REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA AUTOMATIZACIÓN DE DOS HORNOS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO PERTENECIENTES AL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA, DESGASTE Y FALLA DEL DEPARTAMENTO DE MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

MARCO VINICIO HERRERA GARCÍA
marcovinher@yahoo.com

DIRECTOR: Ing. David Pozo, Msc.
david.pozo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. Carlos Díaz, Msc.
Carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Abril 2015

DECLARACIÓN

Yo, Marco Vinicio Herrera García, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

Marco Vinicio Herrera García

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marco Vinicio Herrera García bajo mi supervisión.

_____	_____
Ing. David Pozo, MSc.	**Ing. Carlos Díaz, MSc.**
DIRECTOR DEL PROYECTO	**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

AGRADECIMIENTO

La vida en ocasiones limita las aspiraciones y sueños al poner obstáculos en el camino, los mismos que simplemente retardan la consecución de metas, siempre y cuando la convicción y la tenacidad te obliguen a no abandonar los ideales planteados; este proyecto es el más claro ejemplo de estos acontecimientos, convirtiéndose de este modo en un muy esperado sueño que a pesar de parecer inalcanzable ha llegado a su fin; claro está que este hecho solamente ha sido posible gracias a las personas que han respaldado este duro caminar. Mis padres quienes nunca perdieron su confianza y aún contra mi voluntad impulsaban en su día a día que mi ánimo no desmaye, son los principales artífices de esta victoria por ello les estoy profundamente agradecido por el enorme esfuerzo y dedicación que me han brindado a lo largo de mi existencia; agradezco también a mis hermanos por su continua ayuda y consejos que han constituido otro de los fuertes pilares de mi vida y a los profesores en especial a los que han podido ser verdaderos maestros al priorizar su apoyo y dedicación a través de las enseñanzas impartidas en el diario vivir universitario.

Finalmente quiero agradecer de manera especial a David quien dirigió este proyecto, a pesar de sus múltiples ocupaciones estuvo siempre con las puertas abiertas para brindar su apoyo incondicional y sus consejos a fin de constituirse en el sustento del presente estudio; de igual manera quiero agradecer al Ing. Carlos Díaz codirector del Proyecto por su aporte y consejos y a la Ing. Patricia Proaño por la apertura y apoyo que brindó al presente estudio.

MARCO

DEDICATORIA

El presente proyecto es producto del casi inagotable esfuerzo que la vida obliga a cumplir para poder disfrutar de sus placeres en unión de los seres amados; en tal sentido quiero dedicar este proyecto a mis padres y hermanos por su incondicional apoyo en todas las etapas de mi vida.

Quiero extender la dedicatoria a Vanne, la mujer que ha compartido conmigo grandes momentos positivos y negativos, pues ella estuvo pendiente de que no desmaye en este caminar y me apoyó para conseguir culminar esta meta tan ansiada.

MARCO

CONTENIDO

DECLARACIÓN I

CERTIFICACIÓN II

AGRADECIMIENTO III

DEDICATORIA IV

CONTENIDO V

RESUMEN VIII

PRESENTACIÓN X

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 1

1.1 TRATAMIENTO TÉRMICO 1
1.1.1 RECOCIDO 3
1.1.2 NORMALIZADO 3
1.1.3 TEMPLE O TEMPLADO 3
1.1.4 REVENIDO 4

1.2 HORNOS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO 4
1.2.1 HORNOS SEGÚN SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN 5
1.2.1.1 Hornos Eléctricos 5
1.2.1.1.1 Hornos de Inducción Eléctrica 5
1.2.1.1.2 Hornos de Arco Eléctrico 6
1.2.1.1.3 Hornos de Resistencia Eléctrica 6
1.2.1.2 Hornos de Combustión 7
1.2.2 HORNOS SEGÚN SU ATMÓSFERA 8
1.2.2.1 Horno de Vacío 8
1.2.2.2 Horno de Atmósfera Controlada 8
1.2.2.3 Hornos Criogénicos 9

1.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA 9
1.3.1 ESCALAS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA 9
1.3.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA 11
1.3.2.1 Termómetro de Vidrio 11
1.3.2.2 Termómetro Bimetálico 12
1.3.2.3 Termoresistencia (RTD) 13
1.3.2.4 Termistor 15
1.3.2.5 Termocupla o termopar 16
1.3.2.6 Circuitos Integrados 18
1.3.2.7 Pirómetro de Radiación 19

1.4 SISTEMAS DE CONTROL 19
1.4.1 SISTEMAS DE CONTROL MANUAL 20
1.4.2 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO 21
1.4.2.1 Sistemas de Control Automático de Lazo Abierto 21
1.4.2.2 Sistemas de Control Automático de Lazo Cerrado 22

CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE 23

2.1 CONDICIONES DE TRABAJO DEL SISTEMA 23

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS 25
2.2.1 NIQUELINAS 27
2.2.2 SISTEMA DE CONTROL PREVIO 28

2.3 SISTEMA DE APERTURA Y DETECCIÓN 29

2.4 SENSADO DE TEMPERATURA 29

2.5 PLC S7-1200 SIMATIC 30
2.5.1 ANÁLISIS DE ENTRADAS Y SALIDAS REQUERIDAS 32
2.5.2 MÓDULO SM 1231 AI 4 TC (ENTRADAS TIPO TERMOPAR) 35

2.6 PANTALLA TÁCTIL DELTA (HMI LOCAL) 36

2.7 SWITCH ETHERNET D-LINK 38

2.8 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DELTA 38

2.9 SELECTOR 40

2.10 LUCES PILOTO 40

2.11 CONTACTORES 40

2.12 TABLEROS DE CONTROL 41
2.12.1 TABLERO DE CONTROL PRINCIPAL 41
2.12.2 TABLERO DE CONTROL SECUNDARIO 43

2.13 DIAGRAMAS DEL SISTEMA 43
2.13.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO 44
2.13.2 DIAGRAMA DEL PLC 45

2.14 COMPARACIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO CON EL SISTEMA PREVIO 46

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SOFTWARE 48

3.1 TIA PORTAL V11 48
3.1.1 CREACIÓN DE PROYECTOS 50
3.1.2 AGREGAR MÓDULOS ADICIONALES 52
3.1.3 CREAR VARIABLES PARA E/S DEL CPU 52
3.1.4 PROGRAMACIÓN DEL S7-1200 53
3.1.5 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN 54
3.1.5.1 Esquema de Contactos (KOP) 55
3.1.5.2 Diagrama de Funciones (FUP) 55
3.1.5.3 Lenguaje de Control Estructurado (SCL) 56

3.1.6 COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS 56

3.2 DOPSOFT 1.01.08 56
3.2.1 CREAR UN PROYECTO 57
3.2.2 ENTORNO DE TRABAJO 59
3.2.3 ELEMENTOS DISPONBLES 60

3.3 PROGRAMACIÓN DEL SIMATIC S7-1200 60
3.3.1 CONFIGURACIONES BÁSICAS DEL PLC S7-1200 61
3.3.2 PROGRAMA PRINCIPAL DEL PLC S7-1200 62
3.3.3 ADQUISICIÓN DE TEMPERATURA DE LOS HORNOS 63
3.3.4 RAMPA 64
3.3.5 RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN) 67
3.3.6 ENCENDIDO DE LAS NIQUELINAS 68

3.4 PROGRAMACIÓN DEL HMI LOCAL 70
3.4.1 PANTALLA DE PRESENTACIÓN 70
3.4.2 PANTALLA DE SELECCIÓN 71
3.4.3 PANTALLA RAMPA 72
3.4.4 PANTALLA RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN) 74
3.4.5 PANTALLA DE VISUALIZACIÓN 76
3.4.6 PANTALLA DEL GRÁFICO DEL PROCESO 77

3.5 PROGRAMACIÓN DEL HMI REMOTO 78
3.5.1 PANTALLA DE PRESENTACIÓN 79
3.5.2 PANTALLA PRINCIPAL 80

CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO 83

4.1 PRUEBAS EN VACÍO 83
4.1.1 MÁXIMA PENDIENTE DE CALENTAMIENTO 83
4.1.2 OPERACIÓN EN RAMPA 87
4.1.3 OPERACIÓN EN RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN) 90

4.2 PRUEBAS CON CARGA 93
4.2.1 MÁXIMA PENDIENTE DE CALENTAMIENTO 93
4.2.2 OPERACIÓN EN RAMPA 95
4.2.3 OPERACIÓN EN RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN) 98

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 102

1.1 CONCLUSIONES 102

1.2 RECOMENDACIONES 104

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

ANEXOS 108
ANEXO A. PRUEBAS DE LOS HORNOS EN VACÍO 108
ANEXO B. PRUEBAS DE LOS HORNOS CON CARGA 113
ANEXO C. FICHA TÉCNICA DE LOS CPU DEL PLC S7-1200 118
ANEXO D. FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO SM AI 4XTC 121

ANEXO E. FICHA TÉCNICA DE LA PANTALLA TÁCTIL DELTA 124
ANEXO F.FICHA TÉCNICA DE LA FUENTE DE VOLTAJE DELTA 126

RESUMEN

Al iniciar el presente proyecto, el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional estaba provisto de un sistema obsoleto y disfuncional para controlar la operación de los hornos utilizados para el Tratamiento Térmico de Metales; en tal sentido y consiente de la necesidad del Laboratorio de contar con un Módulo Didáctico eficiente que permita aportar al aprendizaje de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica en un área base para su formación; se planteó el Diseño e Implementación de un Sistema de Automatización de los Hornos que permitan a los estudiantes aprender el desarrollo y ejecución de tratamientos térmicos de metales.

El Proyecto sustenta su funcionamiento en el PLC S7-1200 de SIEMENS que constituye el centro de control de la operación de los hornos, su utilización permite que el módulo sea robusto y compacto; para lograr que el sistema sea amigable y de fácil maniobrabilidad se cuenta con una pantalla táctil que constituye un HMI local ubicado en el tablero de control principal, a más de ello existe otra alternativa de control basada en la utilización de un HMI remoto, el mismo que se ejecuta en LabVIEW desde un computador; los dos sistemas se comunican con el PLC a través de la interfaz Profinet que utiliza un switch Ethernet para la coordinación de las dos interfaces; las mismas que funcionan de forma independiente pero coordinada ya que no podrán dar indicaciones contradictorias al PLC, logrando así mejorar su operación desde los dos puntos de control.

Los HMIs usados permiten configurar la operación del equipo, en tal sentido es necesario que inicialmente se seleccione el horno con el que se va a trabajar, posterior a esto se debe escoger si se ejecutará un Control de Gradiente Variable tipo Rampa o un Control de Gradiente Variable de múltiples Rampas denominado Escalón como proceso para controlar la variación de temperatura del horno operativo; finalmente es necesario indicarle al sistema la temperatura máxima que

se desea alcanzar, la velocidad de calentamiento que se aplica y el tiempo que la muestra se mantendrá a la temperatura especificada; siendo estrictamente necesario el ingreso de estos datos para que el horno pueda operar.

Adicionalmente tanto en el tablero de control principal y en las interfaces se cuenta con elementos de visualización que permiten monitorear continuamente la temperatura de los hornos y su operación; para proteger la apertura inconsciente de las puertas se dispone de interruptores magnéticos que detectan de inmediato cuando las puertas de los hornos se abren.

Desde la pantalla de LabVIEW es factible exportar los datos de la variación de la temperatura en función del tiempo a un archivo de Excel, hecho que permite realizar cualquier tratamiento posterior a los datos obtenidos.

PRESENTACIÓN

El proyecto implementado es un Sistema para Automatización de Hornos para Tratamiento Térmico, cuyo propósito es permitir a los estudiantes aprender el desarrollo y ejecución de tratamientos térmicos de una manera sencilla pero a la vez versátil gracias a su capacidad de seleccionar la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia de la temperatura seleccionada a través de un sistema sencillo, amigable y de fácil utilización; para una mejor comprensión del proyecto, éste se estructura de la siguiente manera:

El capítulo 1 aporta con la fundamentación teórica introductoria para el entendimiento de los diferentes tipos de tratamientos térmicos y los hornos empleados para su desarrollo, se revisa también los principales métodos de medición de temperatura que es la variable más importante dentro del proceso y finalmente se realiza una revisión general de las características de los Sistemas de Control y los Controladores Lógicos Programables (PLCs).

El capítulo 2 detalla el diseño del hardware o la parte constructiva del sistema, en esta sección se muestran las características de los hornos empleados, el dimensionamiento de los componentes, la selección de los sensores, el estudio detallado del PLC SIMATIC S7-1200, sus módulos adicionales y sus características, la revisión de la pantalla táctil DELTA que constituye el HMI local, los elementos de entrada, protección y salida utilizados y la distribución y contenido de los tableros de control.

El capítulo 3 explica el desarrollo del software necesario para el funcionamiento del sistema implementado, dentro de lo cual se diferencia la programación del PLC efectuada con TIA PORTAL V11, el desarrollo del software de la pantalla táctil DELTA utilizando el paquete DOPSoft 1.01.08 y el desarrollo del HMI remoto en base al programa LabVIEW 2011. Para explicar los principios básicos del software, se detalla la estructura de los programas en base a los diagramas de flujo que los rigen.

El capítulo 4 contiene las pruebas a las que fue sometido el sistema, tanto para determinar la capacidad de trabajo de los hornos como para verificar el correcto funcionamiento del sistema en vacío y sometido a la carga característica que se usa en las prácticas de laboratorio en las que se emplean los hornos; en el capítulo se incluyen los resultados obtenidos en dichas pruebas.

El capítulo 5 resume las conclusiones que se obtuvieron a lo largo del estudio, diseño, construcción y pruebas del prototipo; se indican también algunas recomendaciones importantes que se deben tomar en cuenta para conseguir una mejor utilización del equipo.

CAPÍTULO 1
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El Diseño e Implementación del Sistema para Automatizar los Hornos para Tratamiento Térmico requiere una correcta comprensión del proceso y de los elementos relacionados con el mismo; en tal sentido es necesario e importante fundamentar teóricamente dichos procedimientos y componentes a fin de obtener un panorama general que sustente el desarrollo del proyecto.

Acorde a lo indicado, el estudio inicia con una breve revisión de las características y tipos de tratamientos térmicos de metales y los hornos utilizados para este propósito, posterior a ello se estudia de forma general los principales métodos de medición de temperatura y finalmente se analizan los procesos de control de temperatura y los elementos idóneos para llevarlos a efecto.

