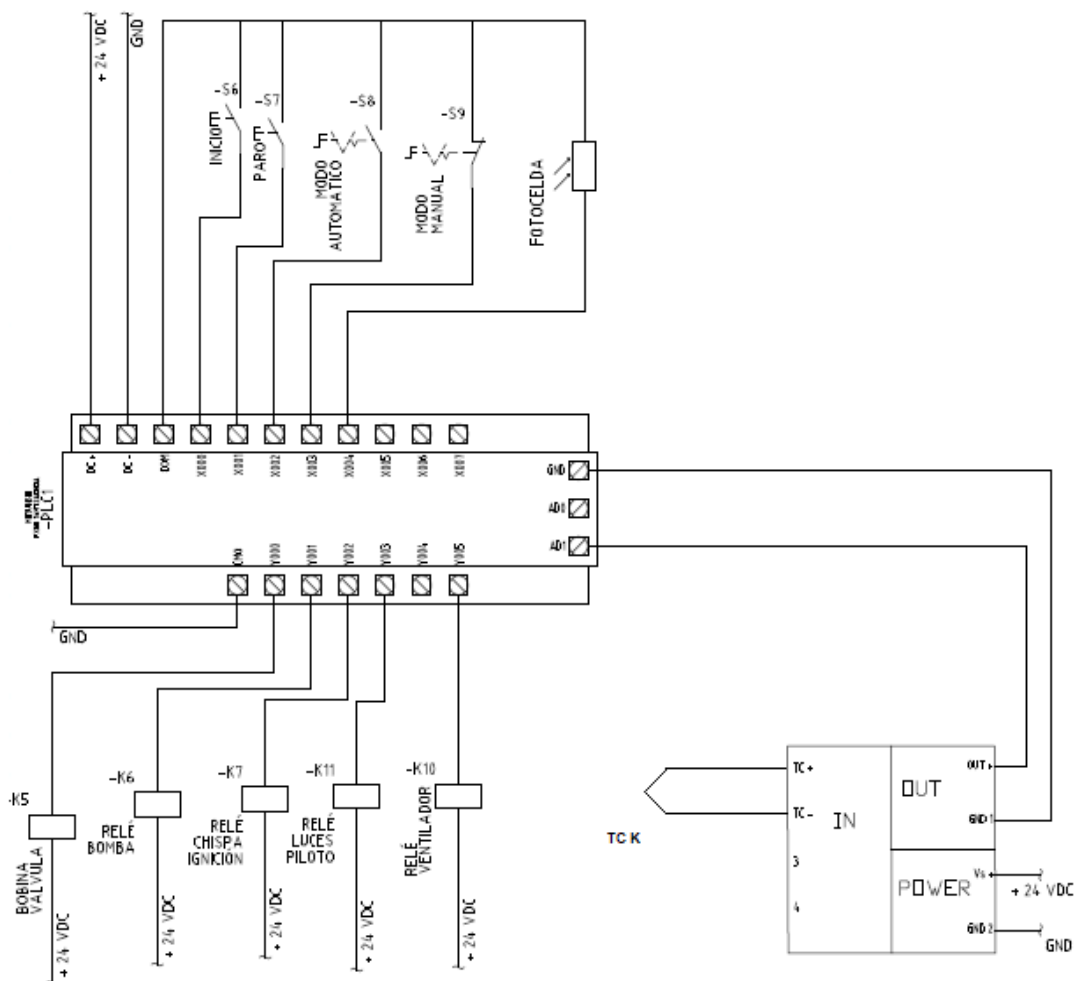


Figura 10 - 2. Diagrama de conexión del PLC y del acondicionador de señal de temperatura.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

El programa se lo realiza de tal manera que se puede escoger de entre dos modos de operación: modo manual y modo automático, utilizando un selector de dos posiciones. Antes de escoger el modo de operación la lectura de la temperatura actual ya se realiza antes de iniciar el proceso de encendido, como se observa en la Figura 10 - 2. La memoria M8000 es una memoria de tipo especial que se mantiene activada mientras esté energizado el PLC.

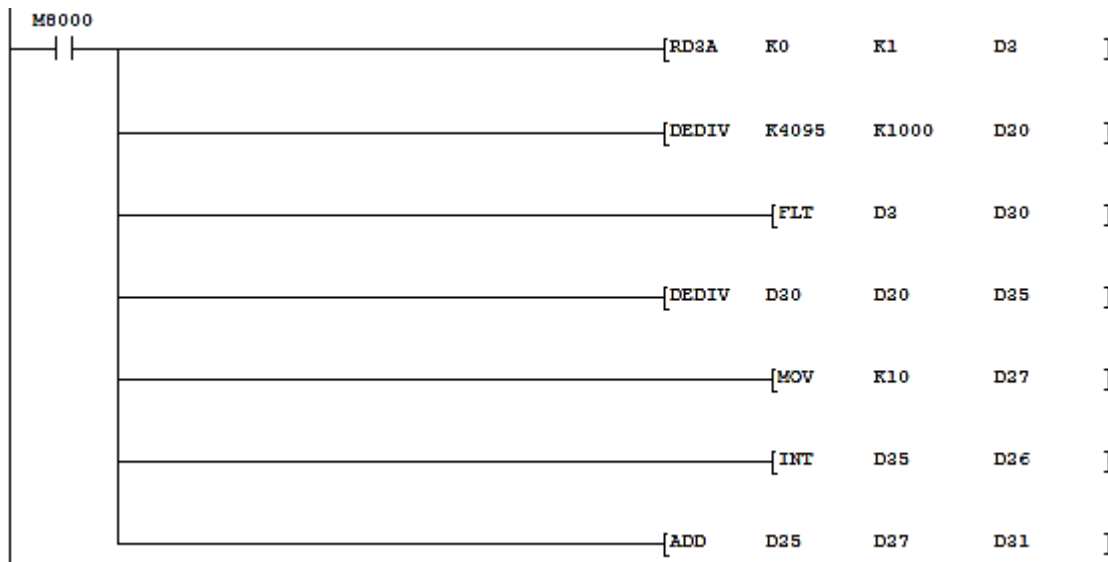


Figura 11 - 2. Lectura de la temperatura y conversión del valor a grados centígrados.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

El bloque de función RD3A sirve para leer la entrada analógica y está configurado para utilizar el canal de entrada analógica número uno. Ya que el convertidor analógico digital de la entrada tiene doce bits entrega un valor entre cero y 4095, es necesario convertir dicho valor a grados centígrados y guardarlo en un registro que luego se usará para la visualización en el HMI.

Para empezar, si se escoge el modo manual el programa permite al usuario, a través de la pantalla HMI, activar, desactivar y monitorear cada uno de los elementos del sistema, así como la temperatura actual del horno. En la figura 11 – 2 se puede observar la programación del modo manual en la que cada salida, correspondiente a cada uno de los actuadores, es activada independientemente.

Si se escoge el modo automático el controlador llevará a cabo una primera etapa de encendido y otra de control. La etapa de encendido consiste en encender la bomba de combustible, la chispa de ignición y abrir la válvula de combustible al mismo tiempo, seguido se detecta si existe presencia de llama mediante el sensor fotocelda. Si, efectivamente, se detecta que ya ha encendido el combustible se desactiva la chispa de ignición y se enciende el ventilador.

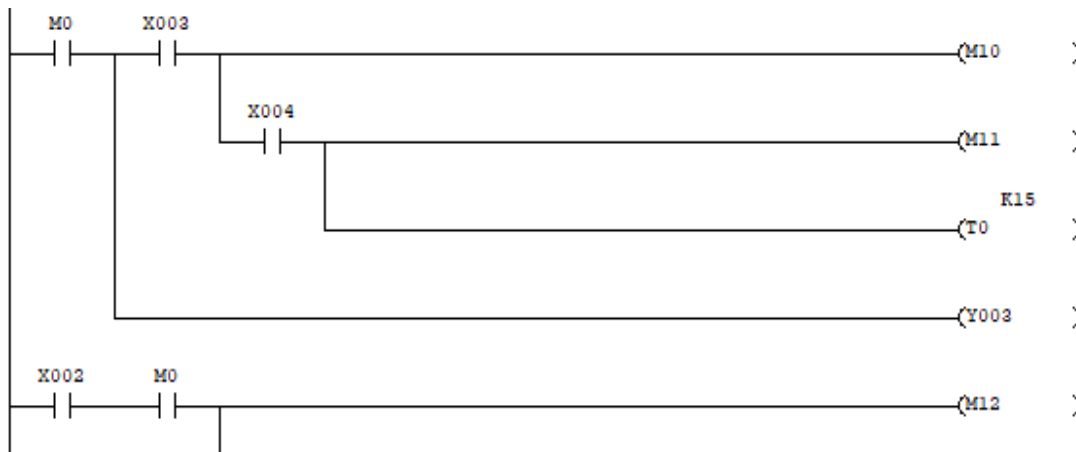


Figura 12 - 2. Selección del modo de operación.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la Figura 12 – 2 se puede observar la etapa de control donde encendemos y apagamos el quemador para mantener la temperatura en un rango preestablecido desde la pantalla HMI. Se utiliza el bloque de función ZCP el cual nos permite dar un rango temperatura sobre el cual vamos a trabajar y se los guarda en los registros D25 y D31, este rango es comparado con el valor de la lectura de temperatura y activará las memorias para mantener la temperatura aceptable para conservar el aluminio líquido.

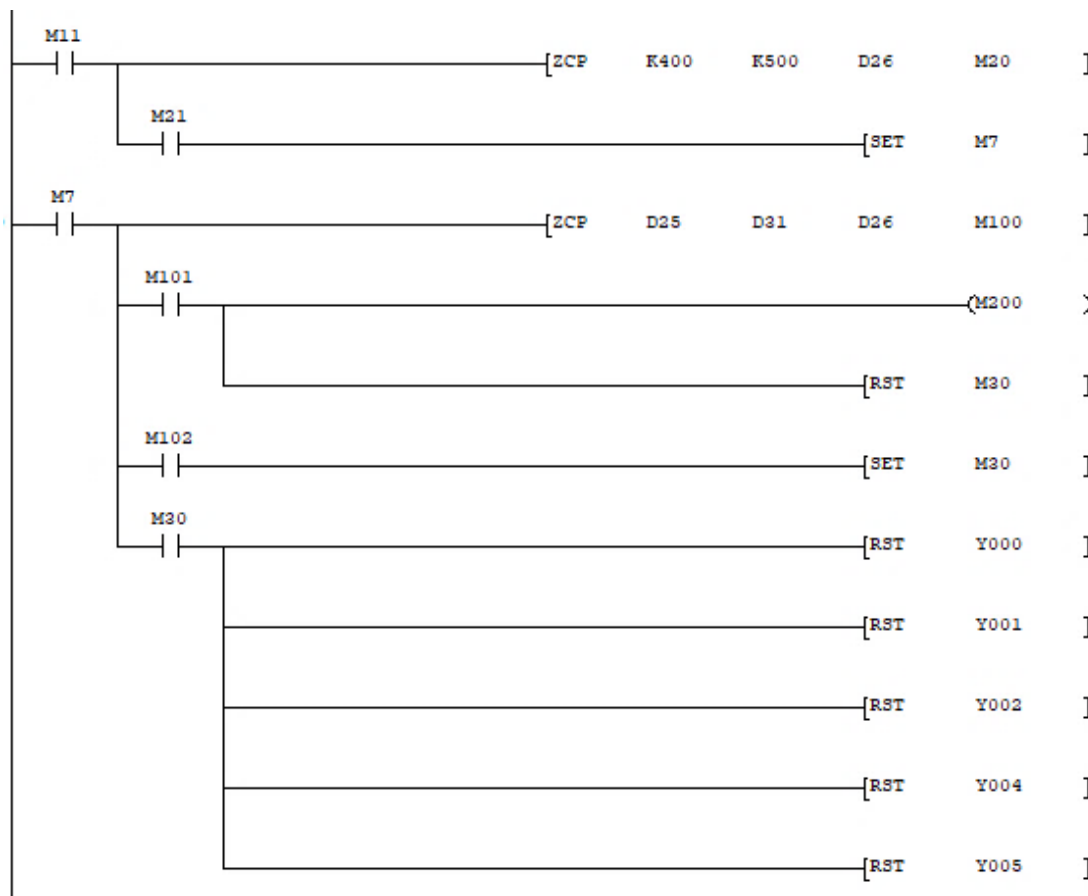


Figura 13 - 2. Etapa de control del modo automático

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la figura 13 – 2 se visualiza las salidas para la activación de los actuadores, cuando el operador interrumpa la acción del control, el ventilador seguirá en funcionamiento por cinco segundos para dispersar el humo que se produce al detener la combustión.