1.1 TRATAMIENTO TÉRMICO

El Tratamiento Térmico es una combinación de operaciones aplicadas a un metal o aleación solidificada, el proceso incluye el calentamiento de la muestra a una temperatura predefinida, permanencia a esta temperatura y posterior enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente; logrando así cambiar sus propiedades mecánicas, forma o estructura con el propósito de mejorar condiciones como dureza, resistencia y maleabilidad de las muestras sometidas al tratamiento a fin de obtener un óptimo desempeño en su utilización. [1] - [3]

Las principales características de las etapas fundamentales del tratamiento térmico se describen brevemente:

- El calentamiento puede ser de crecimiento constante y sostenido o de forma escalonada con tiempos de crecimiento y estabilización variables; la rapidez del calentamiento depende del tipo y tamaño de la muestra que se esté tratando, cambios de temperatura demasiado rápidos pueden ser

peligrosos o dañinos en ciertas circunstancias pero necesarios en otros casos; en tal sentido es importante tener la capacidad de controlar la rapidez del calentamiento y variarla en función del proceso. [3]

- La superficie de las muestras se calienta más rápidamente que su interior, hecho que obliga a la existencia del tiempo de permanencia para lograr que todo el material se caliente uniformemente; este tiempo depende del tipo de la muestra tratada y de la rapidez de calentamiento de la misma, en base a una relación directamente proporcional ya que a mayor rapidez de calentamiento mayor será el tiempo de permanencia. [3]
- El proceso de enfriamiento por su parte utiliza distintos medios en función del tipo de muestra y las propiedades deseadas en la misma, entre los mecanismos de mayor utilización para esta etapa se encuentran: aire, agua, salmuera (mezcla de agua y cloruro de sodio), salmuera con hielo, aceite, aire a presión y baño de sales. [3]

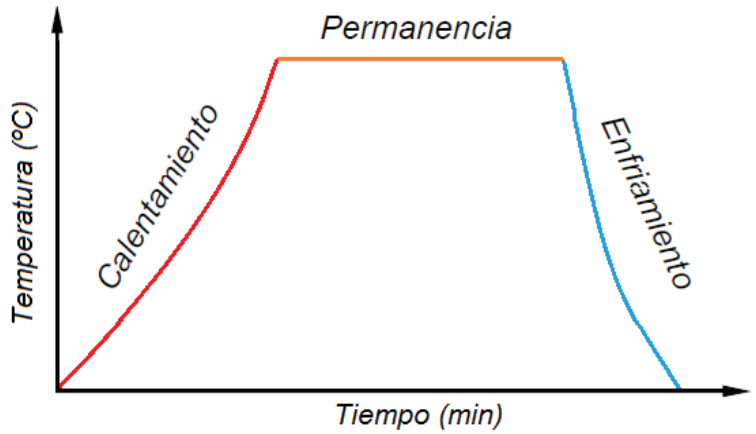


Figura 1.1. Representación gráfica del Tratamiento Térmico, tomado de [3]

La figura 1.1 muestra un esquema general de las etapas que conforman el tratamiento térmico, es importante señalar que cada una de ellas tiene absoluta independencia y que de sus variaciones se derivan los diferentes tipos de tratamientos térmicos, que pueden ser: recocido, normalizado, temple y revenido.

1.1.1 RECOCIDO

El recocido es un tratamiento inicial que consiste en el calentamiento del material a la temperatura crítica superior que está entre 800 y 925ºC, un posterior mantenimiento y finalmente un enfriamiento lento dentro del horno o usando algún material aislante del calor; el propósito del recocido es incrementar la ductilidad o elasticidad al reducir la resistencia mecánica y la dureza de los materiales. Existen algunas alternativas o variantes del proceso de recocido, las mismas que se diferencian especialmente en la temperatura de calentamiento y el tiempo de enfriamiento, dando lugar a diferentes resultados y utilidades. [1] - [4]

1.1.2 NORMALIZADO

El normalizado conocido también como perlitización es un tratamiento térmico intermedio previo al revenido o templado, aunque puede ser también un tratamiento final que se utiliza principalmente en muestras con un bajo porcentaje de carbono; se basa en el calentamiento entre 30 y 50ºC por encima de la temperatura crítica superior (800 a 925ºC), seguida de un tiempo de mantenimiento, para luego someterlo a un enfriamiento rápido logrado con la utilización de aire natural o forzado hasta alcanzar la temperatura ambiente; su propósito es mejorar la maquinabilidad, refinar el grano y homogenizar la estructura del material, obteniendo una mayor resistencia mecánica, para optimizar su respuesta en futuros procesos de endurecimiento. [1] - [4]

1.1.3 TEMPLE O TEMPLADO

Con el propósito de obtener la dureza y resistencia máximas del material tratado a pesar de sacrificar su ductilidad, se utiliza el temple como tratamiento térmico final; este procedimiento consiste en el calentamiento de la muestra hasta la temperatura crítica superior (800 a 925ºC), después de lo cual se usa un tiempo de permanencia para lograr que todo el material llegue a la temperatura deseada

y finalmente se somete el material a un enfriamiento muy rápido y brusco que define la calidad del temple y se logra con la utilización de salmuera, agua, sales fundidas, aceite o aire. La dureza del material es dependiente de la cantidad de carbono que contenga, siendo en tal sentido un proceso principalmente aplicado a materiales con alto contenido de carbono. [1] - [4]

1.1.4 REVENIDO

El endurecimiento de los materiales tratados térmicamente limita su utilización debido a la fragilidad resultante de estos procesos, en tal sentido es necesario mejorar esta condición para obtener mayores aplicaciones prácticas de las muestras aliviando los esfuerzos internos a través del proceso de revenido, corrigiendo así la ductilidad del material sin eliminar la dureza producto del templado; este tratamiento térmico final puede ser bajo, medio o alto; se efectúa tras un proceso de temple y consiste en el calentamiento del material endurecido en un rango entre 250 y 650ºC, siendo esta etapa la que define la calidad del proceso; posteriormente se mantiene la muestra a la temperatura alcanzada y tras esta etapa se somete a un enfriamiento. [1] - [4]

El éxito del tratamiento térmico está relacionado con el correcto control de las etapas del proceso antes descritas y de la utilización de hornos que puedan cumplir estas exigencias; en respuesta a ello es conveniente hacer una revisión de los principales hornos utilizados para el tratamiento térmico.

1.2 HORNOS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO

Los hornos son componentes que permiten generar calor y mantenerlo por el tiempo que requiera un proceso, constituyen depósitos cerrados formados por una cámara o mufla; su capacidad de almacenamiento térmico permite que la industria metalúrgica los emplee para realizar el tratamiento térmico de muestras metálicas a las temperaturas requeridas para cada procedimiento. [5]

Los hornos utilizados para el tratamiento térmico son de diseño especial y pueden clasificarse de acuerdo a su principio de operación o en función de la atmósfera que utilizan, es decir el medio gaseoso que está en contacto con la muestra.

1.2.1 HORNOS SEGÚN SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El principio de operación se refiere al material que se utiliza como fuente energética para producir el calor necesario para el tratamiento térmico, de acuerdo a este aspecto los hornos pueden ser eléctricos o de combustión.

1.2.1.1 Hornos Eléctricos

Los hornos que utilizan electricidad como fuente energética también son conocidos como hornos electrotérmicos, para su operación suelen utilizar el efecto Joule en cuyo caso pueden ser hornos de inducción eléctrica o de arco eléctrico, por su parte existen también hornos que utilizan resistencias eléctricas llamadas niquelinas para su funcionamiento. [5], [6]

1.2.1.1.1 Hornos de Inducción Eléctrica

Los hornos de inducción eléctrica utilizan para su funcionamiento el mismo principio que el de un transformador, la corriente eléctrica circula por una bobina exterior induciendo flujo magnético, internamente separado por un material aislante se encuentra un medio conductor denominado crisol el cual permite que el flujo magnético se transforme en una altísima corriente que se convierte en calor. Los hornos de inducción pueden focalizar el lugar específico para el calentamiento al utilizar el interior del crisol con este propósito, hecho que permite producir materiales de alta pureza y crecimiento de grano controlado, siendo un tratamiento limpio y energéticamente eficiente. [5]

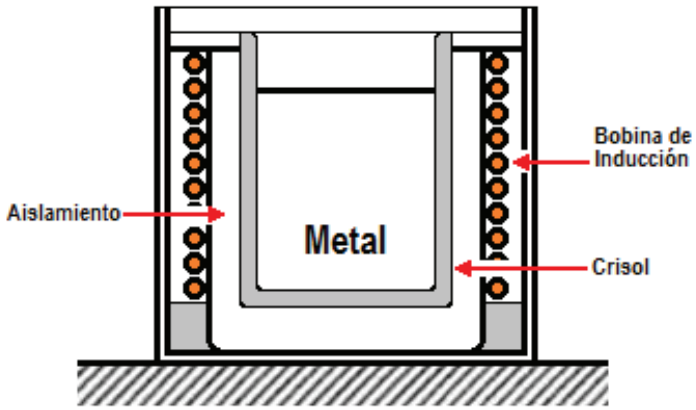


Figura 1.2. Horno de inducción eléctrica, tomado de [18]

1.2.1.1.2 Hornos de Arco Eléctrico

Los hornos de arco eléctrico están compuestos por un material conductor denominado crisol dentro del cual se introducen electrodos que permiten el flujo eléctrico ocasionando un arco con la capacidad de calentar la muestra a través de su superficie, basándose en un principio de funcionamiento similar al de las soldadoras eléctricas. [5]

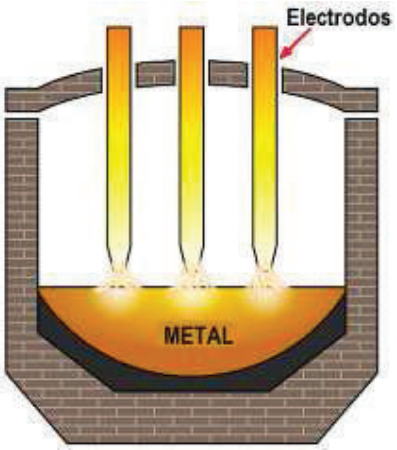


Figura 1.3. Horno de arco eléctrico, tomado de [19]

1.2.1.1.3 Hornos de Resistencia Eléctrica

Los hornos de resistencia eléctrica pueden ser de cámara o mufla y de baño con crisol, son muy sencillos aunque su eficiencia está limitada a la capacidad de aislar adecuadamente el ambiente de calentamiento para no perder potencia

calorífica; producen elevación de temperatura por acción del paso de corriente eléctrica a través de resistencias o niquelinas de nicrom (níquel y cromo), aleaciones de carburo de silicio, molibdeno, tungsteno o grafito que rodean el horno y son muy útiles en laboratorios y aplicaciones en las que se necesita un horno pequeño con un control de temperatura preciso. [3], [5]

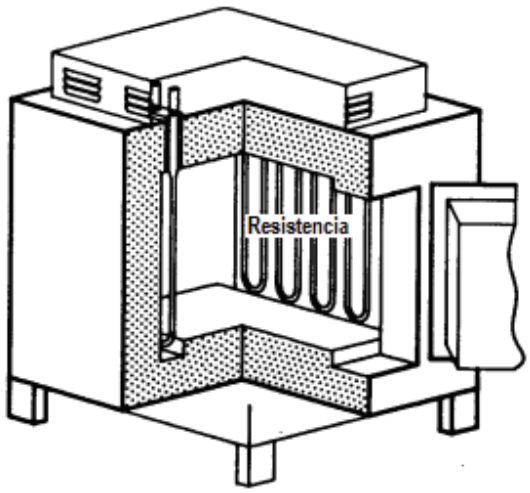


Figura 1.4. Horno de resistencia eléctrica, tomado de [20]

Los hornos de mufla por lo general son rectangulares y están construidos de material refractario altamente resistente al fuego que puede ser grafito, carburo de silicio o cerámicas de alta calidad; en este tipo de hornos las piezas se colocan directamente en el interior, mientras que en los de crisol las piezas se sumergen en baños de sales fundidas contenidas dentro del horno, normalmente tienen forma circular o elíptica y están construidos de un acero especial para alta temperatura denominado acero refractario o de fundición de hierro. [5]

1.2.1.2 Hornos de Combustión

Los hornos de combustión producen calor a partir de la incineración de gasolina, diesel, gas u otros combustibles al mezclarse con el aire; estas sustancias tienen alto poder calorífico a pesar que no todas producen llama; las variantes de hornos de combustión incluyen: las muflas donde la calefacción es indirecta, los materiales no entran en contacto directo con las muestras y tienen atmósfera poco oxidante; las semimuflas cuya llama no hace contacto con el material tratado

pero los productos de la combustión sí, ocasionan una atmósfera oxidante en especial a temperaturas elevadas; y los hornos de crisol que permiten introducir muestras en un baño caliente de sales fundidas consiguen un pobre rendimiento térmico. Los hornos de combustión son más económicos que los eléctricos pero el control de la temperatura se dificulta. [3], [5], [6]

1.2.2 HORNOS SEGÚN SU ATMÓSFERA

La atmósfera es el medio gaseoso del interior del horno que está en contacto directo con las muestras tratadas; puede ser neutro, oxidante o reductor; en función de esta característica se protege o deteriora el material tratado, siendo las principales alternativas utilizadas: vacío, atmósfera controlada, criogénica, etc. [3]

1.2.2.1 Horno de Vacío

Los hornos de vacío son sometidos a una profunda succión que desaloja casi todo el aire del interior del horno antes de iniciar el tratamiento térmico, este hecho permite eliminar la oxidación y la descarburización superficial de una forma muy eficiente; las temperaturas máximas de estos hornos son de hasta 1260 ℃ pudiendo ser empleados para: recocido, normalizado, temple y revenido. [2]

1.2.2.2 Horno de Atmósfera Controlada

Los hornos de atmósfera controlada tienen en su interior una atmósfera gaseosa que permite proteger a las muestras de la oxidación y la descarburización a temperaturas elevadas (780 a 940℃); poseen un sens or que determina el contenido de carbono, hecho que permite balancear la atmosfera logrando obtener superficies limpias; se suelen emplear para: recocido, normalizado, temple y revenido en lotes de más de 200kg. [2]

1.2.2.3 Hornos Criogénicos

Los hornos criogénicos son utilizados para realizar tratamientos a temperaturas bajo cero, la temperatura desciende lentamente con ayuda de hielo seco o nitrógeno que puede estar en estado gaseoso o líquido y se utilizan para aceros de alto carbono y aceros empleados en la construcción de herramientas. [2]

Como se ha evidenciado en los apartados anteriores, la temperatura es el aspecto de mayor importancia dentro del tratamiento térmico de materiales; este hecho obliga a dar una mayor relevancia al método escogido para la medición de esta variable, motivo por el cual se desarrolla un breve estudio de los principales métodos de medición de temperatura; logrando así mejorar el criterio al momento de seleccionar la alternativa más adecuada para el tratamiento térmico.

1.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud escalar que se asocia a la sensación de calor o frío producto de la energía interna de un sistema termodinámico. La variación de temperatura hace que las sustancias cambien de estado y propiedades, en tal sentido es necesario ejercer un preciso control sobre esta variación a fin de conseguir las propiedades deseadas de los materiales sometidos a tratamiento térmico; la base del control de temperatura se obtiene al conocer con exactitud su valor; siendo necesario tener un claro conocimiento de las escalas de medición de temperatura y los principales métodos para conocer el valor de esta variable. [7]

1.3.1 ESCALAS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Dentro del proceso de medición de variables, la estandarización de los valores obtenidos constituye un paso fundamental; en el caso de la temperatura existen varias escalas utilizadas, estas pueden ser absolutas que no dependen de las propiedades de las sustancias o relativas que si dependen de ellas. [7]

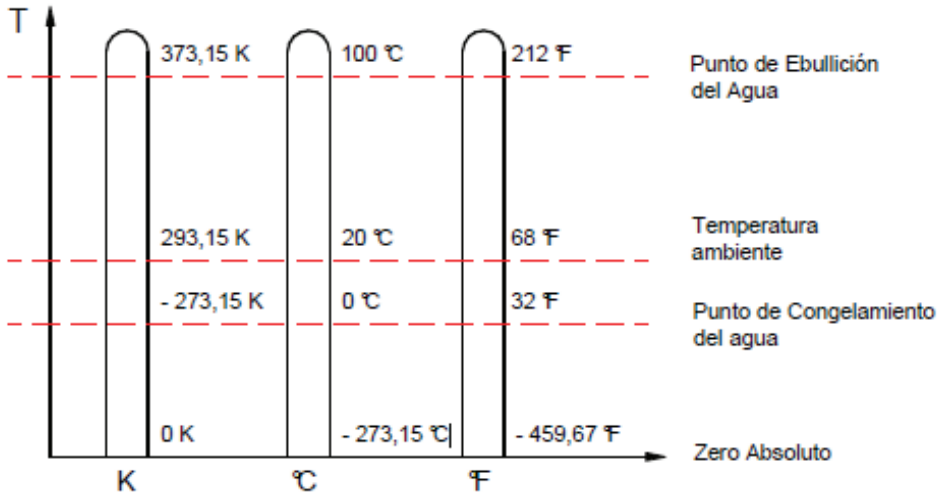


Figura 1.5. Escalas de medición de temperatura, tomado de [3]

Las escalas de temperatura de mayor utilización son: [3], [7]

- La Escala Celcius o Centígrada (ºC) es relativa ya que toma como referencia la numeración decimal del Sistema Internacional (SI) y los puntos de fusión o congelación (0ºC) y ebullición del agua (100ºC).
- La Escala Fahrenheit (ºF) normalmente usada en países anglosajones, es una escala relativa basada en el punto de congelación de una disolución de cloruro amónico (0ºF) y la temperatura corporal humana (100ºF).
- La Escala Kelvin (K) es una magnitud absoluta del SI que se fundamenta y toma como origen el cero absoluto, que es el punto donde no existe movimiento molecular y la materia deja de emitir energía; en esta escala la temperatura de congelamiento del agua es a 273,16K.