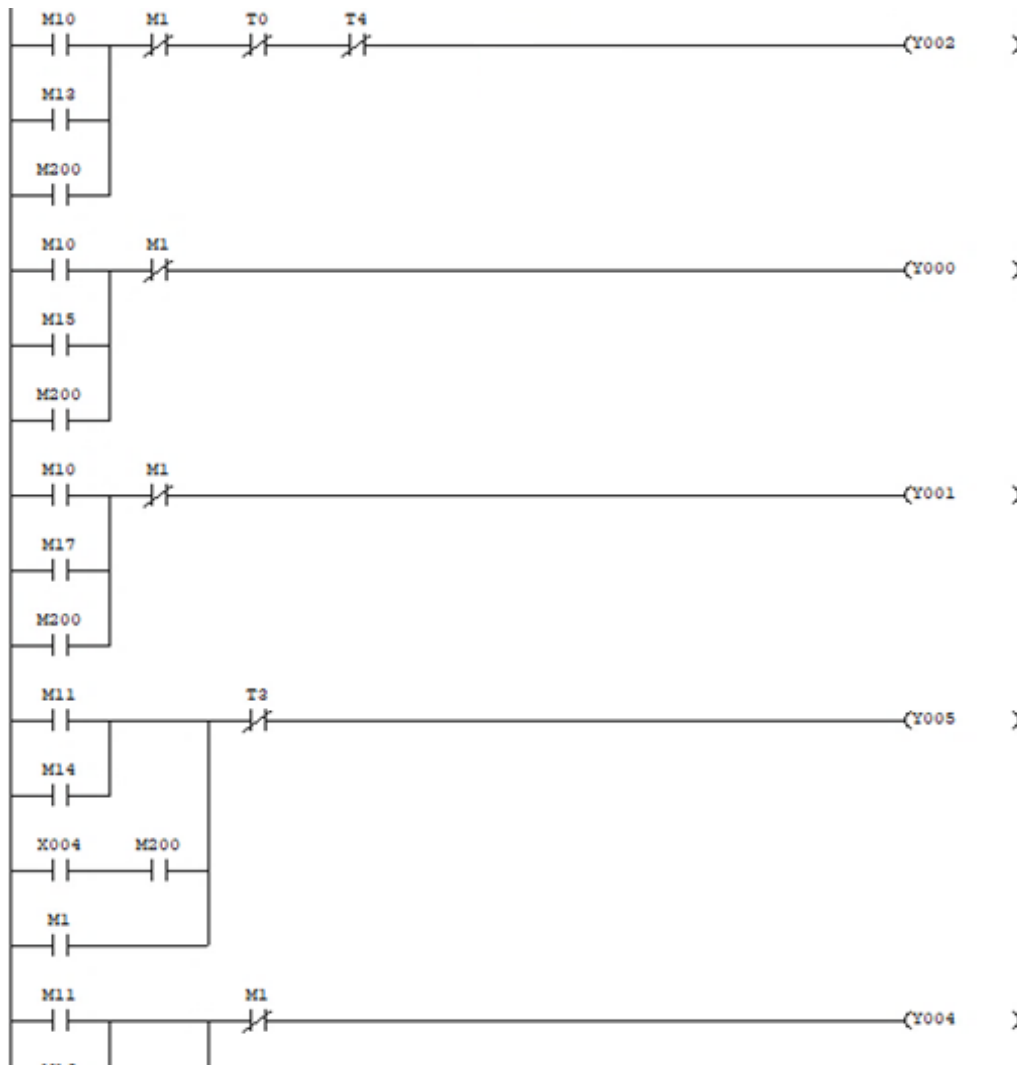


Figura 14 - 2. Activación de las salidas.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.4 Diseño de tablero de control

El tablero de control se implementó con un gabinete metálico color beige para servicio liviano de 600x400x200 mm, con grado de aislamiento IP 42, de marca BEAUCOUP. Se escogió esta caja teniendo en cuenta la NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN (NEC), más específicamente su índice 15.1.6.2.1.7 que indica las siguientes consideraciones para la selección del tamaño de la caja:

- Los cables utilizados para interconectar los diferentes elementos deben pasar a través de canaletas de material no conductor de manera cómoda y segura
- Se debe dejar espacio suficiente entre las paredes de la caja y los elementos que componen el tablero de control de manera que se facilite realizar actividades de mantenimiento.
- Se debe considerar dejar libre un espacio correspondiente al 25% del espacio total para proveer capacidad de ampliación al tablero.

La norma NEC en el índice 15.1.6.2.1.13 indica que los tableros deben estar contruidos con un grado de protección IP con un mínimo IP41 para tableros para montaje en interiores, por lo que la caja escogida si cumple con esta norma teniendo un grado de protección IP42.

En la Figura 14 – 2 se muestra el diseño del tablero de control realizado en el software AUTOCAD ELECTRICAL. En la tapa del tablero se ha montado la pantalla HMI, un selector para elegir entre los modos de control MANUAL y AUTOMÁTICO, un botón verde de INICIO, un botón rojo de PARO, una luz piloto verde y una luz piloto roja.

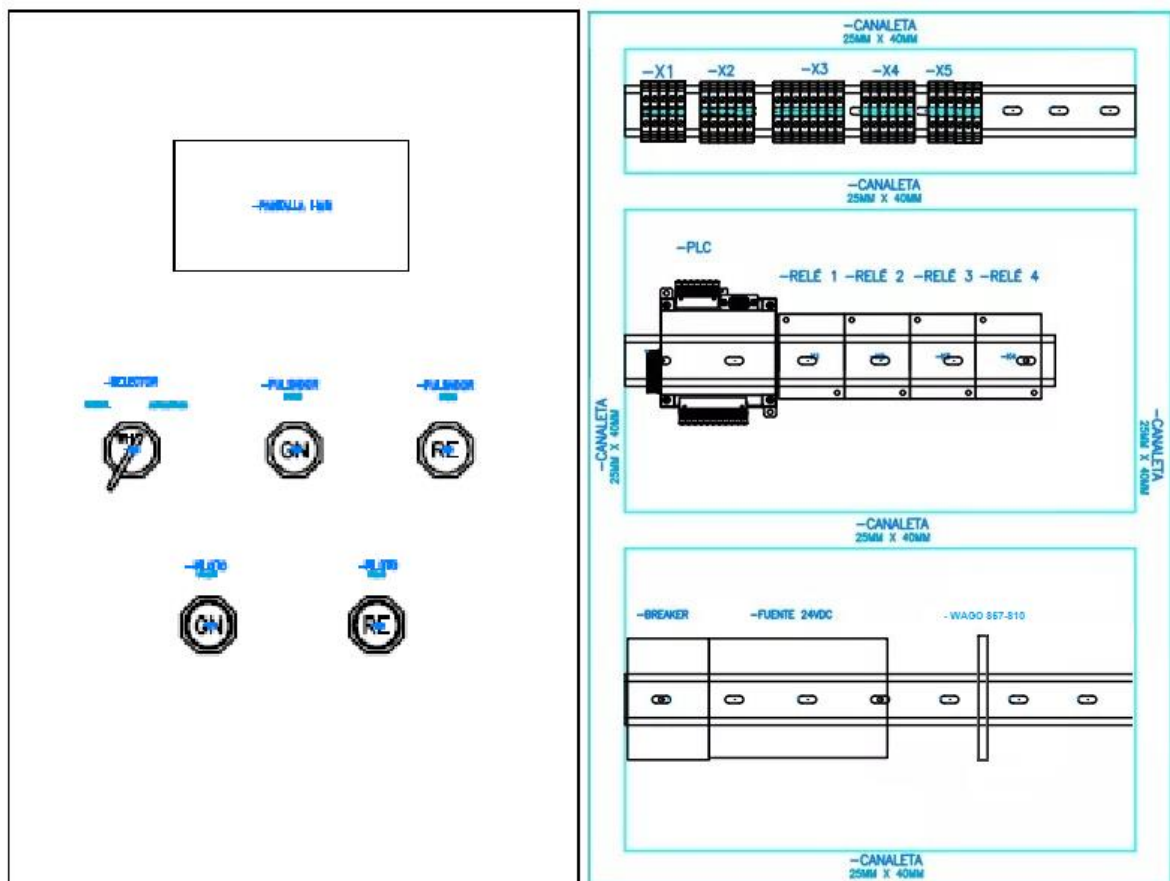


Figura 15 - 2. Diseño de Tablero de Control

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Las conexiones se realizan a través de canaletas de 25x40 mm que pasan por el contorno de la placa de montaje y la dividen en tres secciones. En el riel DIN colocado en la sección de la parte

superior se colocan borneras destinadas a la distribución de las tensiones de alimentación y común de entradas digitales al PLC, como se detalla en la Tabla 8 – 2.

Tabla 8 -2: Detalle de las borneras de distribución.

SÍMBOLO	DETALLE
X1	Conjunto de borneras destinadas a la distribución de línea de 120 VAC.
X2	Conjunto de borneras destinadas a la distribución del neutro.
X3	Conjunto de borneras destinadas a la distribución de línea de alimentación de 24 VDC.
X4	Conjunto de borneras destinadas a la distribución del negativo de la fuente de 24 VDC.
X5	Conjunto de borneras destinadas a distribuir el común de las entradas del PLC.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En el riel DIN de la sección central se ha colocado el PLC y cuatro relés como los que se observan en la Figura 15 – 2, modelo EBCHQ 47400, con bobina de 24 VDC y contactos de máximo 10 A y 250 VAC.



Figura 16 - 2. Relé EBCHP 47400

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la parte inferior del tablero, montado sobre riel DIN, se encuentran un interruptor termomagnético de protección como el que se observa en la Figura 16 – 2. El valor del termomagnético se ha calculado según la corriente que consumen la fuente de alimentación de 24VDC dos fuentes ATX y el ventilador. Como se observa en la Tabla 9 – 2, se ha escogido cable calibre 16 AWG para la conexión de cada elemento.

Tabla 9 -2: Cálculo de termomagnético y calibre de conductores

Dispositivos Eléctricos	Amperaje	Calibre AWG del conductor
Fuente ATX	8	16
Fuente ATX	8	16
Fuente DC 24	0.85	16
Blower	6	16
Total Amperaje	22.85	

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.



Figura 17 - 2. Interruptor termomagnético general.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En el riel DIN de la parte inferior también está montada una fuente de alimentación de 24 VDC como la que se observa en la Figura 17 – 2. La fuente es de marca SIEMENS, modelo 6EP1-332-1SH41 que se alimenta con 120 VAC y entrega 24 VDC y máximo 2.5 A de corriente.



Figura 18 - 2. Fuente de alimentación SIEMENS 6EP1-332-1SH41.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la parte inferior del tablero también está instalado un acondicionador para señal de temperatura WAGO 857-810. En la Figura 18 - 2 se puede observar fotografías del tablero de control, tanto de la parte interna como de la tapa.



Figura 19 - 2. Fotografía de tapa y parte interna del tablero de control.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Los diagramas de conexión de alimentación general, alimentación de cada dispositivo, así como los diagramas de mando y fuerza se muestran en el ANEXO A.

2.5 Sistema de Inyección de Combustible

En la Figura 19 – 2 se puede observar el diagrama del sistema hidráulico de inyección de combustible.

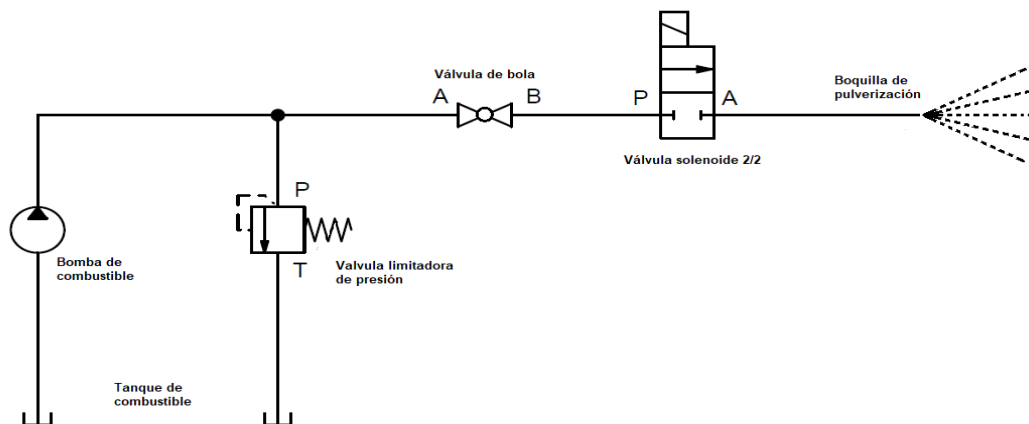


Figura 20 - 2. Sistema hidráulico de inyección de combustible.
Realizado por: Sangucho F. Saavedra E. 2020.

El tanque de combustible que se usa, se puede ver en la Figura 20 - 2, está construido de acero inoxidable y se le han hecho perforaciones para las mangueras de ingreso, salida y retorno de combustible, desfogue e ingreso de los cables conductores con los que se alimenta a la bomba.



Figura 21 - 2. Tanque de combustible
Realizado por: Sangucho F. Saavedra E. 2020.

La bomba de combustible es una bomba de tipo sumergible marca Bosch, como la que se observa en la Figura 21 – 2. Su función es proporcionar el caudal de combustible necesario para la combustión.



Figura 22 - 2. Bomba de combustible.
Realizado por: Sangucho F. Saavedra E. 2020.

Las especificaciones técnicas de la bomba de combustible se pueden ver en la Tabla 10 – 2.

Tabla 10 -2: Características técnicas de la bomba de combustible BOSCH

CARACTERÍSTICA	VALOR
Modelo	0 580 453 053
Presión (Bar)	3,1 ... 3,5
Caudal (litros por minutos)	2
Corriente máxima (A)	9
Voltaje (V)	12
Diámetro (mm)	43
Largo (mm)	140
Diámetro del tubo de salida (mm)	8
Conexión eléctrica de la bomba	Terminal plano

Fuente: https://www.todomecanica.com/recursos/bombas_electricas_bosch.pdf

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

La válvula limitadora de presión tiene como función abrir el paso de combustible hacia el tanque cuando se excede cierta presión. La válvula limitadora de presión utilizada limita la presión a un valor de 3 bares. Se utiliza una válvula de bola como válvula de paso del combustible. Esta válvula se abre y cierra completamente para permitir y cerrar el paso del combustible. La válvula solenoide 2/2 marca SHAKO, modelo PU220ARV-02N-S9, que se usa como elemento final de control que se describió en la sección 2.2.2.2.

Para interconectar los diferentes elementos del sistema de inyección de combustible se utiliza tubería de poliuretano número 10, como la que se observa en la Figura 22 – 2. Las mangueras de poliuretano son ampliamente utilizadas en líneas de combustible ya que ofrecen gran resistencia a la abrasión, tienen valores altos de tensión y elongación. Sus buenas características químicas los hacen muy resistentes a gasolinas, aceites keroseno y otros aceites basados en petróleo.



Figura 23 - 2. Manguera de poliuretano número 10.

Realizado por: Sangucho F. Saavedra E. 2020

2.6 Diseño de Interfaz Humano-Máquina (HMI)

Se utilizó una pantalla Samkoon modelo EA-043A para la implementación de la interface HMI. Las dimensiones son: 138mm X 86mm X 38mm, el tamaño de la pantalla es de 4.3 pulgadas con una resolución de 480 x 272 píxeles. Es una pantalla táctil de 262,114 colores, con iluminación LED y panel frontal con grado de protección IP65. Alimentación de 24 VDC con un consumo energético de 3 W. Cuenta con un puerto de comunicación serial RS232/422/485, compatible para realizar la comunicación con un PLC compacto Mitsubishi FX3U. Los indicadores y controles se pueden configurar con ayuda del software Satool V6.0.

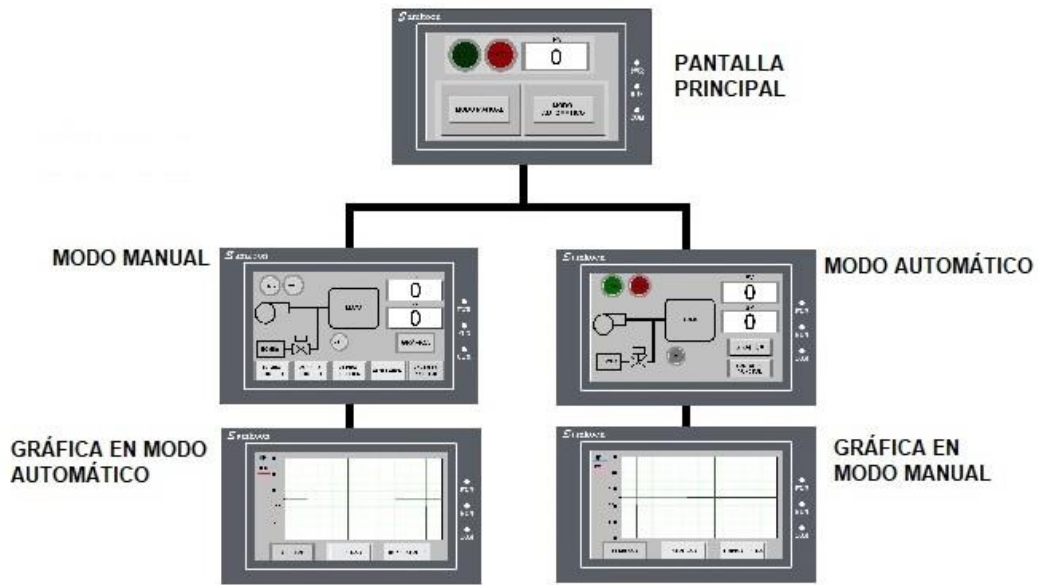


Figura 24 - 2. Jerarquía de las pantallas en la interface HMI.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

La HMI cuenta con cinco pantallas, cuya jerarquía se puede observar en la Figura 23 – 2. En la pantalla principal se pueden observar, dos indicadores correspondientes a Inicio y Paro, dos botones mediante los cuales se acceden a los modos manual y automático y que se iluminan según la posición del selector y por último, en la pantalla principal se puede observar un indicador numérico que indica la lectura de la variable de proceso (PV), es decir la temperatura.

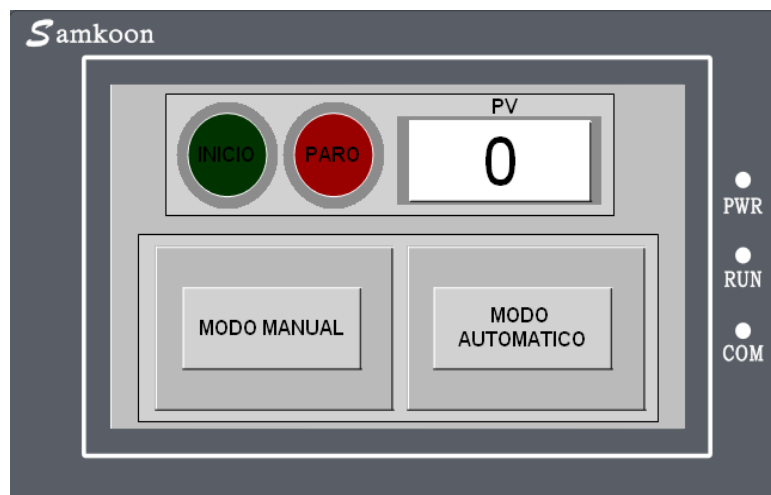


Figura 25 - 2. Pantalla principal de la HMI.
 Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Al seleccionar el modo manual se abre una pantalla, como la que se observa en la Figura 25 – 2, en la que lo primero que se observa es un diagrama sencillo del sistema compuesto por indicadores que se van iluminando según se enciende la bomba combustible, el ventilador, la válvula, la chispa de ignición o se detecte la presencia de llama. Además se puede observar dos indicadores correspondientes al inicio y paro del proceso. En la parte inferior de la pantalla se encuentran botones para activar y desactivar, independientemente, cada dispositivo del sistema. En la parte derecha se puede observar un campo indicador numérico que muestra la variable de proceso (PV), es decir la temperatura real del horno. También se puede observar otro campo de entrada numérica en el que se puede especificar el valor de consigna de la temperatura (SP). Por último se cuenta con un botón que abre otra pantalla en la que se grafica en el tiempo las variables SP y PV y otro botón que sirve para regresar a la pantalla principal.

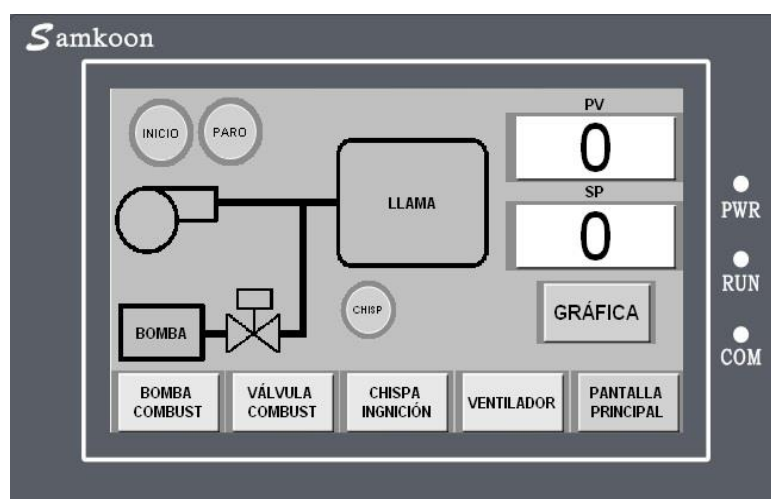


Figura 26 - 2. Pantalla correspondiente al modo de control manual.
 Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020

Al presionar el botón de GRÁFICA se abre una pantalla como la que se observa en la Figura 26 – 2. En esta pantalla se cuenta con tres botones que sirven para iniciar la gráfica de las variables, para limpiar la gráfica y para retornar a la pantalla anterior.