La escala Celsius es la más utilizada en nuestro medio, sin embargo pueden encontrarse con facilidad medidas representadas en otras unidades, siendo importante conocer las ecuaciones que permiten transformar de una escala a otra.

$$\frac{^{o}C}{5} = \frac{^{o}F - 32}{9} = \frac{K - 273{,}15}{5} \qquad (1.1)$$

Dónde: ^{o}C Grados Celcius

^{o}F Grados Fahrenheit

K Grados Kelvin

1.3.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Se indicó anteriormente la importancia de obtener una medida exacta de la temperatura para poder controlar adecuadamente la variación de esta magnitud, en la práctica existen numerosos tipos de sensores de temperatura cuya utilización dependerá del rango a medir, de las características del proceso e indudablemente del factor económico; dentro de las principales alternativas o métodos de medición de temperatura se tienen las siguientes alternativas:

1.3.2.1 Termómetro de Vidrio

El termómetro de vidrio consta de un tubo hueco lleno de un fluido muy sensible al cambio de temperatura, es decir funciona por acción de la dilatación volumétrica, (Ecuación 1.2) del líquido alojado en el interior del tubo, esta dilatación permite visualizar las variaciones del fluido en una sección cuyo reducido diámetro ocasiona que se evidencien pequeñas fluctuaciones. [8], [9]

$$V_T = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \tag{1.2}$$

Dónde: V_T Volumen del líquido a temperatura T

V_0 Volumen del líquido a temperatura de referencia T_0

β Coeficiente de dilatación volumétrica del líquido (1/ºC)

ΔT Variación de Temperatura "$\Delta T = T - T_0$" (ºC)

Los fluidos de mayor utilización en el termómetro de vidrio son: mercurio, tolueno, alcohol y acetona y su principal aplicación se da en laboratorios debido a que su

rango de medición es de -35 a 280ºC, siendo el termómetro de mercurio el de mayor rango de medición. [8], [9]

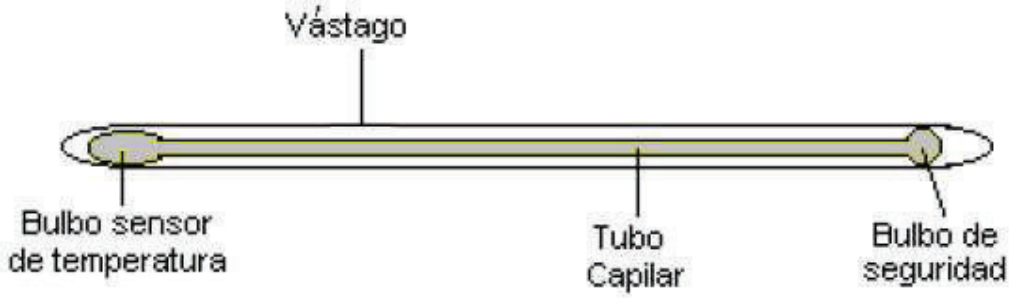


Figura 1.6. Termómetro de vidrio

Tomado de A. Bautista, "2.4 Medición de Temperatura", Venezuela, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana

1.3.2.2 Termómetro Bimetálico

El termómetro bimetálico funciona gracias al principio de dilatación térmica longitudinal (Ecuación 3), está compuesto por dos láminas metálicas que se unen en forma lineal o espiral formando un solo componente que se deforma en función de la variación de temperatura. Su rango de medición está entre -50 y 800ºC con exactitudes que pueden alcanzar el 1% dependiendo del material de construcción utilizado; los metales constructivos más comunes son: aluminio, bronce, cobre, latón, níquel, cromo, monel o aleaciones. [1], [8], [9]

$$L_T = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \tag{1.3}$$

Dónde:

L_T	Longitud del metal a temperatura T
L_0	Longitud del metal a temperatura de referencia T_0
α	Coeficiente de dilatación lineal del metal (1/ºC)
ΔT	Variación de Temperatura "$\Delta T = T - T_0$" (ºC)

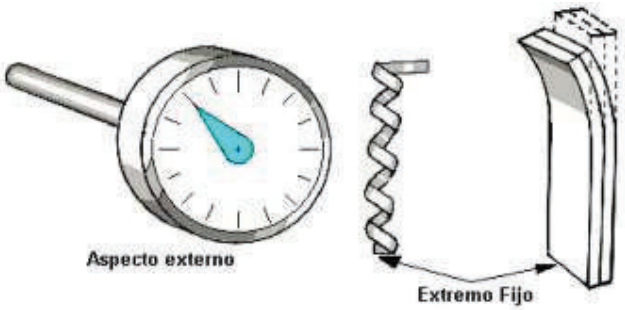


Figura 1.7. Termómetro bimetálico, tomado de [21]

1.3.2.3 Termoresistencia (RTD)

El Dispositivo Termo Resistivo (RTD) es un elemento caracterizado por su lineal y rápida respuesta que cambia el valor de la resistencia eléctrica en función de la variación de temperatura al que es sometido, esta característica depende del material de constitución del elemento y se conoce como "coeficiente de resistencia de temperatura (α)" siendo preferible utilizar elementos que tengan un alto valor en este parámetro como el platino. [1], [3], [8]

La relación entre la resistencia obtenida en función de los cambios de temperatura se define en base a la ecuación 1.4 característica de los termoresistores:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \tag{1.4}$$

Dónde:

R_T	Resistencia a la temperatura T (Ω)
R_0	Resistencia a la temperatura de referencia T_0 (Ω)
α	Coeficiente de temperatura del material a 0ºC
ΔT	Variación de Temperatura "$\Delta T = T - T_0$" (ºC)

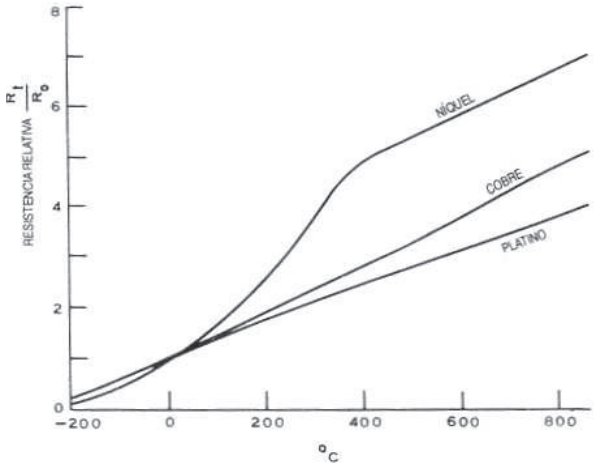


Figura 1.8. Linealidad de RTDS de diferentes materiales, tomado de [9]

El platino es el material de mejor calidad y mayor linealidad, permite obtener medidas estables y exactas de hasta 950ºC y tiene una resistencia de 100Ω a 0ºC (Pt100); su principal desventaja es el alto costo y el calentamiento generado, el mismo que deteriora la medida y se debe al circuito de acondicionamiento que se necesita para su utilización. [8], [9]

Figura 1.9. Termoresistencia RTD, tomado de [22]

Comercialmente existen termoresistores de 2, 3 o 4 terminales, el método de conexión empleado para cada uno de ellos se describe a continuación:

- La conexión de 2 hilos es la más sencilla pero la menos recomendada, la resistencia de los cables de conexión del RTD a su circuito de acondicionamiento se suma a la termoresistencia generando un error inevitable; la única alternativa de compensación se da usando cable más grueso, este hecho ocasiona el incremento del espacio y el costo asociado.
- La conexión de 3 hilos es la más común debido a que corrige el error generado por los cables, sin embargo es necesario que los tres cables tengan la misma resistencia para evitar errores en el acondicionamiento.

- La conexión de 4 hilos es la más precisa, su principal ventaja es que los cuatro cables pueden ser de distinta resistencia, en contrapunto su mayor inconveniente es que el termistor es mucho más costoso.

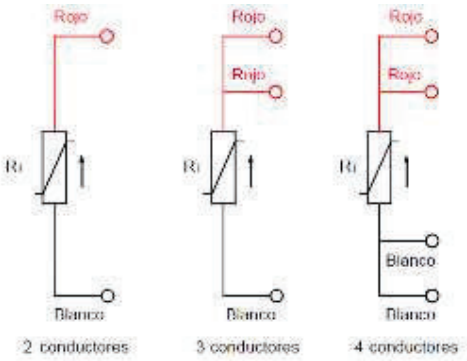


Figura 1.10. Tipos de termoresistencia RTD, tomado de [3]

1.3.2.4 Termistor

El termistor es un sensor de temperatura que se basa en la variación de la resistencia de un semiconductor en función del cambio de temperatura, es un elemento muy sensible que permite variaciones de hasta 1ºC; su coeficiente de temperatura normalmente es negativo en cuyo caso se llama NTC (Negative Temperature Coeficient), aunque puede ser también positivo tomando el nombre de PTC (Positive Temperature Coeficient). Los termistores son de pequeño tamaño, respuesta no lineal y su rango de medición está entre -50 y 150ºC; aunque algunos elementos encapsulados pueden medir hasta 300ºC. [8], [9]

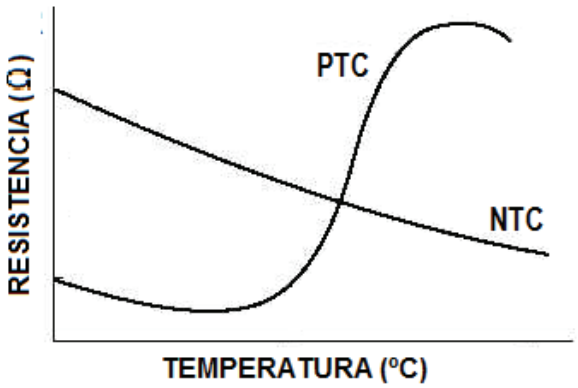


Figura 1.11. Termistores NTC y PTC, tomado de [23]

La relación entre la resistencia obtenida en función de los cambios de temperatura se define en base a la siguiente ecuación característica de los termistores:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T_T}-\frac{1}{T_0}\right)} \tag{1.5}$$

Dónde:

R_T	Resistencia a la temperatura T (Ω)
Ro	Resistencia a la Temperatura de referencia T_0 (Ω)
e	Constante de Euler (2,7183…)
B	Constante característica del material (ºC)
T_T	Temperatura absoluta (ºC)
T_0	Temperatura de referencia (ºC)

1.3.2.5 Termocupla o termopar

Una termocupla o termopar es un componente que transforma el calor en energía eléctrica, su construcción es robusta y presenta un amplio rango de opciones de medición, hecho que lo convierte en un elemento muy utilizado a nivel industrial.

El funcionamiento de un termopar se basa en dos principios: el efecto Peltier que provoca un flujo térmico, es decir absorción o liberación de calor debido a la circulación de corriente en la unión de dos metales diferentes; y el efecto Thompson que ocasiona el flujo térmico por acción de la circulación de corriente a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura. El aprovechamiento de los efectos antes mencionados permite convertir la unión de un par de metales de diferentes características en un elemento para medir temperatura, el mismo que permite obtener un voltaje en el orden de milivoltios al someter la unión a una variación de temperatura. [1], [3], [8], [9]

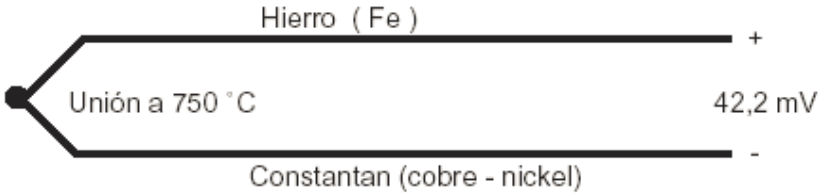


Figura 1.12. Termopar, tomado de [22]

Cada uno de los metales que conforman el termopar se conocen como termoelemento y su unión se denomina juntura, en función de los materiales empleados en la construcción de estos sensores se puede tener una infinidad de termopares de distinto tipo; sin embargo existen varias termocuplas de uso comercial, las mismas que se identifican por letras, poseen colores característicos y se resumen en la tabla 1.1. [3], [8], [9]

Tabla 1.1. Características de las termocuplas o termopares, tomado de [24]

Tipo	Aleación		Rango de utilización	f.e.m. producida (mV)
	Conductor +	Conductor -		
J	Hierro (Fe) (magnesio)	Constantan (Cu - Ni)	-210 a 760º C	-8,096 a 42,919
K	Níquel-Cromo (Ni - Cr)	Níquel-Alumínio (Ni - Al) (magnético)	-270 a 1200º C	-6,458 a 48,838
T	Cobre (Cu)	Constantán Cobre-níquel (Cu - Ni)	-270 a 400º C	-6,258 a 20,872
E	Níquel-Cromo (Ni - Cr)	Constantán Cobre-níquel (Cu - Ni)	-270 a 1000º C	-9,835 a 76,373
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)	-270º a 1300º C	-4,345 a 47,513 mV
R	Cobre (Cu)	Aleación 11 (Cu - Ni)	-50º a 1768º C	-0,226 a 21,101

Para propósitos industriales los termopares se protegen con tubos o vainas que pueden ser de hierro, acero, cerámica u otro material con propiedades

anticorrosivas y antioxidantes; adicionalmente para evitar errores o variaciones en la medición de temperatura es necesario evitar el uso de conductores para llegar al circuito de control ya que estos crean junturas adicionales que alteran el valor de la medición, de no ser posible esta condición existe la alternativa de usar cables de compensación que están hechos de materiales especiales a fin de evitar los efectos de las junturas adicionales que se crean. [8]

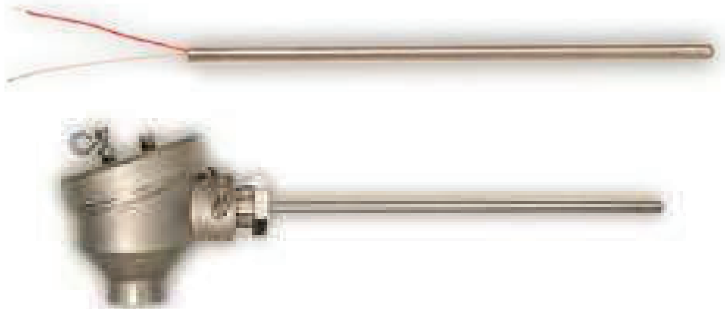


Figura 1.13. Termopar con vaina de protección, tomado de [22]

1.3.2.6 Circuitos Integrados

La temperatura también puede medirse con circuitos integrados que se caracterizan por tener una excelente linealidad y un alto nivel de rendimiento a pesar de su bajo costo, su mayor limitación es la escasa gama de temperaturas de operación que está entre -20 a 120ºC con un error menor al 0,05%; para su trabajo necesitan una fuente de alimentación (4 a 30 VDC) ya que se trata de elementos activos. [3]

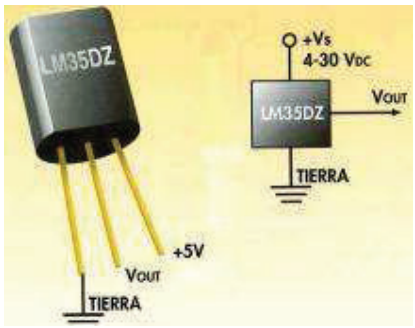


Figura 1.14. Circuito integrado para medir temperatura, tomado de [25]

1.3.2.7 Pirómetro de Radiación

El pirómetro de radiación es un método de medición sin contacto, que se basa en el principio que señala que la radiación emitida por un cuerpo depende de su temperatura. El pirómetro mide la radiación del cuerpo para encontrar de forma indirecta la temperatura; su utilización toma importancia en ambientes agresivos o cuando el acceso a la zona de medición es limitado, los pirómetros pueden ser ópticos, de radiación, de resistencia y termoeléctricos. [1], [3], [8], [9]

Figura 1.15. Pirómetro infrarrojo, tomado de [26]

Una vez que se han revisado los principales métodos para medir la temperatura, es conveniente estudiar las alternativas más importantes para controlar esta variable que constituye el aspecto de mayor importancia en los procesos de tratamiento térmico antes estudiados; en tal sentido a continuación se analizan los principales métodos u opciones para el control de temperatura.