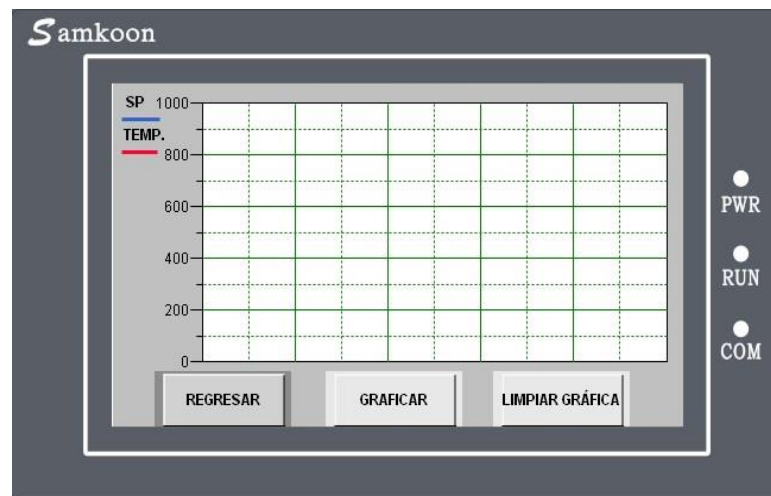


Figura 27 - 2. Pantalla de GRÁFICA del modo manual.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Al seleccionar el modo automático se abre una pantalla, como la que se observa en la Figura 27 – 2. En esta pantalla se cuenta con dos indicadores de inicio y paro y de igual manera a como se observa en la pantalla del modo manual, en esta pantalla también se observa un diagrama sencillo del sistema con indicadores, que corresponden a los distintos dispositivos del sistema, que se iluminan cuando el controlador los activa de manera automatizada. En la parte derecha tiene dos campos, el uno indicador numérico que muestra la variable de proceso (PV) y el otro campo de entrada numérica en el que se puede especificar el valor de consigna de la temperatura (SP). Por último se cuenta con un botón que abre otra pantalla en la que se grafica en el tiempo las variables SP y PV y otro botón que sirve para regresar a la pantalla principal.

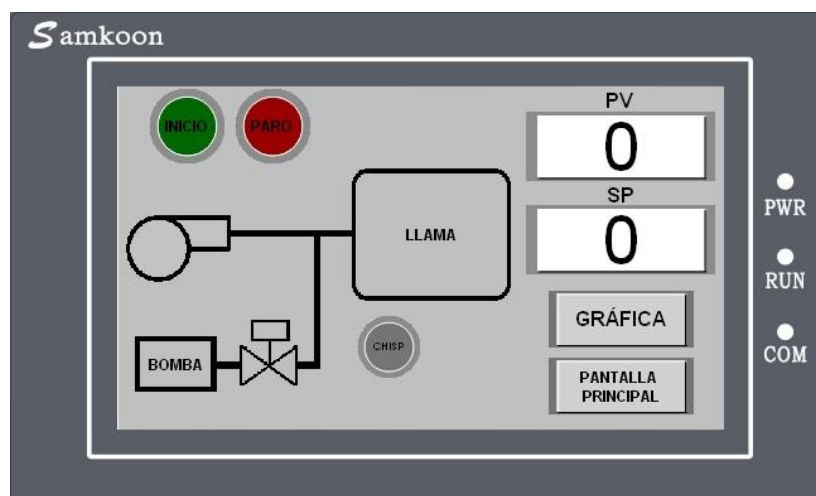


Figura 28 - 2. Pantalla correspondiente al modo automático.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Al presionar el botón de GRÁFICA se abre una pantalla como la que se observa en la Figura 28 – 2. Esta pantalla es similar a aquella correspondiente al modo manual, también se cuenta con tres botones en la parte inferior que sirven para iniciar la gráfica de las variables, para limpiar la gráfica y para retornar a la pantalla anterior.

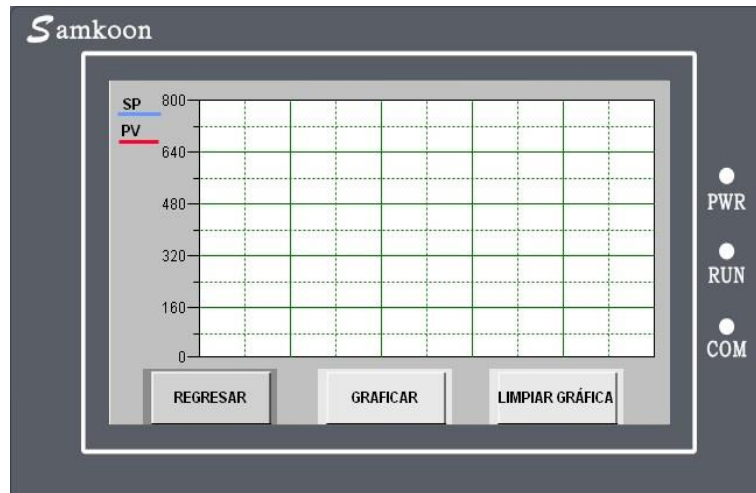


Figura 29 - 2. Pantalla de GRÁFICA del modo automático.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

2.7 Diseño mecánico

El tablero de control, el cañón del quemador, así como demás dispositivos como una fuente ATX, el circuito de la chispa de ignición, la bobina de encendido y el ventilador se montan sobre una mesa que hace de soporte físico de todo el sistema.

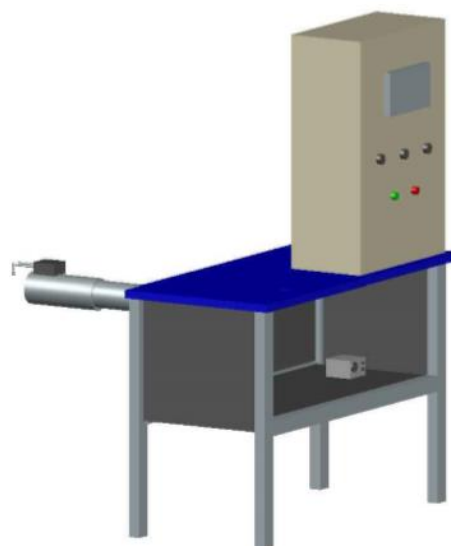


Figura 30 - 2. Diseño mecánico de la mesa.
Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la Figura 29 - 2 se presenta el montaje de tablero de control sobre la mesa o soporte, las cuales tienen unas dimensiones de 40x90 cm y una altura de 95 cm se diseñó un nuevo cañón o

quemador, ya que no se podía adaptar las conexiones y las tuberías al sistema anterior, tomando en cuenta la altura a la que se encuentra la entrada de la llama y protegiendo al sistema del calor generado por este horno.



Figura 31 - 2. Fotografía de la mesa
Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.

En la figura 30 – 2 se presenta la mesa con el cañón incorporado, y los elementos electrónicos en su posición, encima del cañón se puede visualizar los electrodos utilizados para generar el arco eléctrico, los cuales están separados por un material aislante tomando una distancia de 1.2 cm de cualquier metal, ya que si no se le separa lo suficiente el arco eléctrico se pierde en otros metales, la mesa es transportable ya que con el tablero es demasiado pesado para moverlo y poder realizar algún cambio o dar mantenimiento a los dispositivos.

CAPÍTULO III

3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se analiza y evalúa el sistema de control mostrando los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento del sistema, tanto en modo manual como en modo automático. También se analiza costo económico que ha conllevado la implementación de un sistema de control realimentado de temperatura en un horno de fundición de aluminio, detallando el costo de cada uno de los componentes usados.

3.2 Análisis de funcionamiento

3.2.1 Análisis de Funcionamiento en Modo Manual

En el modo de operación manual el operador debe poder activar y desactivar los diferentes actuadores del sistema mediante la pantalla HMI, después de presionar el botón de inicio, con el propósito de comprobar el correcto funcionamiento de los dispositivos independientemente.

La pantalla se ha configurado de tal manera que si se logra establecer comunicación con el PLC y en la Figura 1 - 3 se puede observar la pantalla principal que ya se describió en el capítulo anterior. Además, se puede observar que el botón para ingresar al modo manual está iluminado por lo que el selector está en la correspondiente posición.



Figura 1 -3. Prueba de funcionamiento de la pantalla HMI.

Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.

Una vez ingresamos al modo manual se puede observar la pantalla descrita en el capítulo anterior donde podemos activar los actuadores de manera independiente. Por ejemplo en la Figura 2 – 3 podemos observar que se ha accionado la chispa de ignición y en la Figura 3 – 3 se observa la pantalla del modo manual con los indicadores de los actuadores, antes y después de ser activados.



Figura 2 -3. Prueba de funcionamiento de la chispa de ignición en modo manual.
Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.



Figura 3 -3. Pantalla del modo manual antes y después de activar los actuadores.
Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.

3.2.2 *Análisis de Funcionamiento en Modo Automático*

En el modo de funcionamiento automático el encendido, así como el control de temperatura se lo realiza de manera totalmente automatizada y desde la pantalla HMI se puede monitorear la activación de los distintos actuadores. En la Figura 4 - 3 se puede observar la pantalla principal con el botón del modo automático iluminado porque el selector está en la posición correspondiente al modo automático.



Figura 4 -3. Pantalla principal con el modo automático seleccionado.
 Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.

Una vez ingresamos al modo automático se puede observar la pantalla descrita en el capítulo anterior donde podemos monitorear la activación de los actuadores. En la Figura 5 – 3 podemos observar que se ha dado al botón inicio y encendido el horno de manera automática sin la necesidad de que una persona ingrese fuego para lograr la ignición del combustible y también se muestra en el diagrama el estado de activación de los dispositivos.

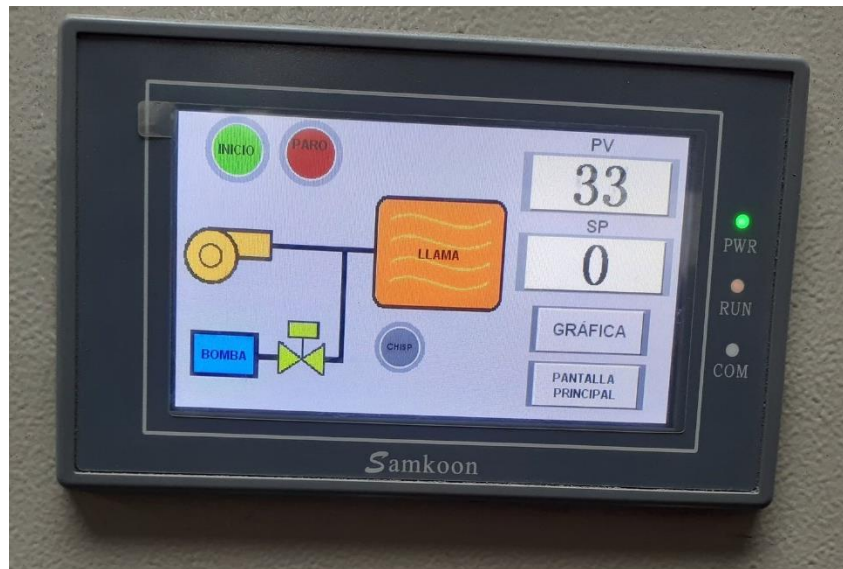


Figura 5 -3. Horno encendido en modo automático.
 Realizado por: Sangucho F.y Saavedra E., 2020.

3.2.3 Evaluación de Sistema de Control de Temperatura.

El sistema de control de temperatura que se ha implementado cuenta con un controlador de tipo todo o nada. Para evaluar el sistema de control se tomaron 54 mediciones de temperatura, durante dos días lunes, ya en que los fines de semana no trabaja el horno y durante estos dos días el horno se enfría hasta temperatura ambiente. Las mediciones de temperatura se tomaron cada cinco

minutos durante cuatro horas y 25 minutos, primero con el sistema anterior y segundo con el sistema de control realimentado.

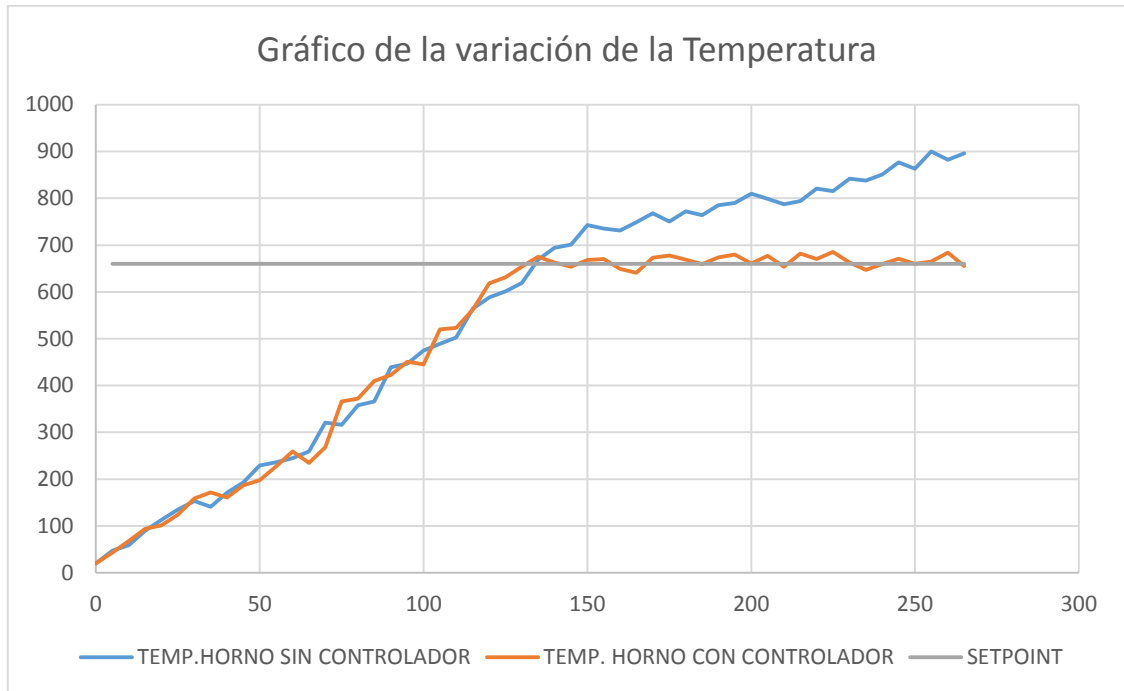


Gráfico 1 -3. Gráfico de mediciones de temperatura.

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En el Grafico 1 – 3 se muestran graficados los datos de temperatura a lo largo del tiempo. La grafica con azul son las mediciones de temperatura sin la presencia de control automático. Como se puede ver la temperatura crece de manera monótona y se estabiliza en 800 °C, en aproximadamente cuatro horas.

La grafica con rojo muestra los valores de temperatura ya con el sistema de control realimentado, configurado con un setpoint de 660 °C. En la gráfica se observa que alcanza el valor de setpoint en aproximadamente dos horas. Cuando la temperatura alcanza el valor de consigna entra en acción el controlador y apaga el quemador y cuando la temperatura vuelve a caer por debajo del setpoint se vuelve a encender el quemador.

Una vez entra a funcionar el controlador, se utiliza la prueba T-Student para comparar el conjunto de datos de temperatura con el valor de setpoint. Se realiza la prueba T-Student para una muestra, con ayuda del software Excel con el complemento Real Statistics. En la Tabla 1 – 3 se detalla 30 mediciones de temperatura.

Tabla 1 -3: Tabla de mediciones de temperatura.

Número de muestra	Temperatura (°C)	Número de muestra	Temperatura (°C)
1	618	16	680
2	631	17	661
3	654	18	677
4	675	19	654
5	663	20	682
6	654	21	670
7	668	22	685
8	670	23	663
9	649	24	647
10	641	25	659
11	673	26	671
12	678	27	660
13	669	28	665
14	659	29	684
15	674	30	655

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

En la Tabla 2 – 3 se muestra los cálculos realizados para realizar la prueba T-Student con 30 datos de mediciones de temperatura con un nivel de significancia de 5%. En la Tabla 3 – 3 se muestra el cálculo del valor de t crítico para dos colas.

Tabla 2 -3: Cálculo del valor t.

T Test: One Sample							
SUMMARY			Alpha	0.05			
Count	Mean	Std Dev	Std Err	t	df	Cohen d	Effect r
30	662.966667	15.4528947	2.82129967	1.05152484	29	0.19198129	0.19164396

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Tabla 3 -3: Cálculo de la t crítica

T TEST			Hyp Mean	660	
	p-value	t-crit	lower	upper	sig
One Tail	0.15085063	1.69912703			no
Two Tail	0.30170125	2.04522964	657.196461	668.736872	no

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

El valor t calculado es menor al valor t crítico de dos colas, por lo que se acepta la hipótesis nula de que la media de las mediciones de temperatura es igual a la media hipotética de 660 °C.

CAPÍTULO IV

4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el presente capítulo se realiza un análisis económico donde se detalla los costos de los recursos utilizados en la implementación del dispositivo y se denota la relación costo beneficio de dispositivo construido comparada con dispositivos disponibles en el mercado.

4.1 Análisis de Costos de Implementación

4.1.1 Costos de Materiales de Construcción de la Mesa.

La mesa fue construida de materiales reciclados, a excepción de las ruedas, en la Tabla 2 - 3 se detalla el costo de los materiales de construcción.

Tabla 1 -4: Costo de materiales para construcción de mesa de soporte.

C	CANTIDAD	VALOR TOTAL (\$)
Perfil de acero	4	5
Planchas de acero	2	6
Ruedas	4	20
Tubos de acero	1	7
Láminas de aluminio	4	2
Total		40

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

4.1.2 Costos de Implementación de Tablero de Control

En la Tabla 2-4 se detalla el costo de los dispositivos que se instalaron en el tablero, insumos utilizados en el montaje y conexión de los elementos y la misma caja.

Tabla 2 -4: Costo de dispositivos instalados en el tablero de control.

MATERIALES	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Fuente 24V	1	30	30
Interruptor termomagnético 30A	1	10	10
Bornera de riel 2,5mm-12	35	0.36	12.6
Separador de borneras	8	0.31	2.48
Relé EBC/Camsco 8 pines	4	3.57	14.28
Base relé	4	0.89	3.56
Riel DIN 35mm	100	0.02	2
PLC FX3u-14MT-6AD-2DA	1	180	180
HMI	1	200	200
Luz piloto	2	1.5	3
Pulsadores	2	3	6
Selector	1	3	3
Caja para circuito	2	4	8
Tornillo auto-perforante de media pulgada	35	0.03	1.05
Canaleta 25"40	2	4.91	9.82
Gabinete 60x40x20	1	44.64	44.64
Terminales rojos	36	0.04	1.44
Terminales amarillos	100	0.03	3
Terminal puntera azul	30	0.05	1.5
Termocupla tipo K	1	13	13
Acondicionador de señal de temperatura Wago 857-810	1	250	250
COSTO TOTAL			799.37

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

4.1.3 Costos de Sistema de Inyección de Combustible

En la Tabla se detalla el costo de los dispositivos y elementos que componen el sistema de inyección de combustible.

Tabla 3 -4: Costo de sistema de inyección de combustible

MATERIALES	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Bomba de combustible BOSCH	1	36,00	36,00
Válvula reguladora de presión	1	17	17,00
Racores Hidráulicos	5	1.2	6,00
Boquilla de pulverización	1	8	8,00
Válvula solenoide de combustible	1	87	87,00
Manguera 10 de poliuretano	6	2,30	13,80
COSTO TOTAL			167,80

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

4.1.4 Costo Total de Implementación

En la Tabla 7 – 3 se muestra el costo total de implementación del sistema de control.

Tabla 4 -4: Costo total de implementación.

TABLA	COSTO (\$)
Tabla 4 - 3	40,00
Tabla 5 - 3	799,37
Tabla 6 - 3	167,80
TOTAL	1007,17

Realizado por: Sangucho F. y Saavedra E., 2020.

Como se observa en la tabla el costo total de implementación es de 1007,17 dólares americanos el cual es un costo un 22% más barato que equipos quemadores de diésel disponibles en el mercado.

CONCLUSIONES

- En este trabajo de titulación se implementó un sistema de control en lazo cerrado para el control de temperatura en un horno industrial de fundición de aluminio. La importancia de este sistema de control radica en que al tener un sistema de control de temperatura se tiene un ahorro de energía en el proceso de producción del aluminio. Porque se dosifica combustible al quemador según la necesidad de calor que se presente y no se mantiene quemando el combustible todo el tiempo
- Se estudió el proceso fundición de aluminio para determinar los componentes de un lazo de control de temperatura. Esto se llevó a cabo para determinar el sensor de temperatura apropiado, el tipo de actuador con el que se actuaría sobre el suministro de combustible y el tipo de control, que en este caso sería de encendido y apagado debido a la complejidad del determinar las características dinámicas del sistema térmico y a la poca disponibilidad del horno para realizar pruebas.
- Se diseñó y construyó el sistema de control con los dispositivos electrónicos seleccionados según sus características. Para lograr la medición de temperatura fue necesario adquirir un transductor que entregue una señal de temperatura estandarizada de 0 – 10v, ya que para lograr un sistema de control que mantenga constante la temperatura es muy importante una medición confiable de dicha variable.
- Se planteó el objetivo de implementar una interfaz humano-máquina para monitorear el proceso automatizado. La interfaz se la realizó con una pantalla Samkoon, que puede comunicarse con el PLC y en la que se puede interactuar con el sistema y monitorear las variables del sistema, en dos modos de operación.
- Las Pruebas de funcionamiento que se realizaron fueron exitosas. Desde la pantalla HMI se interactúa con el sistema, tanto en modo manual como en automático y el sistema de control mantiene la temperatura constante como se mostró comparando la media de las mediciones de temperatura con la media hipotética correspondiente al setpoint.

RECOMENDACIONES

- Antes de implementar el controlador y comprobar los elementos actuadores y sensores Para realizar las pruebas o verificaciones se recomienda poner el cañón dentro de una cámara de combustión, ya que al utilizar Diesel como combustible y ponerlo en un lugar abierto no generará una llama que pueda mantenerse.
- Los electrodos que se usan para la generación del arco eléctrico deben estar completamente aislados y tener una separación de 1 cm entre sus puntas, ya que al separarlos más no se producirá el arco eléctrico, también se los debe separar 1cm de cualquier otro metal que forme parte del entorno
- Se debe colocar una válvula de presión para evitar el sobreesfuerzo en el motor de combustible, ya que al utilizar el modo manual de operación el operador toma su tiempo para ir activando cada actuador y puede activar la bomba y tardar en activar la válvula, lo que ocasionaría daños a la bomba de combustible.
- Se recomienda que desde la configuración de inicio de Windows se active la opción de reconocer hardware no firmado, ya que Windows 10 solo trabaja con hardware firmado y por lo que al conectar la pantalla HMI a la computadora, no se comunicará o no reconocerá el dispositivo por lo cual no permitirá descargar los diseños a la pantalla desde el software

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE GUACHAMÍN, R.D., & PLASENCIA LEMA, F.G. *Diseño y construcción de un horno de inducción de baja potencia utilizando IGBT'S para fundir metales ligeros (<1200 °c)*, 2018. [en línea], [Consulta: 7 febrero 2020]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/14999>.

Aluminio. En: Page Version ID: 133564303, *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línea], 2021. [Consulta: 1 marzo 2021]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aluminio&oldid=133564303>.

ARENY, R.P. *Sensores y Acondicionadores de Señal 4ª*, 2005. S.l.: Marcombo.

ARMANDO MORALES SÁNCHEZ. *Características del Estándar ANSI/ISA-101.01-2015: Interfaces Humano-Máquina para Sistemas de Automatización de Procesos.* 2019 ISA México Sección Central [en línea]. [Consulta: 29 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/02/12/caracteristicas-del-estandar-ansi-isa-101-01-2015-interfaces-humano-maquina-para-sistemas-de-automatizacion-de-procesos/>.

BOHÓRQUEZ, E.D., PRADO, E.A. y RAMIREZ, M.F. *Implementación de la norma ISA 101, sobre las HMI, pertenecientes a los módulos de instrumentación de la Universidad ECCI*, 2019. S.l.: s.n.,

BOLTON, W. *MECATRÓNICA SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.* 2013. Quinta. Mexico: Alfaomega Grupo Editor.