1.4 SISTEMAS DE CONTROL

Los procesos normalmente están sujetos a la influencia de agentes externos que ocasionan cambios en su comportamiento, este hecho obliga a la necesidad de controlar a las variables de mayor importancia dentro de cada proceso [10]; en el tratamiento térmico la temperatura es la variable de mayor interés.

Los sistemas de control tienen el propósito de modificar la magnitud de las variables de mayor importancia en base a los requerimientos del sistema logrando así que el proceso funcione de acuerdo a las especificaciones dadas, evitando cambios bruscos o comportamientos inesperados, convirtiéndose así en un sistema estable y robusto que no se inmuta con las perturbaciones.

Un sistema de control esencialmente está compuesto por tres componentes: [10]

- **Las entradas** que son los elementos que brindan la información de la actuación del sistema y sus variaciones.
- **Los elementos de control** que usan la información de las entradas para modificar el proceso de modo que cumpla con las especificaciones dadas.
- **Las salidas** que ejecutan la acción que definen los elementos de control.

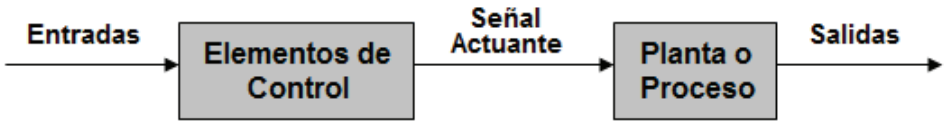


Figura 1.16. Sistema de Control, tomado de [10]

Dentro de los procesos industriales se pueden distinguir dos tipos de sistemas de control: control manual y control automático.

1.4.1 SISTEMAS DE CONTROL MANUAL

El Sistema de Control Manual se caracteriza por la necesidad de la intervención humana, debido a que es un operador quien monitorea y detecta una condición irregular dentro del proceso para posteriormente efectuar las acciones necesarias para corregirla. Es claro que en este tipo de proceso la falta de experiencia del interventor puede generar una tardía detección de las perturbaciones ocasionando un mayor impacto en el sistema, adicional a esta característica se debe señalar que sus conocimientos y experiencia son determinantes el momento

de tomar las acciones necesarias para corregir los problemas suscitados de una manera rápida y eficiente. [10]

1.4.2 SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

El Sistema de Control Automático es un conjunto de componentes que corrigen la presencia de perturbaciones de forma independiente, es decir, no requieren la intervención humana para decidir las acciones de control necesarias para solucionar los problemas existentes. [3], [10]

La presencia de un controlador autónomo permite monitorear una mayor cantidad de variables de una manera más rápida, a la vez mejorar la calidad y eficiencia del proceso, minimiza los errores y reduce los costos operativos. [10]

Los sistemas de control automático pueden ser de lazo abierto o lazo cerrado.

1.4.2.1 Sistemas de Control Automático de Lazo Abierto

Los Sistemas de Control de Lazo Abierto no dependen de la salida, son sistemas en los que no se verifica el estado de la salida para generar acciones de control; hecho que los convierte en una alternativa para sistemas de bajo riesgo. [10]

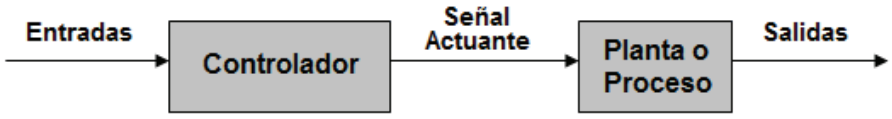


Figura 1.17. Sistema de Control Automático de Lazo Abierto, tomado de [10]

Los Sistemas de Lazo Abierto pueden ser inestables e imprecisos debido a que son sensibles a la existencia de perturbaciones, sin embargo su aplicación es común en algunos procesos no críticos debido a que constituyen una alternativa de fácil implementación y reducidos costos de inversión. [10]

1.4.2.2 Sistemas de Control Automático de Lazo Cerrado

Los Sistemas de Control de Lazo Cerrado depende de la señal de salida para efectuar un mejor control, es decir que la acción de control revisa el valor de salida para ajustar su operación; son sistemas realimentados que reintroducen la señal de salida como una entrada adicional llamada feedback. [3], [10]

La principal ventaja de los sistemas de lazo cerrado es su precisa respuesta ante la presencia de perturbaciones ocasionando para ello una mayor dificultad de diseño, una mayor utilización de componentes que en consecuencia incrementan su costo; razón que obliga a que su utilización se concentre en sistemas caracterizados por un alto nivel de criticidad. [3]

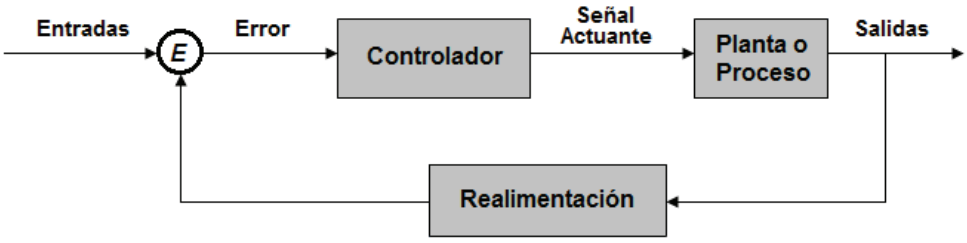


Figura 1.18. Sistema de Control Automático de Lazo Cerrado, tomado de [10]

El tratamiento térmico tiene como variable relevante a la temperatura, en tal sentido es fundamental ejercer un eficiente control de esta variable; una de las mejores y más utilizadas alternativas para el control de procesos industriales es el PLC debido a que constituye un equipo robusto y de alta eficiencia.

En el presente capítulo se han analizado varios conceptos que constituyen la Fundamentación Teórica para el desarrollo del Sistema de Automatización de Hornos para Tratamiento Térmico, este hecho permite que en el siguiente capítulo el estudio se centre en el diseño e implementación del Hardware del Sistema puntualizando los componentes utilizados en su desarrollo.

CAPÍTULO 2
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

El Sistema para Automatización de Hornos para Tratamiento Térmico del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional es un prototipo didáctico enfocado al aprendizaje de los estudiantes; su finalidad es controlar los diferentes gradientes de temperatura y los tiempos de mantenimiento durante el calentamiento de muestras metálicas, a fin de poder obtener resultados más confiables durante las prácticas de laboratorio en las que se utiliza; logrando de esta manera optimizar el tiempo y los procesos en el aprendizaje de las principales técnicas de tratamiento térmico.

El sistema consta de un par de hornos eléctricos tipo mufla, dentro de los cuales se instalan los sensores de temperatura cuya señal se conecta directamente al PLC a través de su módulo para entradas análogas tipo termocupla; el PLC internamente verifica los valores programados del tipo de calentamiento empleado, el tiempo de permanencia y la temperatura máxima a alcanzar y visualiza permanentemente el estado del equipo a través del HMI local; adicionalmente el sistema consta de un par de interruptores magnéticos instalados en las puertas, los mismos que alertan su apertura.

Los elementos de control y señalización se encuentran dentro del tablero de control, el mismo que tiene un switch de encendido y un HMI local de interfaz táctil que permite ingresar y revisar los datos del proceso. El sistema se conecta al PC en donde se desarrolló una HMI remoto mediante comunicación Ethernet.

2.1 CONDICIONES DE TRABAJO DEL SISTEMA

La utilización de los hornos se orienta al desarrollo de las prácticas del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla que contemplan las Materias de Ciencias de Materiales I y II, las mismas que son necesarias para que los

estudiantes aprendan los distintos tratamientos térmicos que se emplean en la industria; en tal sentido dentro de su utilización se requiere el desarrollo de las siguientes prácticas:

Ciencias de Materiales I:

- Deformación, Endurecimiento y Recristalización del Aluminio donde se debe calentar la muestra hasta alcanzar los 650ºC y mantenerla a esta temperatura por 20 minutos.
- Construcción del Diagrama de Equilibrio por el Método Térmico empleando Aleaciones de Estaño-Plomo, para lo cual es necesario conseguir que la muestra esté a 450ºC durante 15 minutos.
- Endurecimiento por Precipitación para Aleaciones de Aluminio que consta de una etapa de Disolución que se lleva acabo a una temperatura de 500ºC con 1 hora de permanencia para una posterior precipitación en la que se alcanza una temperatura de 950ºC.

Ciencias de Materiales II:

- Templabilidad de Aceros lograda al exponer la muestra a una temperatura máxima de 950ºC con un tiempo de permanencia de 25 minutos.
- Recristalización o Recocido de Aceros en el que se calienta la muestra hasta alcanzar los 850ºC dejándola a esa temperatura por 30 minutos.
- El Temple del Vidrio cuya temperatura máxima depende del tipo y grosor del material empleado en el tratamiento y oscila entre 450 y 600ºC con un tiempo de permanencia entre 15 y 20 minutos.

Para lograr que el sistema funcione adecuadamente para el desarrollo de las Prácticas de Laboratorio; se debe tener en cuenta que los hornos van a trabajar a una temperatura entre 450 y 950ºC con un tiempo de permanencia entre 15 y 60 minutos; en tal sentido es necesario que el usuario pueda programar tanto la temperatura máxima de calentamiento como el tiempo de permanencia para la utilización de los hornos. La velocidad de calentamiento no es un dato que afecte de forma determinante el desarrollo de los tratamientos térmicos, pero su valor promedio es de aproximadamente 20ºC/min, su valor estaría condicionado por la

capacidad de calentamiento de los hornos y sería otro dato que debe ser programado por el usuario.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS

Los dos hornos eléctricos o muflas son de iguales características y utilizan para su funcionamiento resistencias eléctricas o niquelinas alcanzando temperaturas superiores a los 1000ºC, están constituidos por una carcasa metálica que internamente tiene una cobertura de fibra de cerámica, material de color blanco e inodoro de apariencia similar a la lana que permite aislar el calor interior para disminuir las pérdidas de energía calórica y lograr que la temperatura de la puerta no supere los 50ºC y sea de fácil manipulación.

Figura 2.1. Hornos Lindberg del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla

La Tabla 2.1 detalla las principales características de los hornos eléctricos utilizados para el Tratamiento Térmico en el Laboratorio de Metalografía:

Tabla 2.1. Características de los hornos

Parámetro	Descripción
Marca	Lindberg
Modelo	51828
Año de Fabricación	1981
Temperatura de Operación	110 ºC
Voltaje de Alimentación	220 a 240 VAC
Potencia Máxima	5600 W
Frecuencia	50 / 60 Hz

Los hornos están diseñados para trabajar con muestras pequeñas, en tal sentido sus dimensiones se orientan a este propósito; hecho que se evidencia en las tablas 2.2 y 2.3 que resumen las dimensione externas e internas de los hornos:

Tabla 2.2. Dimensiones externas de los hornos

Parámetro	Dimensión
Altura	72,5 cm
Ancho Superior	56,0 cm
Ancho Inferior	63,0 cm
Profundidad	70,0 cm

Tabla 2.3. Dimensiones internas de los hornos

Parámetro	Dimensión
Altura	31,5 cm
Ancho	31,5 cm
Profundidad	45,0 cm
Volumen	44651,2 cm^3

El fabricante define las características de los componentes principales del horno, su estructura interna, el material refractario, las niquelinas, la termocupla y su ubicación; en tal sentido es conveniente revisarlas a fin de analizar la operación del horno antes de la automatización.

Figura 2.2. Estructura interna del Horno Lindberg

2.2.1 NIQUELINAS

Existen 3 niquelinas espirales que se ubican en las paredes de la cámara de calentamiento al interior del horno y están recubiertas por el material refractario.

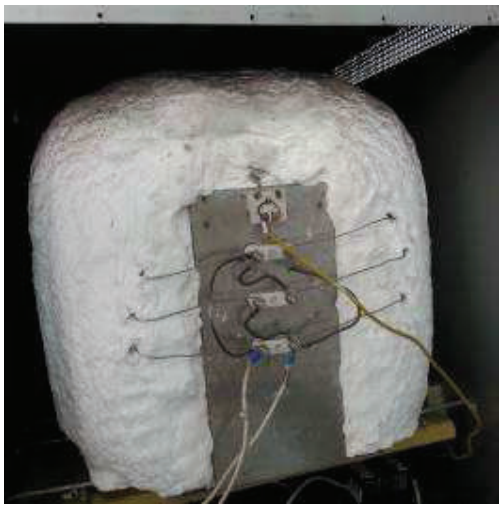


Figura 2.3. Niquelinas del Horno Lindberg

Las niquelinas tienen una resistencia aproximada de 31,3Ω cada una; su conexión eléctrica permitirá regular la capacidad de calentamiento en función de la corriente

circulante, siendo la mejor alternativa la conexión en paralelo que genera un incremento de corriente y por ende una mayor capacidad de calentamiento al reducir la resistencia total como se expresa en la Ecuación 2.1.

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_N}} \tag{2.1}$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{30,9} + \frac{1}{30,9} + \frac{1}{30,9}} = 10,3\Omega$$

Dónde: R_T Resistencia total de las niquelinas en paralelo (Ω)

R_N Resistencia de cada niquelina (Ω)

El horno funciona con un voltaje bifásico de 220V, en tal sentido es posible calcular la corriente máxima circulante en base a la Ecuación 2.2:

$$I_T = \frac{V_L}{R_T} \tag{2.2}$$

$$I_T = \frac{220}{10,3} = 21,36A$$

Dónde: I_T Corriente máxima circulante (A)

V_L Voltaje bifásico (V)

R_T Resistencia total de las niquelinas en paralelo (Ω)

2.2.2 SISTEMA DE CONTROL PREVIO

El sistema de control encontrado fue desarrollado como Proyecto de Titulación en el año 2011 [3]; tiene como elemento central un microprocesador, los datos se

ingresan a través de un teclado matricial y el estado de las variables se visualizan en un LCD; todos los elementos se encuentran ubicados debajo de la cámara de calentamiento del horno, como parte de la estructura de su base. Este hecho provoca que a pesar de tener un medio de aislamiento para proteger el sistema de control, a altas temperaturas de funcionamiento el sistema colapse, deje de controlar la temperatura y la pantalla del LCD quede completamente negra; haciendo de este un sistema ineficiente e inadecuado que funciona de manera aceptable solamente dentro de rangos bajos de temperatura. En tal sentido para lograr un eficiente y robusto funcionamiento de los hornos, se anula por completo el sistema existente y se reemplaza por un sistema basado en el uso de un PLC y un HMI local ubicados dentro de un tablero de control.

2.3 SISTEMA DE APERTURA Y DETECCIÓN

La puerta tiene un sistema de apertura hacia abajo con bisagras en la parte inferior, el desgaste de los hornos ocasiona que el cierre no sea hermético y el calor se disipe; siendo evidente que las altas temperaturas características de estos procesos generan un alto riesgo para el usuario del sistema; hecho que obliga a mitigar la inseguridad existente al abrir la puerta, siendo necesario detectar este hecho para alarmar el sistema; en tal sentido se utilizan los interruptores magnéticos para alertar al usuario la apertura de las puertas de los hornos. Estos dispositivos basan su operación en la distancia que existe entre dos componentes magnéticos que lo constituyen; es decir que el interruptor cambia de posición cuando la distancia entre sus componentes sobrepasa su especificación.

2.4 SENSADO DE TEMPERATURA

La temperatura de operación del horno oscila entre 450 y 1000ºC, aunque de ser necesario puede alcanzar hasta 1200ºC, en tal sentido es necesaria la utilización de un sensor que permita monitorear permanentemente esta variable a fin de obtener las condiciones adecuadas para el proceso. Para la medición de temperatura es conveniente utilizar elementos de características lineales, las

alternativas más adecuadas son: termorresistencias (RTD) cuya resistencia de salida depende de la variación de temperatura o termocuplas cuyo voltaje de salida es proporcional al cambio de temperatura.

Las termocuplas tienen como ventaja fundamental su robustez, linealidad, amplio rango de operación y una salida en milivoltios proporcional a la temperatura; por esta razón se selecciona como mejor alternativa para medir la temperatura al interior de la cámara de calentamiento de los hornos a la termocupla tipo K que puede sensar entre -270 y 1200ºC como se referencia en la tabla 1.1.

La termocupla tipo K es una de las más utilizadas a nivel industrial, se usa típicamente en hornos de fundición y tratamientos térmicos, está formada por una aleación de Chromel (Ni 64%, Fe 25% y Cr 11%) en la punta positiva y Alumel (Ni 94%, Mn 3%, Al 2% y Si 1%) en la punta negativa. Su utilización puede darse en atmósferas inertes y oxidantes debido a su alta resistencia a estos entornos; presenta una salida de alrededor de 1mV a temperatura ambiente y hasta 48,838mV a 1200ºC. [3], [8]

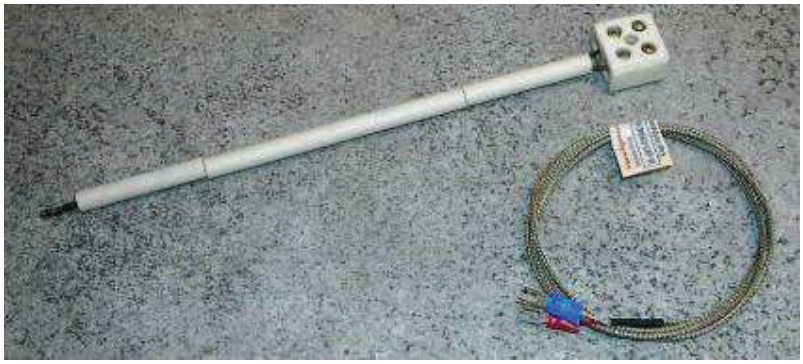


Figura 2.4. Termocupla tipo K, tomado de [27]

2.5 PLC S7-1200 SIMATIC

Los sensores de temperatura constituyen la principal entrada que se utiliza para controlar el funcionamiento de los hornos, en tal sentido es importante utilizar adecuados elementos que permiten interpretar correctamente estas señales y

realizar las acciones requeridas para el correcto funcionamiento de los hornos; sin que las altas temperaturas de operación afecte su correcto desenvolvimiento.

El elemento central para ejercer el control del proceso es el SIMATIC S7-1200 de SIEMENS, el mismo que es un PLC modular compacto de excelentes prestaciones y potentes funciones que lo convierten en una muy útil alternativa para la automatización de procesos que se pueden implementar con ayuda de su software de programación TIA Portal. [12]

Figura 2.5. SIMATIC S7-1200, tomado de [12]

El PLC S7-1200 está conformado por un microprocesador, una fuente de alimentación, circuitos de entradas y salidas analógicas y digitales, uno o varios puertos Ethernet; sus principales componentes se muestran en la figura 2.6

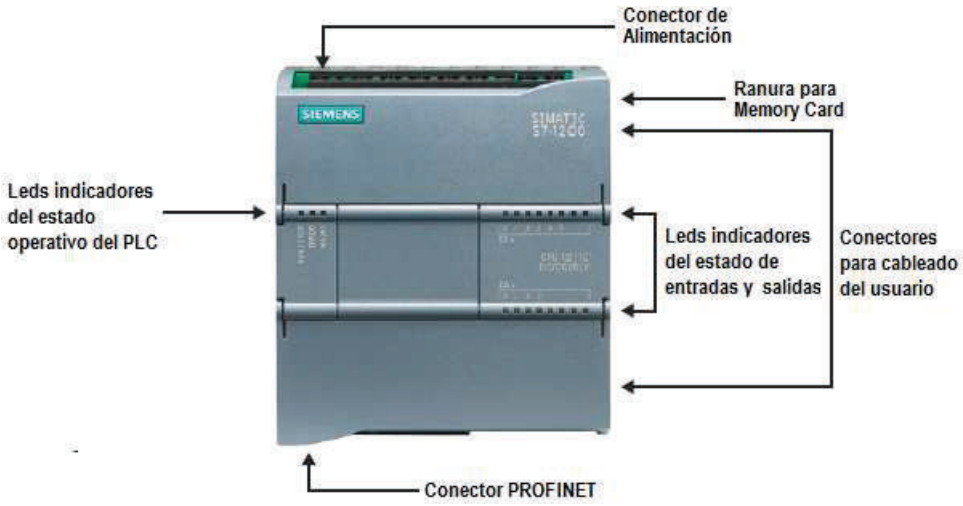


Figura 2.6. Componentes principales del SIMATIC S7-1200, tomado de [12]

El PLC SIMATIC S7-1200 está disponible en cuatro versiones de CPU que trabajan con una alimentación de voltaje entre 85 y 264VAC a una frecuencia de operación entre 47 y 63Hz, estas opciones de CPU se diferencian por su capacidad de memoria y principalmente por la cantidad de entradas y salidas disponibles como se referencia en la tabla 2.4

Tabla 2.4. Características de los distintos CPU del S7-1200, tomado de [12]

Parámetro	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1215C
Dimensiones	90mm 100mm 75mm	90mm 100mm 75mm	110mm 100mm 75mm	130mm 100mm 75mm
E/S digitales integradas	6 entradas 4 salidas	8 entradas 6 salidas	14 entradas 10 salidas	14 entradas 10 salidas
E/S analógicas integradas	2 entradas	2 entradas	2 entradas	2 entradas 2 salidas
Memoria de trabajo	30 kB	50 kB	75 kB	100 kB
Memoria de carga	1 MB	1 MB	4 MB	4 MB
Capacidad de ampliación	1 SB/CB/BB 3 CM	1 SB/CB/BB 3 CM 2 SM	1 SB/CB/BB 3 CM 8 SM	1 SB/CB/BB 3 CM 8 SM
Puerto de Comunicación	1 Ethernet	1 Ethernet	1 Ethernet	2 Ethernet

La selección de la mejor alternativa del CPU utilizados se da en base a los requerimientos de las entradas y salidas necesarias para la implementación del sistema, en tal sentido se realiza el análisis de entradas y salidas.

2.5.1 ANÁLISIS DE ENTRADAS Y SALIDAS REQUERIDAS

El sistema para el ingreso de información utiliza un HMI basado en una pantalla táctil que se comunica a través de un puerto Ethernet, por tal razón se minimiza el uso de entradas digitales restando la importancia de este parámetro al seleccionar el CPU; contrario a ello la cantidad de salidas empleadas permiten definir el CPU seleccionado; análisis que se expresa en los siguientes requerimientos:

Entradas:

- DI.0: Interruptor magnético de la puerta del horno 1 (E0).
- DI.1: Interruptor magnético de la puerta del horno 2 (E1).

Salidas:

- DQ.0: Contactor de encendido del horno 1 (S0).
- DQ.1: Contactor de encendido del horno 2 (S1).
- DQ.2: Luz indicadora de encendido del horno 1 (S2)
- DQ.3: Luz indicadora de encendido del horno 2 (S3)
- DQ.4: Luz indicadora de apertura de la puerta de los hornos (S4)

En base a los datos expuestos se aprecia la necesidad de 2 entradas y 5 salidas digitales, un puerto Ethernet y la capacidad de trabajar con un módulo SM para entradas analógicas tipo termopar; en tal sentido la mejor alternativa a emplear es el CPU 1212C que satisface plenamente esta demanda.

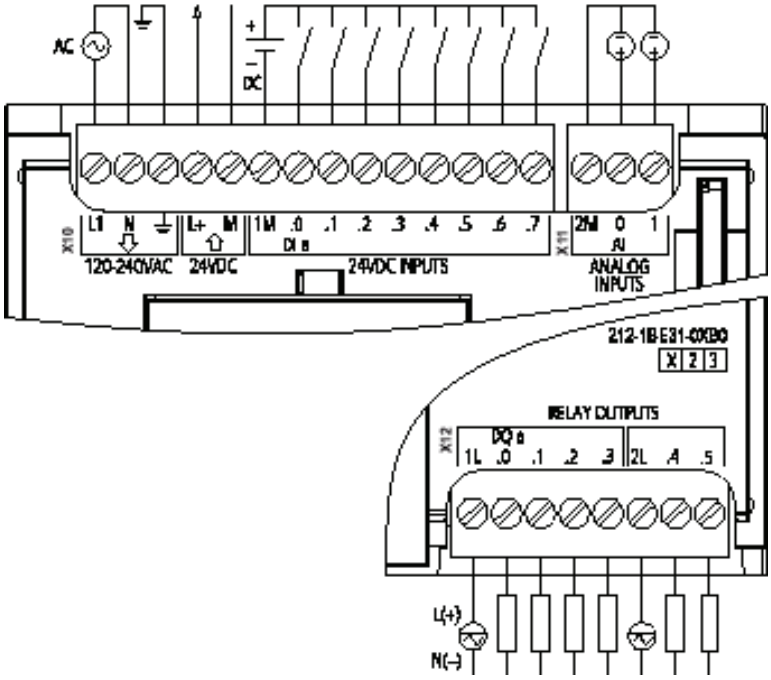


Figura 2.7. Diagrama de entradas y salidas del SIMATIC S7-1200 (CPU 1212C)

Tomado de SIEMENS, *CPU 1212C Wiring diagrams (6ES7 212-1BE31-0XB0)* [en línea] <http://www.automation.siemens.com/mdm/default.aspx?DocVersionId=41524141835&Language=en-US&TopicId=40815596171> [último acceso Septiembre 2014].

El S7-1200 ofrece diversos módulos y placas de conexión que constituyen accesorios que permiten ampliar la capacidad de la CPU con E/S adicionales y protocolos de comunicación para redes PROFIBUS, GPRS, RS485 o RS232. [12]

La distribución física y conexión de los principales módulos de expansión se muestra en la figura 2.8.

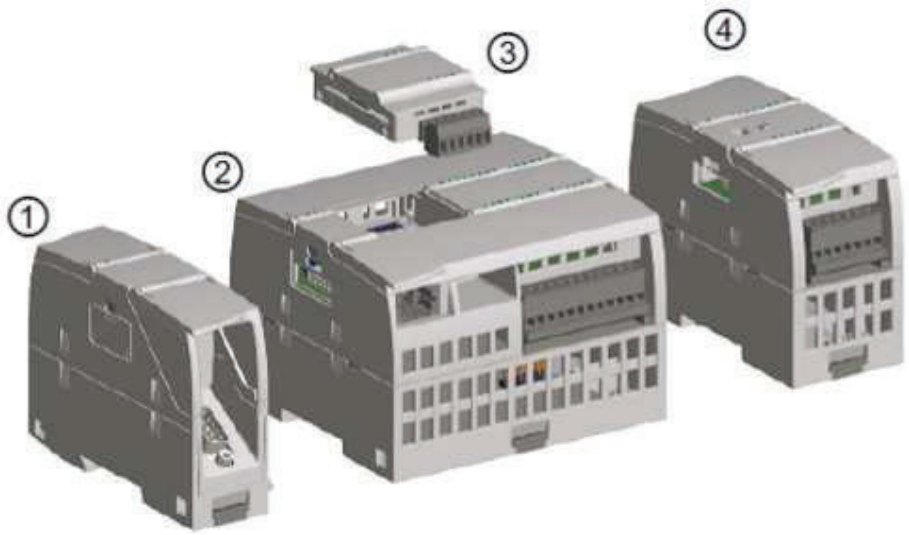


Figura 2.8. Módulos de Expansión del SIMATIC S7-1200, tomado de [12]

1) Módulo de Comunicación (CM) o procesador de comunicación (CP)
2) CPU
3) Signal Board (SB), Communication Board (CB) o Battery Board (BB)
4) Módulo de Señales (SM)

La capacidad de ampliación del CPU 1212C es de 1 Signal Board (SB), 1 Communication Board (CB) o 1 Battery Board (BB); 2 Módulos de Señales (SM) y 3 Módulos de Comunicaciones (CM). Para una mejor interpretación de la medición de la temperatura obtenida a través de las termocuplas, en el prototipo se utiliza un módulo SM 1231 AI 4 TC.

2.5.2 MÓDULO SM 1231 AI 4 TC (ENTRADAS TIPO TERMOPAR)

Las termocuplas usadas para sensar la temperatura de trabajo del horno se conectan directamente al Módulo de Señal SM 1231 AI 4 TC, el mismo que posee una capacidad de 4 entradas analógicas tipo Termopar, 2 en la parte superior y 2 en la parte inferior del módulo; las entradas son de 16 bits y reciben un voltaje o corriente diferencial. El módulo SM1231 AI 4 TC se coloca a la derecha del PLC y ocupa un espacio reducido, sus dimensiones son: 45mm x 100mm x 75mm. [12]

Es importante señalar que el SM es alimentado con 24VDC y que cada horno utiliza una termocupla para sensar la temperatura de su interior, en tal sentido se utilizan las entradas analógicas de la parte superior del módulo.

- AI.0: Termocupla del horno 1 (T0).
- AI.1: Termocupla del horno 2 (T1).