BONILLA CISNEROS, C.A. *Diseño y construcción de un prototipo de control de admisión de aire, para disminuir las emisiones de monóxido de carbono en quemadores diésel, destinado al Laboratorio de Control Eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L*, 2017.

CAPELLO, E. *Tecnología de la fundición*, 1971 S.l.: Gustavo Gili.

Componentes de encendido BERU | BERU – Su Experto en Encendido. *Componentes de encendido BERU | BERU – Su Experto en Encendido* [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 29 julio 2020]. Disponible en: <https://www.beruparts.es/>.

DONAIRE, D.L. *Bomba de gasolina eléctrica: para qué sirve y mantenimiento. Actualidad Motor*, 2020. [en línea]. [Consulta: 24 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.actualidadmotor.com/bomba-de-gasolina-electrica/>.

Fotorresistor. En: Page Version ID: 126601642, *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línea], 2020. [Consulta: 10 agosto 2020]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotorresistor&oldid=126601642>.

GARCÍA, D. *IEC 61131-3 Estandarización programación industrial*, 2015. [en línea]. [Consulta: 30 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.infoplc.net/documentacion/67-estandares-programacion/2207-iec-61131-3-estandarizaci%C3%B3n-programaci%C3%B3n-industrial>.

HERNÁNDEZ GAVIÑO, R. *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con matlab*, 2010. S.l.: Pearson Educación.

HOLLIFIELD, B.R. *Maximize Operator Effectiveness: High Performance HMI Principles and Best Practices Part 1 of 2*, 2020a.

HOLLIFIELD, B.R. *Maximize Operator Effectiveness: High Performance HMI Principles and Best Practices Part 2 of 2*, 2020b.

Ignition Coil Diagnostics. *Know Your Parts* [en línea], 2012. [Consulta: 29 julio 2020]. Disponible en: <https://www.knowyourparts.com/technical-resources/engine/ignition-coil-diagnostics/>.

JELALI, M. y KROLL, A. *Hydraulic servo-systems: modelling, identification and control*, 2012. S.l.: Springer Science & Business Media.

KAMEL, K. y KAMEL, E. *PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLERS*, 2014. S.l.: s.n.

KAMIMARTYN. *PROCESOS INDUSTRIALES: TIPOS DE HORNOS PARA LA FUNDICION DE METALES. PROCESOS INDUSTRIALES*, 2015. [en línea]. [Consulta: 12 febrero 2020]. Disponible en: <https://industproces.blogspot.com/2015/05/tipos-de-hornos-para-la-fundicion-de.html>.

KESTER, W., BRYANT, J. & JUNG, W. *SECTION 7 TEMPERATURE SENSORS*, 1999. pp. 39.

KUPHALDT, T.R. *Lessons in industrial instrumentation*, 2018. S.l.: Creative Commons Attribution/PAControl. com.

KUPHALDT, T.R. *LESSONS IN INDUSTRIAL INSTRUMENTATION*, 2019. 2.33. S.l.: s.n.

LOPEZ, L.M.P. *Diseño e implementación de una caldera con control electrónico, utilizando material biodegradable como combustible*, 2017. En: Accepted: 2018-10-15T19:47:10Z [en línea], [Consulta: 6 julio 2020]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/9004>.

NEC. *NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC*, 2013. [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/09/NECINSTALACIONESELECTROMECHANICAS2013.pdf>.

PINEDA SÁNCHEZ, M. *Nuevas tendencias en la automatización con autómatas programables basados en la Norma IEC-61131-3*, 2013.

SANDOVAL, L. y IRENE, B. *Estudio de la evolución del sector metalmecánico cuya actividad es la fabricación de metales comunes en el Ecuador en el período 2010-2015*, 2018. En: Accepted: 2018-05-16T20:40:41Z [en línea], [Consulta: 31 mayo 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/6090>.

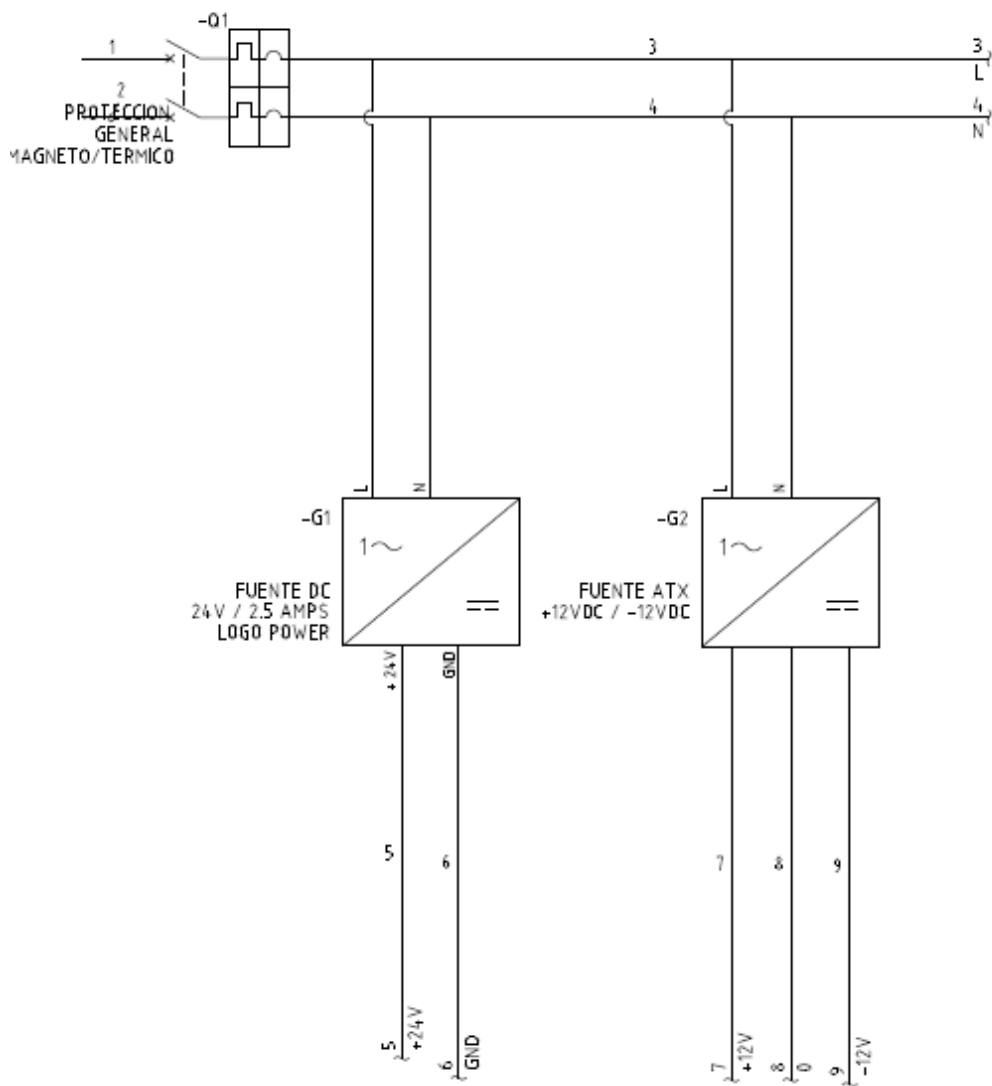
SANDOVAL, L. y JOSÉ, J. *Componentes de sistemas de control de flujo y temperatura para aplicaciones en la industria de la fundición*, 1989. En: Accepted: 2015-05-13T17:57:55Z [en línea], [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <http://cd.dgb.uanl.mx//handle/201504211/2832>.

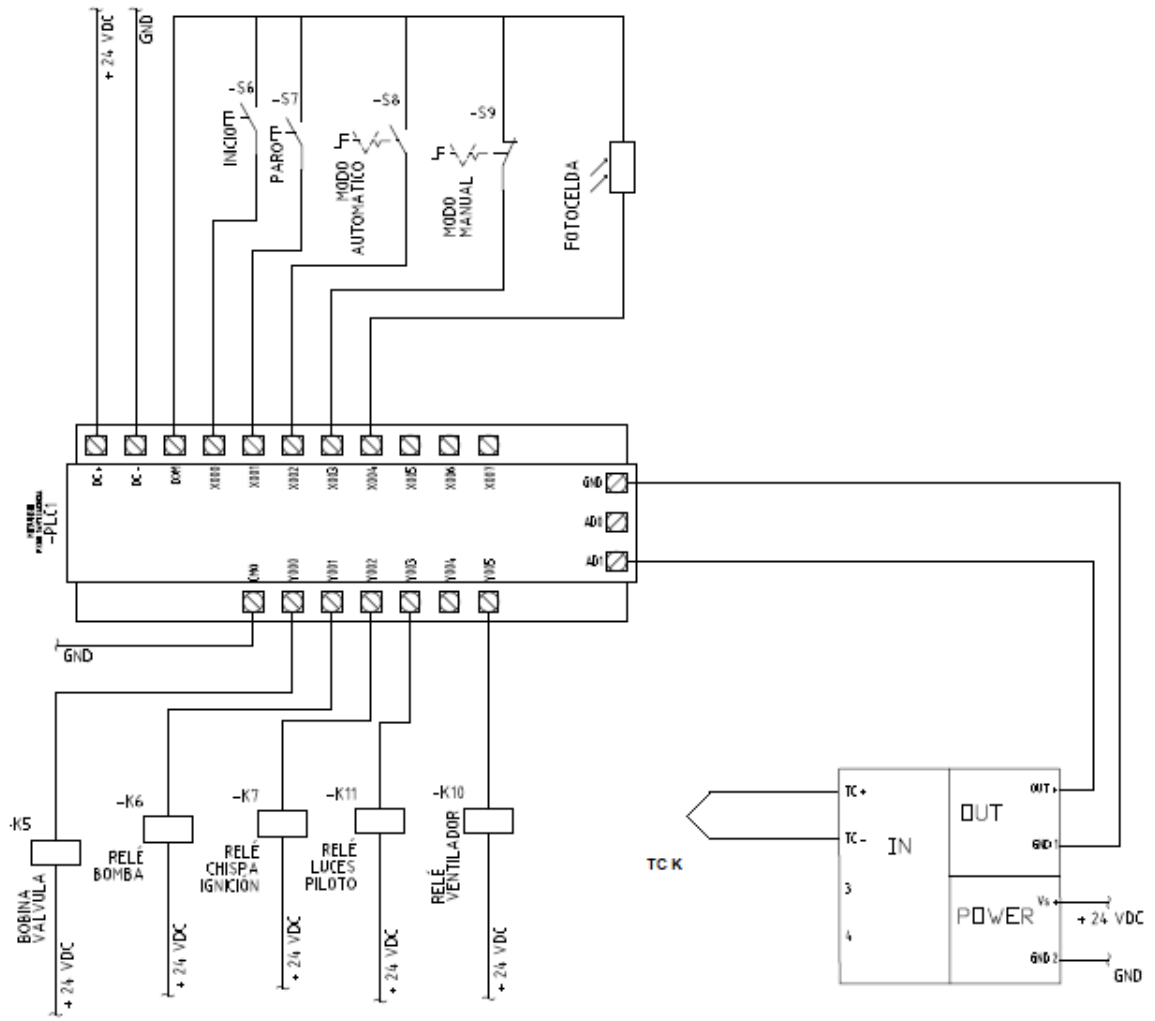
SUÁREZ, H. *Diseño y construcción de un control para calderos*, 2002. En: Accepted: 2015-09-14T18:43:36Z [en línea], [Consulta: 25 mayo 2020]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11504>.