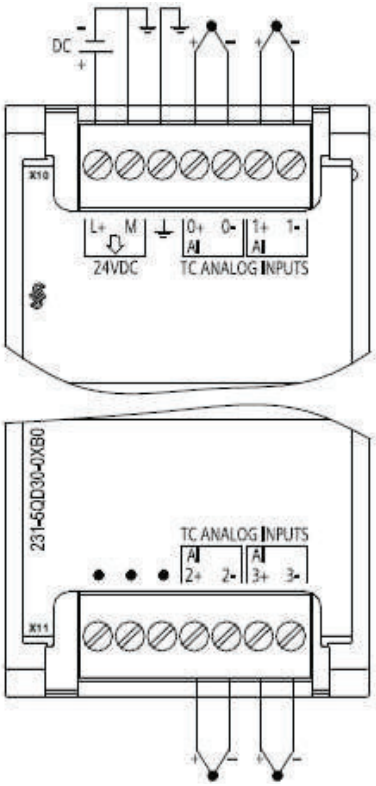


Figura 2.9. Diagrama del Módulo de Expansión SM 1231 AI 4 TC, tomado de [12]

2.6 PANTALLA TÁCTIL DELTA (HMI LOCAL)

Con el propósito de crear un sistema didáctico, que permita configurar el trabajo de los hornos de forma sencilla a la vez que mejore la visualización del estado del proceso y sus variables; se utiliza una HMI (pantalla táctil) marca DELTA modelo DOP-B03E211 compatible con el PLC S7-1200 de SIEMENS, la misma que utiliza el software DOPSoft para su programación. [13]

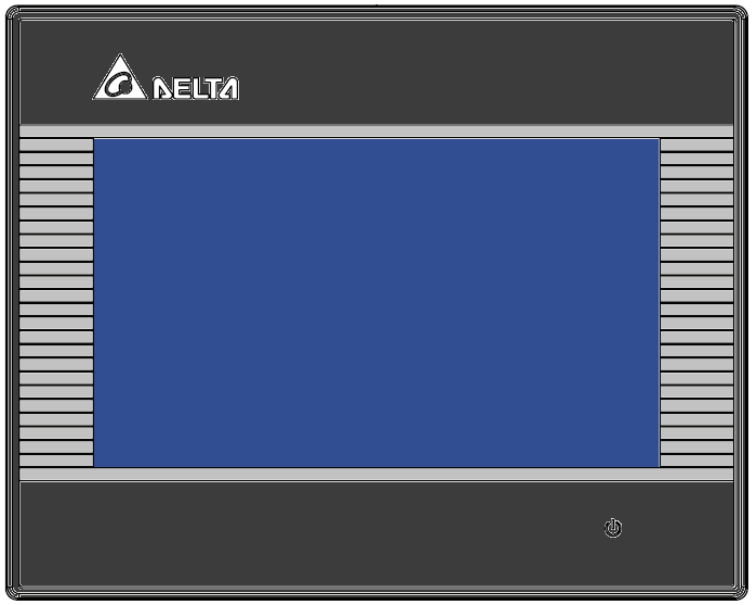


Figura 2.10. Pantalla táctil HMI DOP-B03E211, tomado de [13]

Las principales características del HMI DOP-B03E211 se expresan en la tabla 2.5:

Tabla 2.5. Características del HMI DOP-B03E211, tomado de [13]

Parámetro	Descripción
Dimensiones	129mm x 103mm x 39mm
Pantalla	4,3” (65536 colores)
Resolución de pantalla	480 x 272 píxeles
Voltaje de alimentación	24 VDC
Memorias	Flash ROM (128 MB), SDRAM (64MB), Respaldo (32kB)
Puertos de comunicación	Serial (RS 232 / 485), USB Maestro, USB Esclavo, Ethernet

Las figuras 2.11 y 2.12 describen los componentes más importantes del HMI; los mismos que se muestran en sus vistas frontal y posterior.

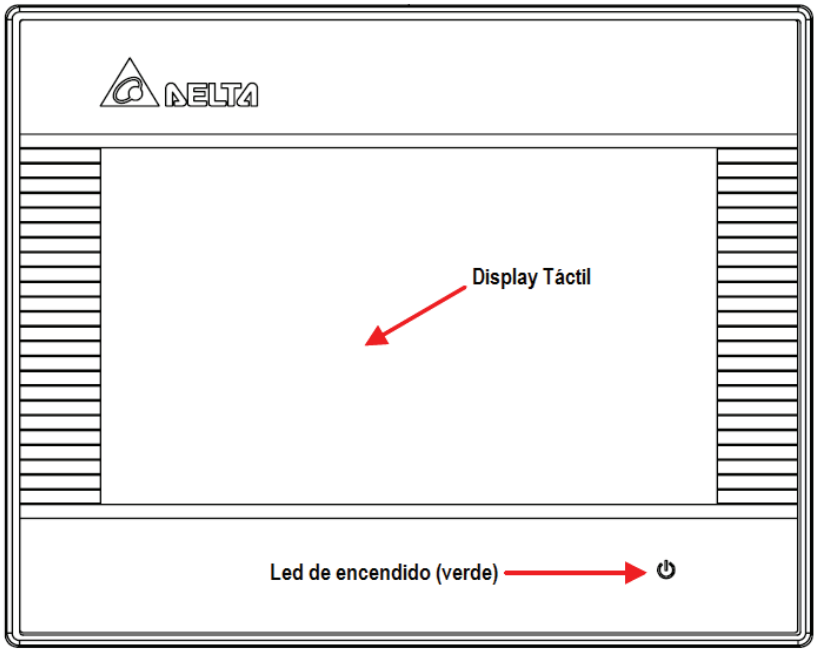


Figura 2.11. Componentes del HMI DOP-B03E211 (Vista frontal), tomado de [13]

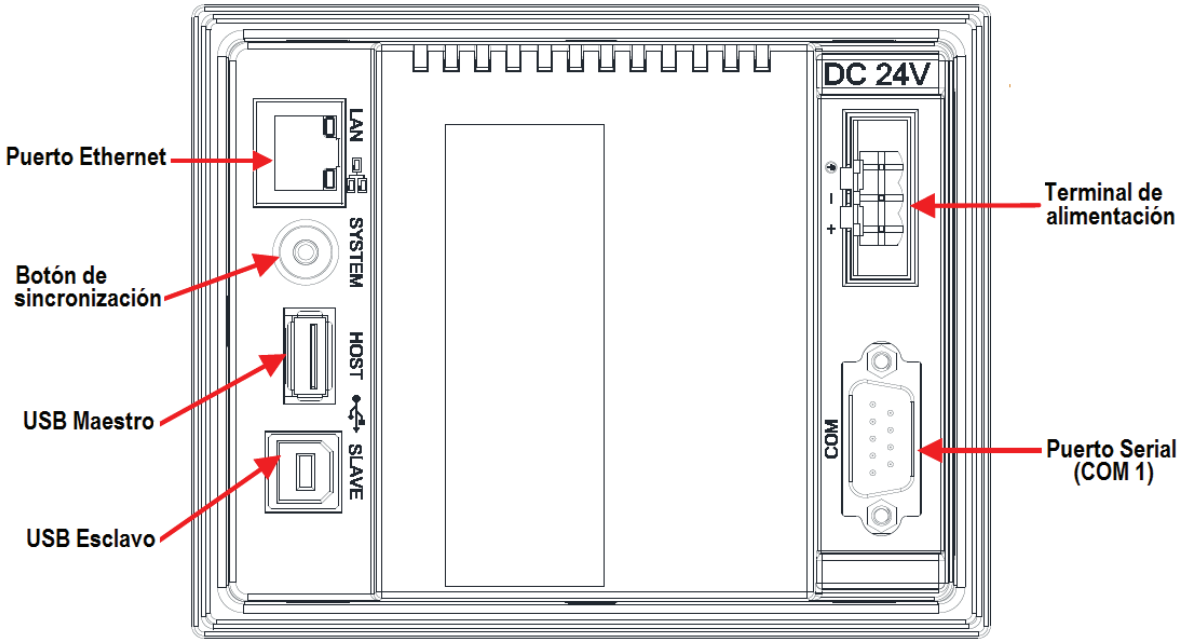


Figura 2.12. Componentes del HMI DOP-B03E211 (Vista posterior), tomado de [13]

2.7 SWITCH ETHERNET D-LINK

El PLC y la pantalla táctil deben comunicarse entre sí para permitir el correcto funcionamiento del equipo, adicionalmente el sistema requiere la conexión con el PC que contiene la HMI remota para obtener otra alternativa de control; el medio de comunicación común para todos los componentes es Ethernet, sin embargo para poder lograr el enlace de estos tres componentes es necesario utilizar un switch Ethernet. La alternativa que se selecciona para este propósito es el Switch compacto modelo DES-1008A de la marca D-Link, el mismo que contiene ocho puertos de comunicación que no requieren configuración, tienen velocidad variable y conexión Plug&Play. [14]

Figura 2.13. Switch Ethernet DES-1008ª, tomado de [14]

2.8 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DELTA

El HMI táctil y el módulo de expansión del PLC necesitan para su funcionamiento una alimentación de 24VDC; en tal sentido se utiliza una fuente conmutada marca DELTA serie CliQ modelo DRP024V060W1AZ, la misma que está orientada para entornos de trabajo agresivos en un diseño compacto para uso en Rieles DIN, incluye además protecciones de sobrevoltaje, sobrecarga y temperatura; sus principales características se muestran en la tabla 2.6. [15]

Tabla 2.6. Características de la fuente de voltaje DRP024V060W1AZ, tomado de [15]

Parámetro	Descripción
Dimensiones	120.6mm x 32mm x 113mm
Voltaje de alimentación	85 a 264 VAC
Frecuencia	47 a 63 Hz
Corriente de alimentación	1.5 A
Voltaje de salida regulable	22 a 28 VDC
Corriente de salida	2.5 A
Potencia de salida	60W
Montaje	Riel DIN

Figura 2.14. Fuente de voltaje DRP024V060W1AZ, tomado de [15]

Los principales componentes de la fuente de alimentación DRP024V060W1AZ se muestran en la figura 2.15.

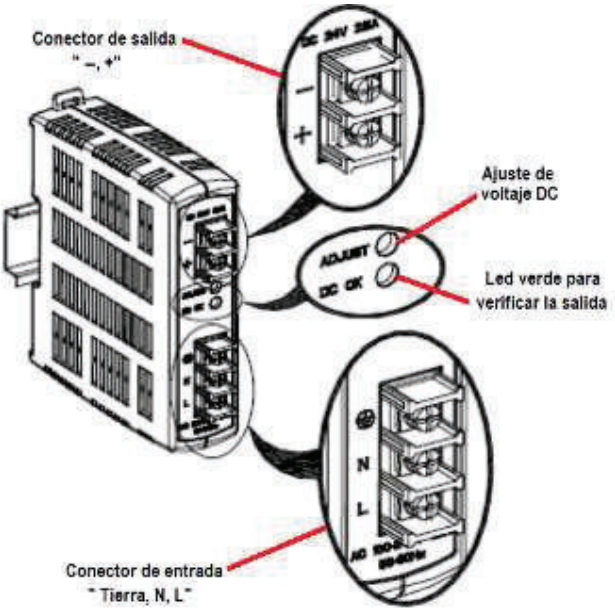


Figura 2.15. Componentes de la fuente de voltaje DRP024V060W1AZ, tomado de [15]

2.9 SELECTOR

Un selector (ver figura 2.16.a.), es un dispositivo que permite escoger entre diferentes alternativas de operación de un sistema, su uso más común en el caso de un elemento de dos posiciones es permitir el encendido general del equipo o interrumpirlo; siendo esta la aplicación que se le da en el prototipo.

2.10 LUCES PILOTO

Las luces piloto (ver figura 2.16.b.), permiten identificar el funcionamiento de componentes o estados de alarma dentro de un sistema; en el prototipo se utilizan luces que operan a 120VAC para identificar el funcionamiento de cada horno (color ámbar) o reconocer si la puerta de alguno de ellos está abierta (color rojo).

2.11 CONTACTORES

El contactor (ver figura 2.16.c.), es un interruptor electromecánico que abre o cierra un circuito mediante la energización de su bobina; su principal ventaja es la

de poder controlar altas corrientes de operación. El sistema utiliza un contactor por cada horno, el mismo que sirve para activar las niquelinas que tienen una corriente máxima de operación de alrededor de 21A dato que se debe tener en cuenta el momento de seleccionar el componente adecuado para el proyecto.

El contactor empleado tiene un voltaje de alimentación de 120VAC para la bobina principal, los tres contactos de salida pueden trabajar con un voltaje de línea de 220VAC a una corriente de 25A para cargas resistivas (AC-1), teniendo una vida útil de 100000 maniobras de activación en un trabajo recomendado de 100 ciclos por hora; de lo cual se puede concluir que es el elemento adecuado para el trabajo de los hornos resistivos.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 2.16. (a) Selector, **(b)** Luz piloto, **(c)** Contactor

2.12 TABLEROS DE CONTROL

El tablero de control es el centro de monitoreo y control de un sistema; en el proyecto se utilizan dos tableros de control; el principal destinado al monitoreo y control y el secundario utilizado únicamente para el control.

2.12.1 TABLERO DE CONTROL PRINCIPAL

El tablero de control principal externamente muestra los elementos que interactúan con el usuario:

- La pantalla táctil para control y monitoreo local.

- Selector de encendido general del sistema.
- Luz piloto izquierda (ámbar) que identifica que el horno 1 está encendido.
- Luz piloto central (roja) que alerta que la puerta de los hornos está abierta.
- Luz piloto derecha (ámbar) que muestra que el horno 2 está encendido.
- Conector Ethernet para comunicación entre el equipo y la PC.
- Llave de acceso al interior del tablero de control.

En el interior del tablero de control principal se encuentran:

- La fuente de alimentación.
- El Switch Ethernet.
- El PLC SIEMENS S7-1200.
- El módulo de expansión SM 1231 AI 4xTC.
- Los elementos de protección.
- Las borneras de conexión.

Figura 2.17. Tablero de control principal (vista externa izquierda), (vista interna derecha)

2.12.2 TABLERO DE CONTROL SECUNDARIO

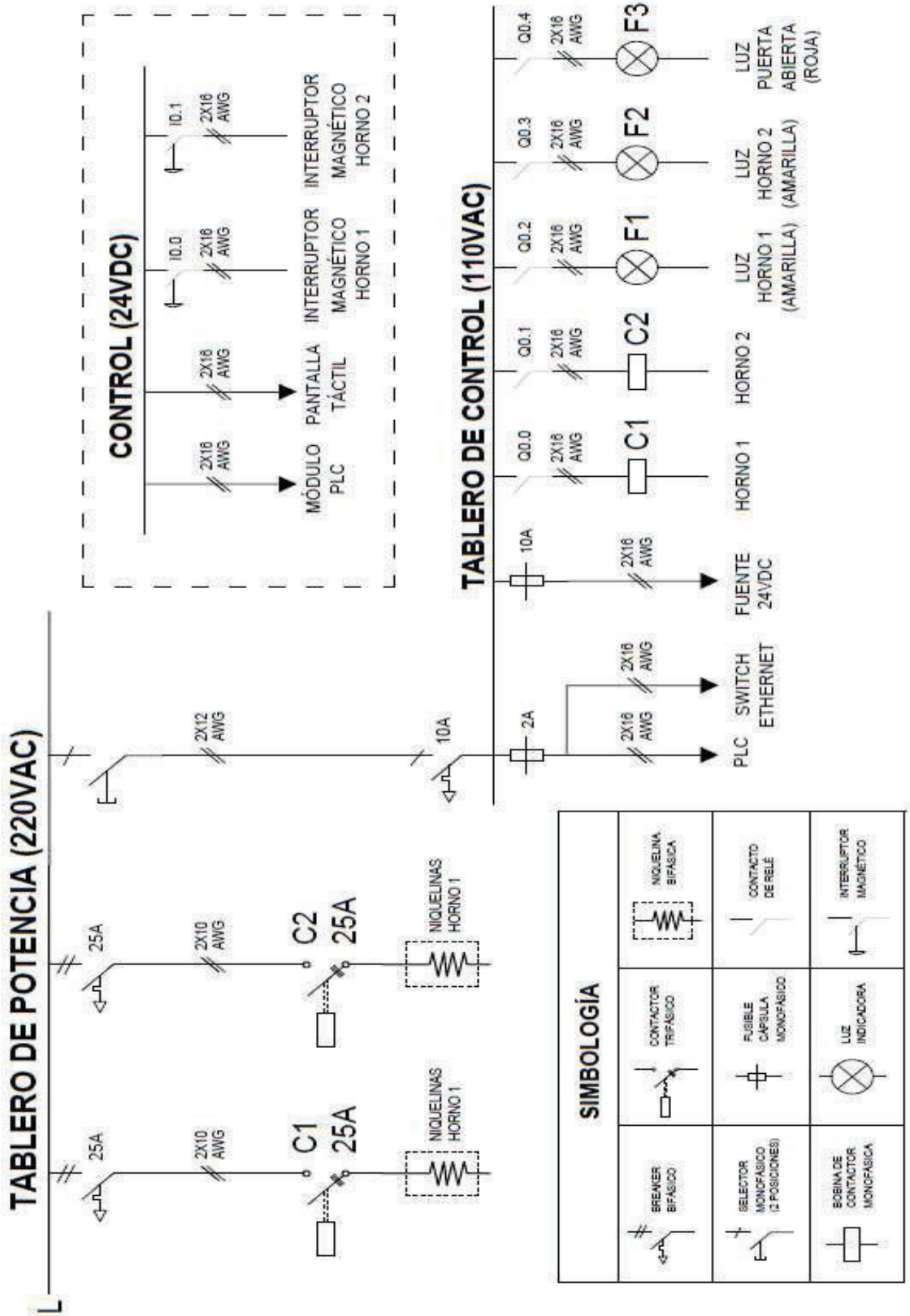
El tablero de control secundario en la parte frontal muestra únicamente la llave de acceso al interior del tablero de control; mientras que en su interior contiene los contactores con sus respectivos elementos de protección y borneras de conexión.