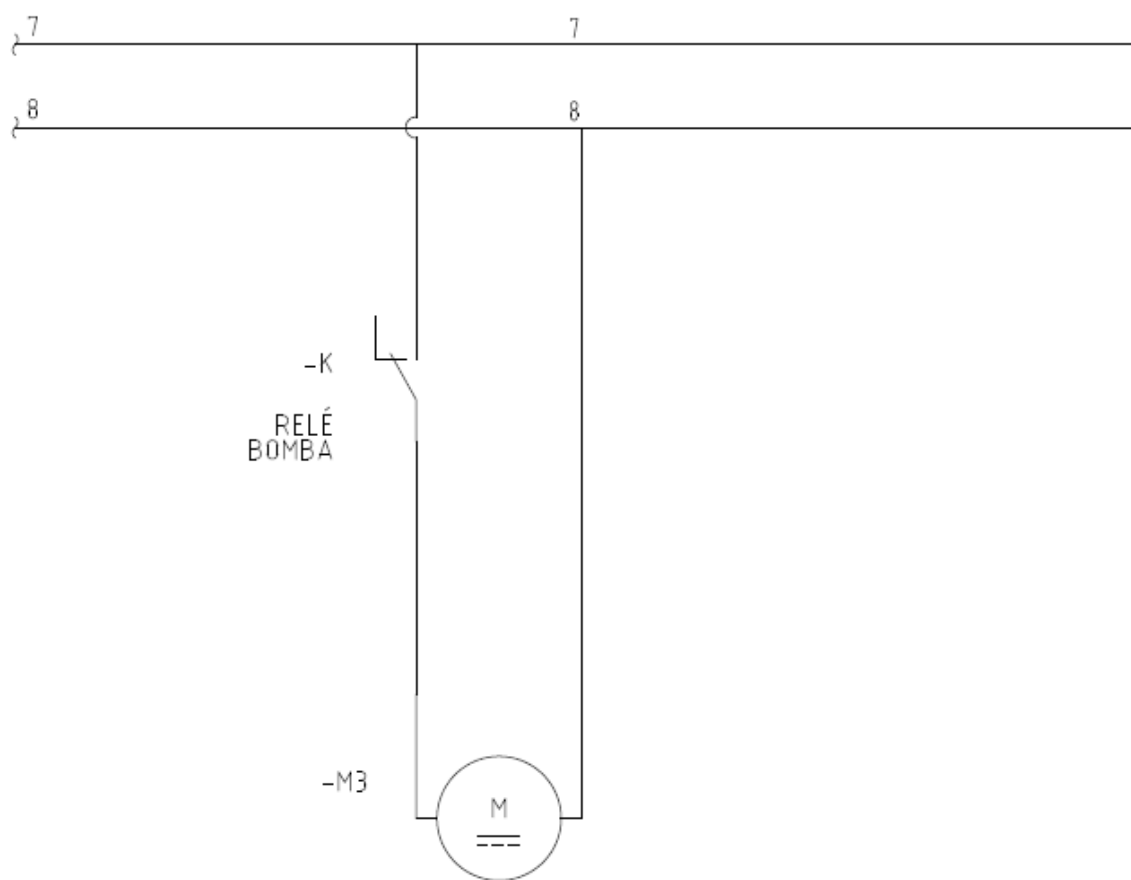
WU, J. *A Basic Guide to Thermocouple Measurements*, 2018. , pp. 37.

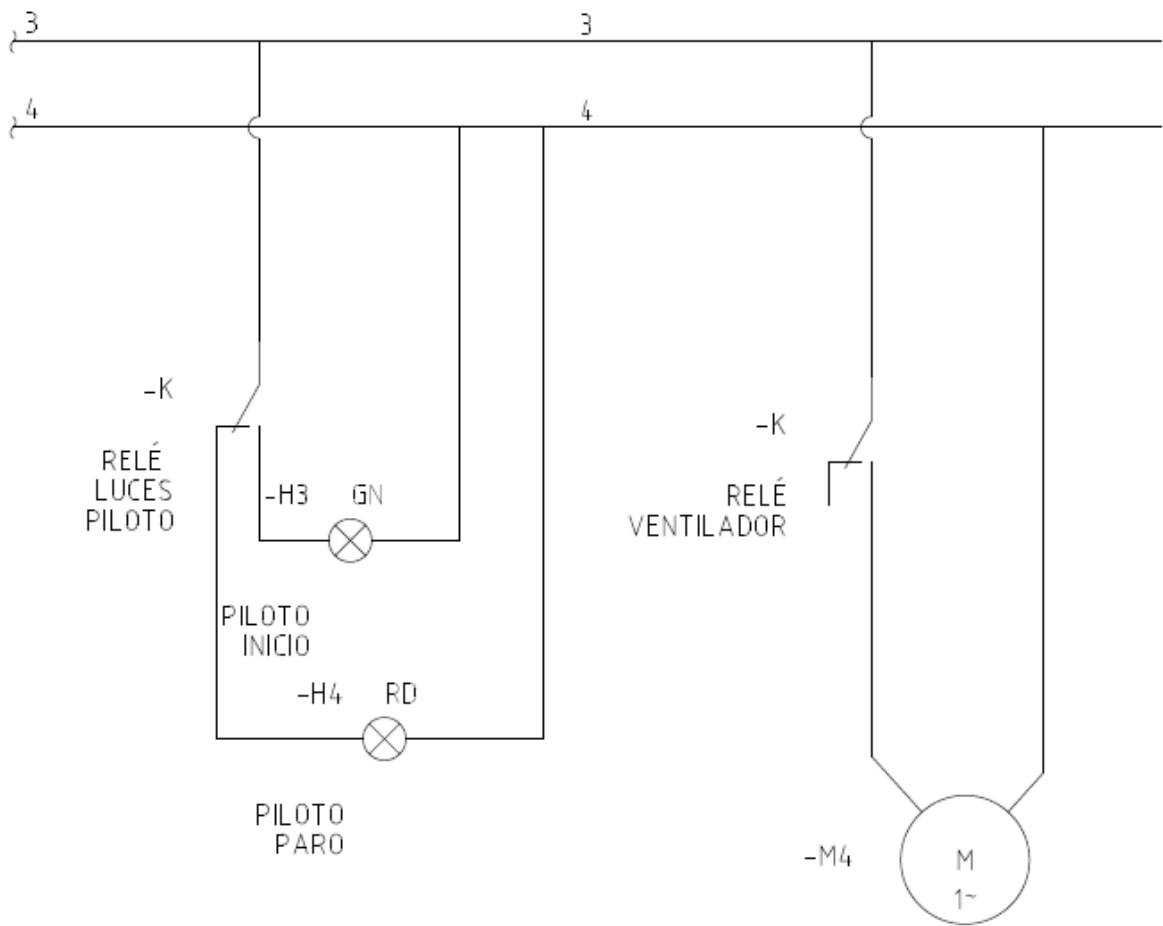
ANEXOS

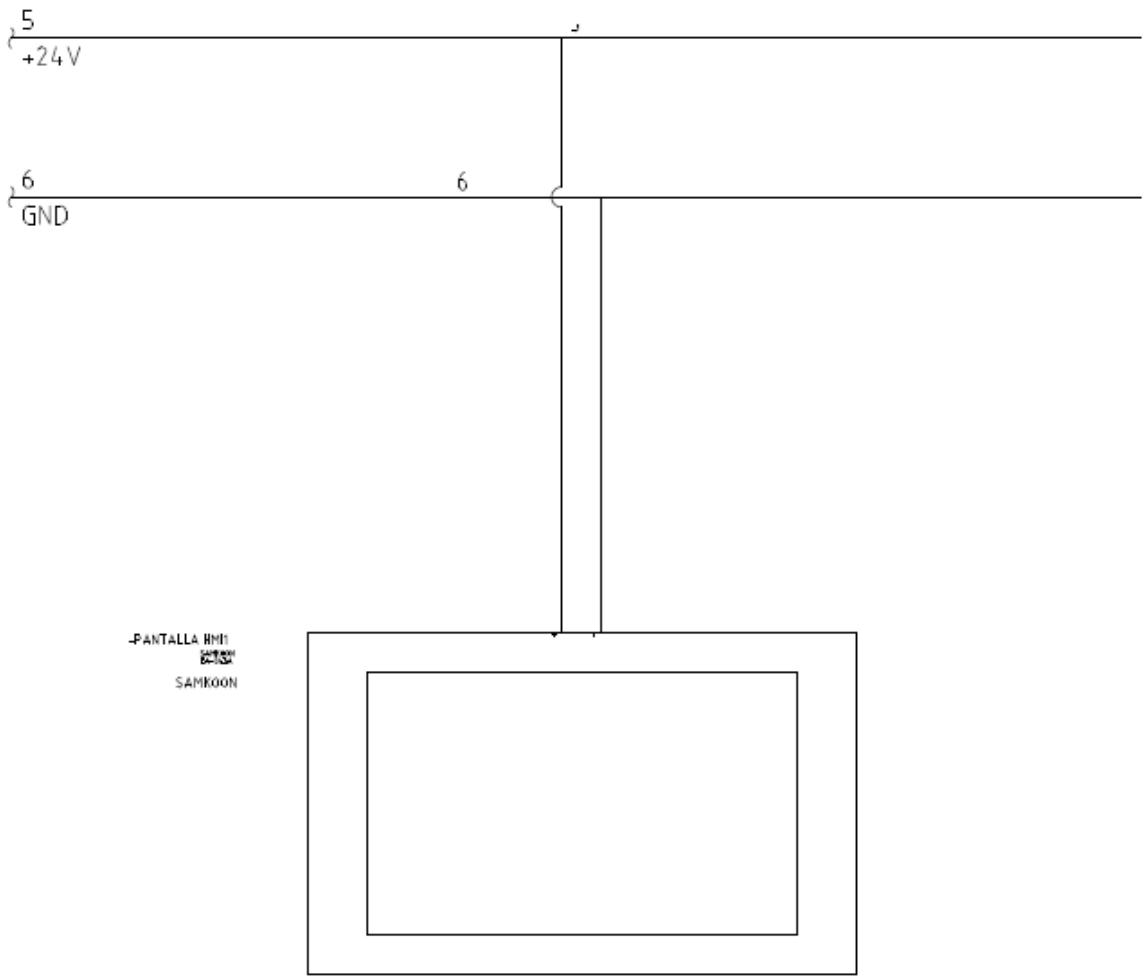
ANEXO A: DIAGRAMAS DE CONEXIÓN.









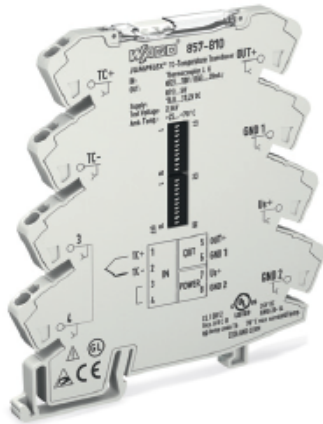


ANEXO B: CARACTERÍSTICAS DEL ACONDICIONADOR WAGO 857-810

857-810

JUMPFLEX® Signal Conditioners

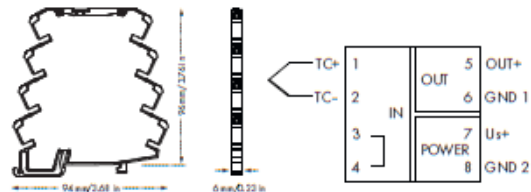
Temperature Signal Conditioner for Thermocouples of Types J and K



Configuration via:



DIP switch



Short description:

The Thermocouple Temperature Signal Conditioner is suitable for the connection of type J and K thermocouples. On the output side, the thermocouple temperature signal conditioner converts the temperature signal into an analog standard signal.