Figura 2.18. Tablero de control secundario (interior)

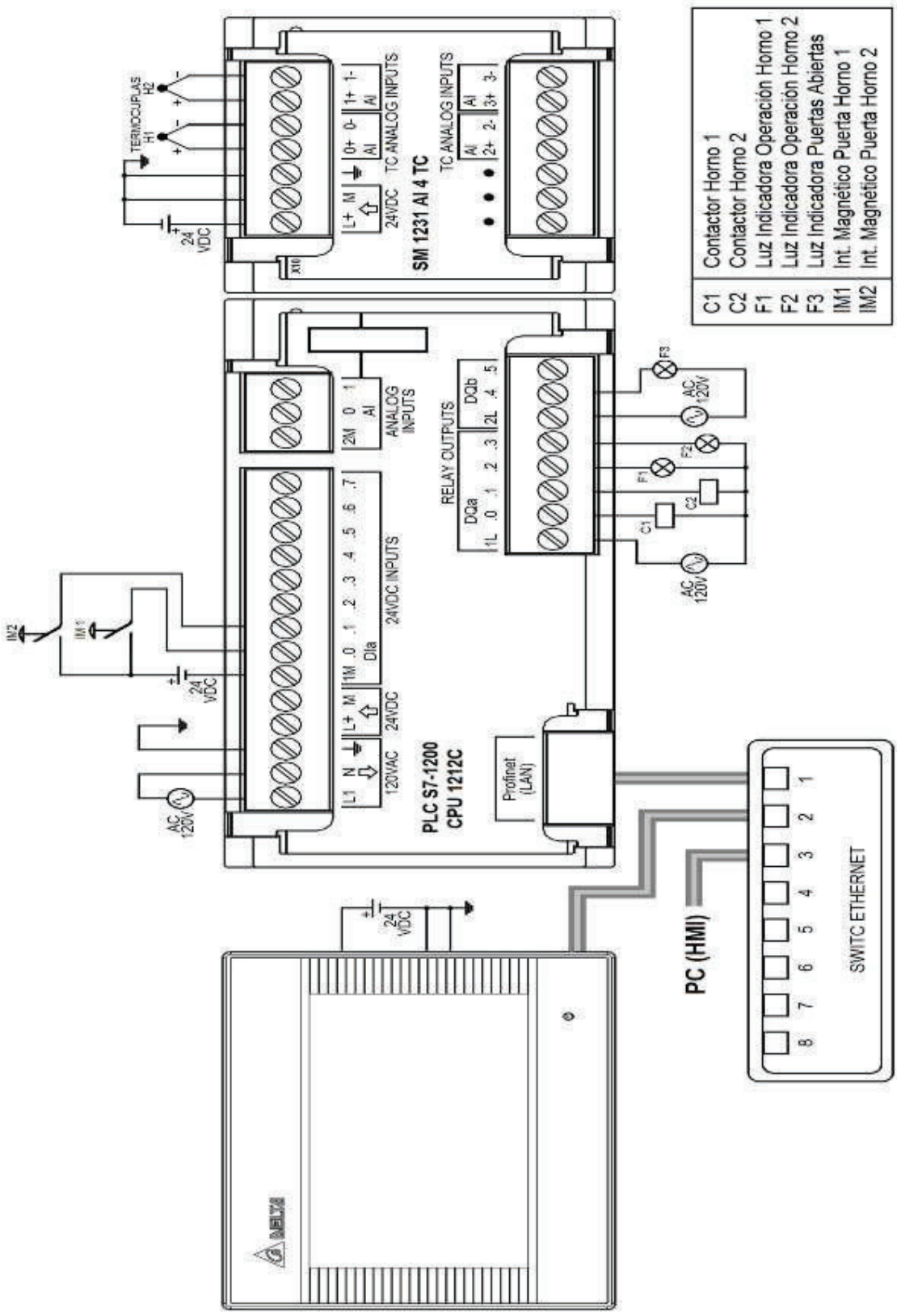
2.13 DIAGRAMAS DEL SISTEMA

El diagrama esquemático del sistema permite identificar con claridad a todos los componentes que conforman el hardware del equipo y su interacción; mientras que el diagrama eléctrico facilita el entendimiento de las conexiones que se necesitan para que el sistema pueda operar.

2.13.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO



2.13.2 DIAGRAMA DEL PLC



2.14 COMPARACIÓN DEL EQUIPO DESARROLLADO CON EL SISTEMA PREVIO

Es importante tener en cuenta que el desarrollo del proyecto actual toma como referencia el sistema de automatización desarrollado como Proyecto de Titulación en el año 2011 [3], en tal sentido es necesario resaltar las semejanzas y diferencias entre este sistema y el equipo actual.

- Con el propósito de alertar al usuario la apertura de las puertas y mejorar la seguridad de los hornos, el equipo actual consta de interruptores magnéticos para detectar este estado; el sistema previo no contaba con esta característica.
- Las niquelinas son un aspecto constructivo de los hornos, por esta razón su utilización y conexiones no han sido modificadas.
- El sensor de temperatura utilizado es una termocupla tipo K que trabaja plenamente dentro del rango de operación del horno, este sensor es una semejanza entre los dos sistemas.
- El sistema anterior utilizaba como elemento central de control al microprocesador el cual por su ubicación en la base de los hornos estaba expuesto a altas temperaturas que afectaban su operación, el equipo actual utiliza un PLC en un tablero de control junto a los hornos, logrando así un sistema mucho más robusto que no se ve afectado por la temperatura alta.
- En el equipo actual el acondicionamiento de sensores se omite gracias a la utilización del módulo de expansión del PLC que permite acoplar entradas tipo termocupla, disminuyendo el error en su lectura; previamente se hacia el acoplamiento en base a circuitos integrados.
- El ingreso de datos del sistema anterior se hacía en base a un teclado matricial, en la actualidad se utiliza una pantalla táctil para ingreso de datos y monitoreo con lo cual se consigue un sistema más sencillo de utilizar a la vez que se mejora con absoluta notoriedad su aspecto visual.
- El monitoreo de información en el equipo actual se centraliza en el HMI local ubicado en un tablero de control que agrupa la información de los dos

hornos, previamente cada horno podía ser monitoreado a través de un LCD local que no funcionaba adecuadamente a altas temperaturas; la robustez del sistema actual permite que funcione en excelentes prestaciones en cualquier rango de su temperatura de operación.

- A pesar que en el Proyecto de Titulación del año 2011 [3] se referencia que se podía utilizar un HMI remoto en base a la utilización de comunicación serial; en el Laboratorio no se disponía de algún software que respalde este hecho; en tal sentido se desarrolló un HMI remoto en LabVIEW el mismo que se comunica con el PLC a través del puerto Ethernet, mejorando así sustancialmente la capacidad de comunicación.
- Los contactores utilizados para el control de los hornos son de similares características en los dos sistemas puesto que las niquelinas no han sido modificadas; sin embargo es importante resaltar que en el proyecto actual se utiliza un Control ON-OFF debido a que este tipo de control es sencillo, permite una correcta operación de los hornos y los resultados obtenidos no presentan errores demasiado significativos como se puede evidenciar en el Capítulo 4 donde se analizan las pruebas realizadas y los errores obtenidos.

En resumen el sistema actual mantiene el principio de operación de su antecesor pero mejora notablemente la visualización y robustez del equipo al basar su operación en el uso del PLC y la pantalla táctil; logrando que el sistema opere de acuerdo a lo deseado en todo su rango de operación y no se vea afectado por acción de altas temperaturas; además de centralizar el control y la información de los dos hornos pudiendo trabajar con cualquiera de ellos desde un único punto de control local y un punto de control remoto.

En este capítulo se pudo estudiar los componentes físicos que sustentan y permiten la operación del Sistema de Automatización de Hornos para Tratamiento Térmico, para lograr un correcto funcionamiento del hardware estudiado es necesario desarrollar el software que respalde el trabajo del equipo; en tal sentido en el siguiente capítulo se estudia el Desarrollo del Software incluyendo todos los programas que permiten la correcta operación del módulo.

CAPÍTULO 3
DESARROLLO DEL SOFTWARE

El software constituye el alma de cualquier sistema de automatización y control al permitir su funcionamiento y definir los detalles de operación de todos los componentes del hardware. Para la automatización de los hornos para tratamiento térmico se usa como base de control al PLC S7-1200 de SIEMENS, el mismo que se configura usando el software TIA PORTAL V11.

El sistema posee un HMI local basado en una pantalla táctil marca DELTA, la programación que gobierna el funcionamiento de este equipo se realiza con ayuda del software DOPSoft 1.01.08; adicionalmente el prototipo puede conectarse con un computador donde se ejecuta el HMI remoto, el mismo que se configura utilizando LabVIEW 2011 que constituye una herramienta de programación gráfica muy versátil para el diseño de sistemas de control y automatización. LabVIEW se basa en un código gráfico denominado lenguaje G, cuya principal característica es la facilidad de uso que permite hacer programas relativamente complejos con una rapidez y facilidad que podría resultar casi imposible de conseguir con lenguajes de programación tradicionales.

En consecuencia de lo expuesto, a continuación se expresan las principales consideraciones que se deben tener en cuenta el momento de utilizar los programas antes mencionados a la vez que se detalla el desarrollo del software que permite el funcionamiento del equipo.

3.1 TIA PORTAL V11

El Totally Integrated Automation (TIA) Portal V11 es un software que se caracteriza por facilitar al usuario la ejecución de las tareas necesarias para programar el funcionamiento del PLC y lograr la comunicación del mismo a través de una red Ethernet. Su entorno ofrece dos vistas del espacio de trabajo: la vista del portal muestra las tareas y funciones de las herramientas empleadas en el

desarrollo del programa; mientras que la vista del proyecto detalla los elementos que conforman el proyecto; el usuario puede alternar entre estas vistas para mejorar y facilitar su trabajo. [12]

La vista del portal contiene: el Portal (1) donde se visualizan las diferentes tareas que se puede seleccionar, el Resumen de Tareas (2) que presentan las opciones de trabajo que corresponden al portal escogido, el Panel de Selección (3) que muestra las acciones disponibles y requeridas para cada tarea y el ícono Vista del Proyecto (4) que permite cambiar el tipo de vista utilizada. [12]

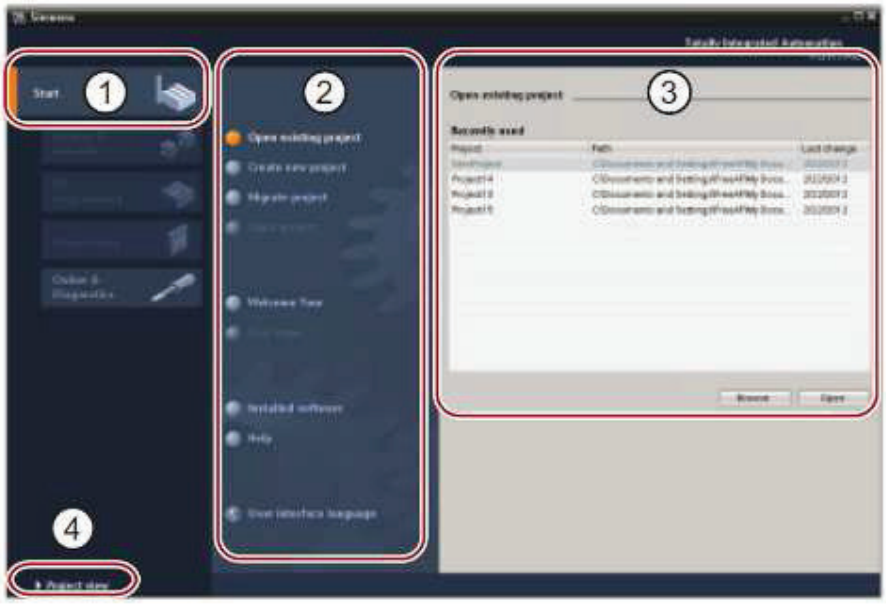


Figura 3.1. Vista del portal del TIA Portal V11, tomado de [12]

La vista del proyecto tiene un entorno clásico de los programas de Windows y contiene: el Menú y Barra de Herramientas (1) con una serie de íconos gráficos que representan a los comandos principales, el Árbol del Proyecto (2) donde se visualiza la ubicación de los componentes y sus detalles de programación, el Área de Trabajo (3) que constituye el espacio en el que se desarrolla el programa, el Task Cards (4) que muestra agrupadas en funciones a todas las instrucciones disponibles, la Ventana de Inspección (5) que permite ubicar características y propiedades del objeto seleccionado dentro del espacio de trabajo, el ícono de la Vista del Portal (6) que sirve para cambiar el tipo de vista usada y la Barra del

Editor (7) que se utiliza para hacer el trabajo más ágil y eficiente al mostrar todas las ventanas que están abiertas, mejorando así las tareas de edición. [12]