Characteristics:

- For thermocouples of type J and K
- Cold junction compensation (on/off)
- Calibrated scale switching
- Sensor's wire break
- Measuring range underflow/overflow
- Clipping capability allows analog standard signal limitation to upper range values
- Safe 3-way isolation with 2.5kV test voltage acc. to EN 61140

Technical Data	
Configuration:	
Configuration	DIP switch
Input:	
Input signal	Thermocouples
Sensor types	Thermocouples of types J and K
Temperature range	Type J: -150 °C ... +1200 °C Type K: -150 °C ... +1350 °C
Output:	
Output signal	0 ... 20 mA, 4 ... 20 mA, 0 ... 10 V, 2 ... 10 V, 0 ... 5 V, 1 ... 5 V, 0 ... 10 mA, 2 ... 10 mA
Load impedance	≤ 600 Ω (Out= mA) ≥ 2 kΩ (Out= V)
Cold junction compensation	on / off (default: on)
Cold junction error	3 K (typ. 2 K)
Step response	60 ms without cold junction compensation/ 120 ms with cold junction compensation
General specifications	
Nominal supply voltage V_s	24 VDC
Supply voltage range	V_s -30% ... +30%
Current consumption at 24 VDC	≤ 40 mA
Min. measuring span	100 K (configurable)
Transmission error	≤ 0.1% at max. measuring span (typ. J, K)
Transmission error of set measuring span	(150 K / set measuring span [K]) %
Temperature coefficient	≤ 0.04% /K

Description	Item No.	Pack. Unit
JUMPFLEX® Signal Conditioner, for DIN 35	857-810	1
Temperature Signal Conditioner for Thermocouples of Types J and K		
Technical Data		
Environment requirements:		
Ambient operating temperature	-25 °C ... +70 °C	
Storage temperature	40 °C ... +85 °C	
Safety and protection:		
Test voltage (input/output/supply)	2.5 kV AC, 50 Hz, 1 min	
Connection and type of mounting:		
Wire connection	Push-in CAGE CLAMP®	
Cross sections	solid 0.08 mm² ... 2.5 mm² / AWG 24 ... 14 fine-stranded: 0.34 mm² ... 2.5 mm² / AWG 22 ... 14	
Strip lengths	9 ... 10 mm / 0.35 ... 0.39 in	
Dimensions and weight:		
Dimensions (mm) W x H x L	6 x 96 x 94	
Weight	Height from upper edge of DIN 35 rail 44.7 g	
Standards and approvals:		
Conformity marking	CE	
UL 508		
ANSI/ISA 12.12.01	Class I, Div. 2, Grp. ABCD, T4	
Shipbuilding	GL, PRS, NKK, DNV, BV	
EMC immunity of interference	BN 61000-6-2	
EMC emission of interference	BN 61000-6-4	
Accessories	see pages 226 ... 236	

DIP Switch Adjustability

● = ON

857-810

DIP Switch S1

Cold junction compensation		Sensor type		Output signal				Measuring range underflow	Measuring range overflow	Wire break	
1	2	3	4	5	6	7	8				
	on		J					0 ... 20 mA	Lower limit of output range -5 %*	Upper limit of output range + 2,5 %*	Upper limit of output range + 5 %*
●	off	●	K	●				4 ... 20 mA			
					●			0 ... 10 mA	Lower limit of output range	Upper limit of output range + 2,5 %	Upper limit of output range + 5 %
					●			2 ... 10 mA			
						●		0 ... 10 V	Lower limit of output range	Upper limit of output range	Upper limit of output range + 5 %
						●		2 ... 10 V			
							●	0 ... 5 V	Lower limit of output range	Upper limit of output range	Lower limit of output range
							●	1 ... 5 V			

DIP 9 and 10 n.c.

* acc. to NAMUR NE 43

DIP Switch S2

Start temperature					End temperature																											
1	2	3	4	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F	5	6	7	8	9	10	°C	°F			
														225	437							●	625	1157						●	1025	1877
●				-200	-328							0	32									●	650	1202						●	1030	1922
	●			-175	-283		●					10	50								●	675	1247						●	1075	1967	
●	●			-150	-265		●					20	68								●	700	1292						●	1100	2012	
		●		-125	-195			●				30	86								●	725	1337						●	1125	2057	
●	●	●		-100	-148		●	●				40	104								●	750	1382		●	●	●		●	●	1130	2102
	●	●		-90	-130		●	●				50	122								●	775	1427			●	●		●	●	1175	2147
●	●	●		-80	-112		●	●	●			60	140								●	800	1472		●	●	●		●	●	1200	2192
			●	-70	-94				●			70	158								●	825	1517						●	●	1225	2237
●			●	-60	-75		●		●			80	176								●	850	1562						●	●	1250	2282
		●	●	-50	-58		●	●				90	194								●	875	1607						●	●	1275	2327
●	●	●	●	-40	-40		●	●	●			100	212								●	900	1652		●	●	●		●	●	1300	2372
			●	-30	-22				●			125	257								●	925	1697						●	●	1325	2417
●	●	●	●	-20	-4		●	●	●			150	302								●	950	1742						●	●	1350	2462
			●	-10	14		●	●	●			175	347								●	975	1787						●	●	1375	2507
●	●	●	●	0	32		●	●	●			200	392								●	1000	1832						●	●	1400	2552

The minimum distance from the start temperature to the end temperature may not fall short of 100K degrees on the Celsius (°C) scale or 212K degrees on the Fahrenheit (°F) scale.

Default Settings

All DIP switches are in „OFF“ position for delivery.

Cold junction compensation	on
Thermocouple	Type J
Start temperature	0 °C
End temperature	1000 °C
Output signal	0 ... 20 mA
Measuring range underflow	0 mA
Measuring range overflow	20.5 mA
Wire break	21 mA

24 Volt Supplies For Process Control

6EP SERIES


30-1000 Watts




- CE Marked - LVD
- DIN Rail Mounting
- Rugged for Industrial Use
- Stabilised and Low Ripple
- EN60950 Approval
- High Efficiency
- Adjustable Outputs

Specification

Input Voltage	<ul style="list-style-type: none">• 93-264 V (110-350 VDC) Low Power & Wide Input models - (Note: 6EP1 336 1SH01 187.5-264.0 V AC input only)• 93-132/187-264 V switch selectable - Industry, Single Phase & Flat Design models• 360-550 V 3 Phase - Three Phase models
Input Frequency	<ul style="list-style-type: none">• 47-63 Hz
Harmonic Distortion	<ul style="list-style-type: none">• Compliant with EN61000-3-2- Single Phase models
Inrush Current	<ul style="list-style-type: none">• Depends on model but < 55 A max (8.8 A'S I't max)
Hold Up Time	<ul style="list-style-type: none">• 10 ms min (except 3ø units which have >3 ms)
Output Voltage	<ul style="list-style-type: none">• Fixed 24 V output - Low Power, Wide Input & Flat Design models• 22.8-26.4 V - Industry, Single Phase & Three Phase models
LED Output Indicator	<ul style="list-style-type: none">• Indicates output ON
Line & Load Regulation	<ul style="list-style-type: none">• <±8% for line & load change in specified range - Low Power models• <±3% for line & load change in specified range - Flat Design models• <±2% for line & load change in specified range - Three Phase models• <±1% for line & load change in specified range - Industry, Single Phase & Wide Input models
Output Ripple & Noise	<ul style="list-style-type: none">• <250 mV pk-pk - Low Power models• <150 mV pk-pk - Industry, Single Phase and Flat Design models• <50 mV pk-pk - Wide Input
Short Circuit & Overload Protection	<ul style="list-style-type: none">• Electronic with automatic recovery
Protection Class	<ul style="list-style-type: none">• IEC 536 class 1
Efficiency	<ul style="list-style-type: none">• 80 to 89% depending on model
Operating Temperature	<ul style="list-style-type: none">• 0 °C to 65 °C - Wide Input, Industry, Single Phase & Flat Design models• 0 °C to 55 °C - Three Phase & Low Power models
Storage Temperature	<ul style="list-style-type: none">• -25 °C to +85 °C
Humidity Rating	<ul style="list-style-type: none">• Rating F to DIN 40040, DIN50014 - Three Phase models
Degree of Protection	<ul style="list-style-type: none">• VDE0 470, IEC 529, IP 20
EMC	<ul style="list-style-type: none">• EN 55022 B - Low Power, Wide Input & Three Phase models• EN 55011 A - Flat Design models• EN 55011 B/EN55022 B - Industry & Single Phase models
Noise Immunity	<ul style="list-style-type: none">• EN50082-2
Safety Approval	<ul style="list-style-type: none">• EN 60950 SELV

Tel: +44 (0)118 984 5515 

Tel: +49 (0)700 9977 1000 

Output Voltage & Current Ratings - Low Power Models

Model Number	6EP1 331 1SH01	6EP1 332 1SH41
Output	24 V @ 1.3 A	24 V @ 2.5 A
Input Circuit Breaker Rating	From 10 A Type C or From 16 A Type D	From 10 A Type C or From 16 A Type D

Output Voltage & Current Ratings - Wide Input Models

Model Number	6EP1 332 1SH12	6EP1 332 1SH22	6EP1 334 1SH01	6EP1 336 1SH01
Output	24 V @ 2.5 A	24 V @ 4 A	24 V @ 10 A	24 V @ 20 A
Input Circuit Breaker Rating	From 10 A Type C or From 6 A Type D	From 10 A Type C or From 6 A Type D	From 16 A Type C or From 8 A Type D	From 16 A Type C From 8 A Type D

Output Voltage & Current Ratings - Single Phase Models

Model Number	6EP1 331 2BA00	6EP1 333 2BA00	6EP1 334 2BA00
Output	24 V @ 2 A	24 V @ 5 A	24 V @ 10 A
Input Circuit Breaker Rating	From 6 A Type C or From 3 A Type D	From 10 A Type C or From 6 A Type D	From 16 A Type C or From 8 A Type D

Output Voltage & Current Ratings - Industry Models

Model Number	6EP1 333 2AA00	6EP1 334 2AA00
Output	24 V @ 5 A	24 V @ 10 A
Input Circuit Breaker Rating	From 10 A Type C or From 6 A Type D	From 16 A Type C or From 8 A Type D

Output Voltage & Current Ratings - Flat Design Models



Model Number	6EP1 333 1AL11	6EP1 334 1AL11
Output	24 V @ 5 A	24 V @ 10 A
Input Circuit Breaker Rating	From 10 A Type C or From 6 A Type D	From 16 A Type C or From 8 A Type D

Output Voltage & Current Ratings - Three Phase Models

Model Number	6EP1 434 2BA00	6EP1 436 2BA00	6EP1 437 2BA00	6EP1 437 2BA10
Output	24 V @ 10 A	24 V @ 20 A	24 V @ 30 A	24 V @ 40 A
Input Circuit Breaker Rating	Three Phase Coupled Type C 25 A	Three Phase Coupled Type C 25 A	Three Phase Coupled Type C 25 A	Three Phase Coupled Type C 25 A

Mechanical Details

Model Number	Mechanical Details			
	Width (mm)	Height (mm)	Depth (mm)	Weight (kg)
6EP1 331 1SH01	72	90	55	0.3
6EP1 332 1SH41	126	90	55	0.4
6EP1 332 1SH12	80	135	120	0.5
6EP1 332 1SH22	80	135	120	0.5
6EP1 334 1SH01	200	125	135	1.8
6EP1 336 1SH01	240	130	131	4.0
6EP1 331 2BA00	50	125	125	0.4
6EP1 333 2BA00	75	125	125	0.75
6EP1 334 2BA00	100	125	135	1.1
6EP1 333 2AA00	75	125	125	0.6
6EP1 334 2AA00	100	125	135	0.8
6EP1 333 1AL11	160	130	60	0.7
6EP1 334 1AL11	220	130	60	1.2
6EP1 434 2BA00	280	125	92	2.0
6EP1 436 2BA00	280	125	92	2.0
6EP1 437 2BA00	280	180	92	3.6
6EP1 437 2BA10	280	180	92	3.6

Tel: +33 (0)820 801 401 Tel: +41 (0)5648 33400 

Rev 1.0

DIN-Cert

24 Volt Supplies For Process Control 30-1000 Watts 6EP Series

www.xppplc.com

ANEXO D: CONTROLADOR FUNCIONANDO