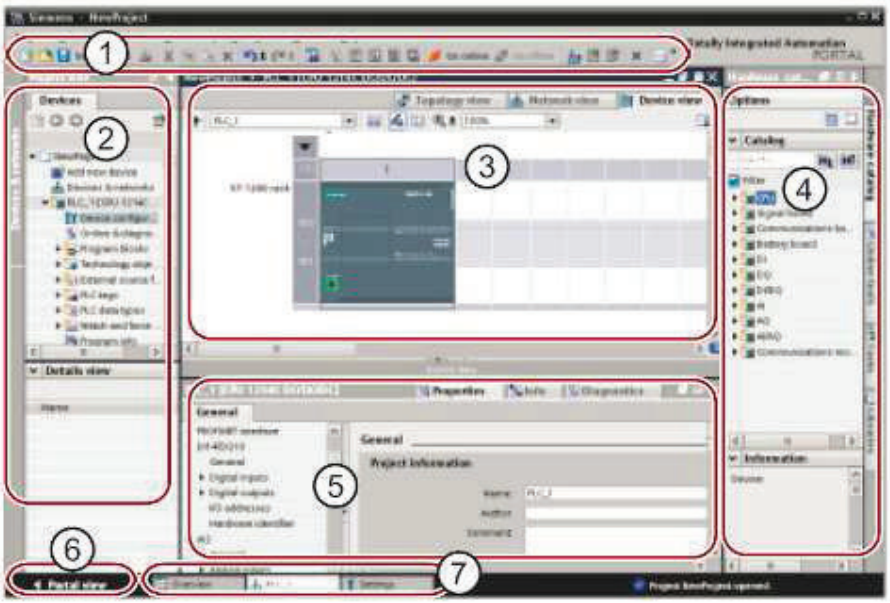


Figura 3.2. Vista del proyecto del TIA Portal V11, tomado de [12]

3.1.1 CREACIÓN DE PROYECTOS

El desarrollo del software inicia abriendo un nuevo proyecto, para esta acción se debe seleccionar el ícono Crear proyecto en la opción Iniciar de la vista del portal, posteriormente se llena los campos requeridos y finalmente se pulsa Crear. [12]

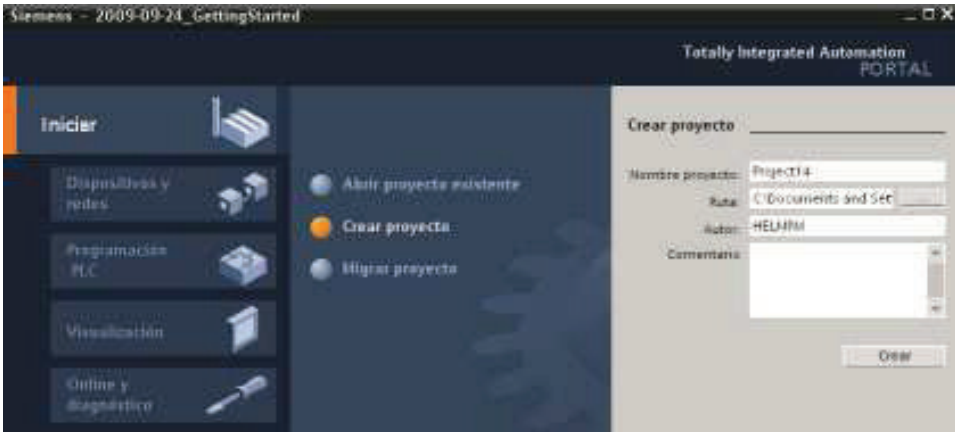


Figura 3.3. Crear un nuevo proyecto, tomado de [12]

Para trabajar en el proyecto creado es esencial definir el dispositivo a utilizar, para ello se selecciona la opción Dispositivos y redes en la vista del portal y posteriormente el ícono Agregar dispositivo. [12]

Figura 3.4. Agregar dispositivo, tomado de [12]

La selección del ícono Agregar dispositivo abre un cuadro de diálogo en el que se debe seleccionar la opción del PLC con el que se va a trabajar, para el S7-1200 se escoge la opción SIMATIC PLC; una vez definido el dispositivo, es necesario escoger y agregar el tipo de CPU a utilizar e inmediatamente se abre la vista del proyecto en la que se configura el dispositivo seleccionado. [12]

Figura 3.5. Selección del CPU, tomado de [12]

3.1.2 AGREGAR MÓDULOS ADICIONALES

El S7-1200 como ya se ha revisado puede utilizar módulos adicionales que amplían su capacidad de trabajo, para agregarlos de forma manual se debe seleccionar el componente adecuado en el listado del hardware; este hecho se consigue haciendo doble clic en el módulo o arrastrándolo al espacio de trabajo, finalmente se debe configurar el módulo para que opere correctamente. [12]

Existe una alternativa para agregar el CPU y los módulos adicionales sin necesidad de seleccionarlos, para esto se requiere que el PLC esté conectado con el computador y a continuación se ejecutan los siguientes pasos: [12]

- Cree un nuevo proyecto sin especificar el CPU.
- Ubique el menú online del editor de programación y seleccione la opción detección de hardware.
- En el editor de configuración de dispositivos escoja la opción detección del dispositivo conectado.
- TIA Portal selecciona automáticamente el hardware del CPU incluyendo a todos los módulos conectados (SM, SB o CM).

3.1.3 CREAR VARIABLES PARA E/S DEL CPU

Las variables constituyen nombres asignados a los componentes utilizados dentro de un proyecto, la denominación que se da a cada elemento debe tener relación con el proceso para facilitar su entendimiento. Las variables creadas se guardan en una tabla, la misma que se visualiza simultáneamente con el editor de dispositivos logrando facilitar su interrelación. [12]

Para añadir a la tabla de variables, entradas o salidas físicas del PLC, es necesario arrastrarlas desde el dibujo esquemático del CPU hacia la tabla; después de aquello se puede reasignar el nombre de cada variable con lo cual se encuentran disponibles para su uso en el programa.

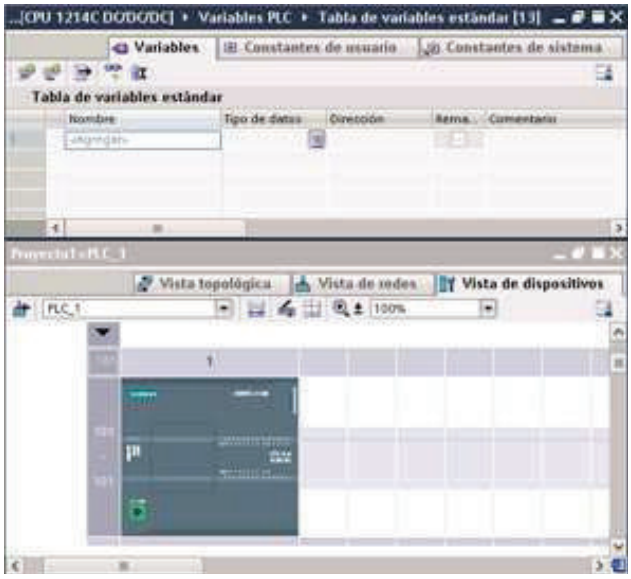


Figura 3.6. Creación de variables, tomado de [12]

3.1.4 PROGRAMACIÓN DEL S7-1200

La programación del PLC depende del tipo de aplicación que se le dé al dispositivo, su estructura puede ser: lineal, donde se ejecutan las instrucciones de forma secuencial (una tras otra); o modular, que es un tipo de estructura que llama a subrutinas o funciones que ejecutan tareas específicas, es decir el programa principal se divide en subprogramas de menor complejidad y extensión que se basan en bloques lógicos que pueden ser: Bloques de Organización (OB), Bloques de Datos (DB), Bloques de Función (FB) y Funciones (FC). [12]

- El Bloque de Organización (OB) se utiliza para ejecutar el programa principal, sirviendo de interfaz con el sistema operativo; adicionalmente se pueden utilizar OBs adicionales para ejecutar funciones específicas como: arranque, procesamiento de alarmas, tratamiento de errores, etc.
- Un Bloque de Función (FB) es una subrutina con memoria específica que almacena los parámetros de entrada y salida en un DB asociado de modo que sea fácil acceder a ellos en otra sección del programa y se utiliza para programar y controlar tareas recurrentes.

- El Bloque de Datos (DB) ofrece un espacio de memoria asociado al FB, el mismo que almacena datos de los dispositivos utilizados en él una vez que haya finalizado su ejecución.
- Una Función (FC) es una subrutina que realiza operaciones específicas y almacena los resultados en una memoria temporal (L) sin DBs asociados, se puede llamar varias veces dentro del programa facilitando la ejecución de tareas repetitivas como operaciones matemáticas o booleanas.

Para crear un bloque lógico, el primer paso es abrir la carpeta Bloques de Programa y seleccionar la opción Agregar nuevo bloque, enseguida se abre un cuadro de diálogo en donde se debe seleccionar el tipo de bloque que se va a insertar y finalmente se especifica el lenguaje de programación a emplear. [12]

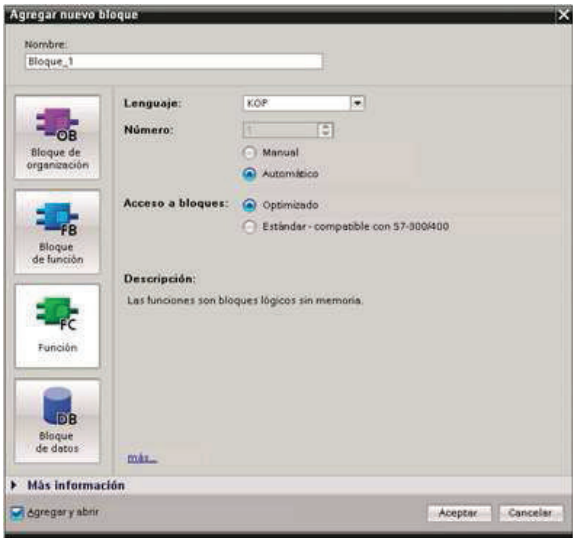


Figura 3.7. Creación de bloques lógicos, tomado de [12]

3.1.5 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

La programación de PLCs se puede realizar en base a diferentes lenguajes de programación, TIA Portal dispone de tres lenguajes estándar para el S7-1200: Esquema de Contactos (KOP), Diagrama de Funciones (FUP) y Lenguaje de Control Estructurado (SCL). [12]

3.1.5.1 Esquema de Contactos (KOP)

El esquema de contactos o lenguaje tipo escalera (ladder), es un lenguaje de programación gráfico basado en el uso de esquemas eléctricos clásicos. [12]

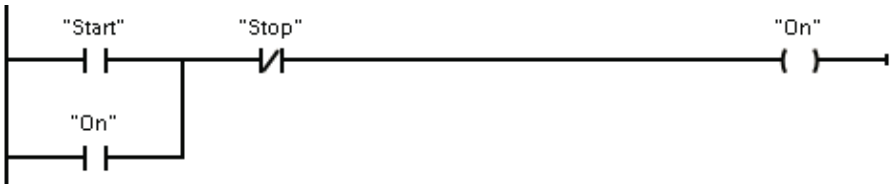


Figura 3.8. Esquema de contactos (KOP), tomado de [12]

Los elementos que conforman el circuito pueden ser: contactos normalmente abiertos o normalmente cerrados, bobinas, temporizadores, contadores, operaciones matemáticas o lógicas, etc.; estos elementos se combinan para formar segmentos, los mismos que pueden tener varios ramales o derivaciones en paralelo para lograr lógicas de operación complejas. TIA Portal no limita la cantidad de filas y columnas que conforman cada segmento, sin embrago es importante tener en cuenta que no es posible programar ramas que puedan ocasionar un flujo invertido de corriente o cortocircuitos. [12]

3.1.5.2 Diagrama de Funciones (FUP)

El diagrama de funciones es un lenguaje de programación gráfico que se basa en la utilización de los símbolos lógicos empleados en el álgebra booleana a través de cuadros que representan las tareas asignadas, es posible añadir ramas paralelas entre los cuadros que representan las funciones y combinarlas con operaciones matemáticas para conseguir desarrollar programas complejos. [12]

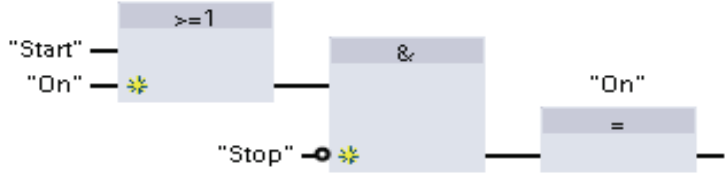


Figura 3.9. Diagrama de funciones (FUP), tomado de [12]

3.1.5.3 Lenguaje de Control Estructurado (SCL)

El lenguaje de control estructurado utiliza un conjunto de instrucciones de alto nivel basadas en texto, las mismas que pueden combinarse con los lenguajes KOP y FUP para optimizar la programación. [12]

El SCL utiliza operadores estándar para operaciones matemáticas (:=, +, -, *, /) y además emplea instrucciones de control de programación usados por lenguaje PASCAL (IF-THEN-ELSE, CASE, REPEAT-UNTIL, GOTO y RETURN).

Las opciones de control propias de un lenguaje de alto nivel como los bucles y anidamientos permiten implementar algoritmos complejos en SCL de una forma más sencilla a la que se podrían hacer en los lenguajes KOP y FUP.

3.1.6 COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS

El S7-1200 es un controlador que se puede comunicar con computadores, dispositivos HMI y otros PLCs a través de Ethernet, se requiere utilizar un switch Ethernet para una red que incorpore más de dos dispositivos interconectados.

Para crear una conexión de red se debe seleccionar la opción "Configuración de dispositivos", dentro de la cual se utiliza la Vista de red; una vez creada la conexión se accede a la ficha Propiedades de la ventana de inspección para configurar los parámetros de la red.

3.2 DOPSOFT 1.01.08

DOPSoft es un software utilizado para configurar HMIs multifuncionales de la marca DELTA, su trabajo se basa en la integración de componentes y funciones similares a las de editores de macros convencionales, la interfaz de trabajo es bastante amigable y fácil de usar a la vez que brinda una rápida velocidad de

respuesta. La primera vez que se abre el software DOPSoft las opciones disponibles se limitan a los menús de la barra de herramientas: Archivo, Ver, Herramientas, Opciones y Ayuda. [16]

3.2.1 CREAR UN PROYECTO

Una vez que se inicia la ejecución de DOPSoft es necesario crear un nuevo proyecto, este hecho se consigue al digitar [Ctrl + N], acceder a través del menú Archivo o seleccionar el ícono gráfico de acceso directo , tras esta acción aparece el asistente de proyectos. [16]

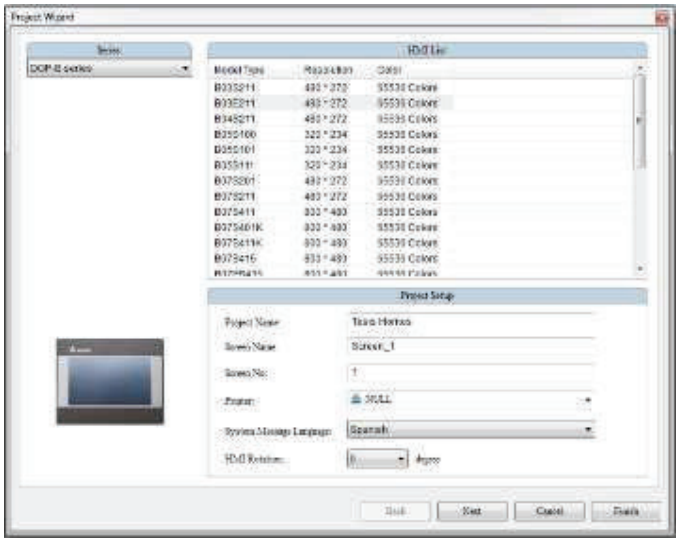


Figura 3.10. Asistente de proyectos, tomado de [16]

El asistente de proyectos permite seleccionar: el modelo del HMI utilizado, los nombres y números de las pantallas creadas, el idioma y la rotación de pantalla. Al finalizar la configuración y hacer click en siguiente, se puede definir el protocolo de comunicaciones con las opciones COM o Ethernet. [16]

Al seleccionar la opción COM, se establece el nombre del link, el número de modelo del controlador, el puerto de comunicaciones y los parámetros generales para la comunicación entre el panel y el controlador. [16]

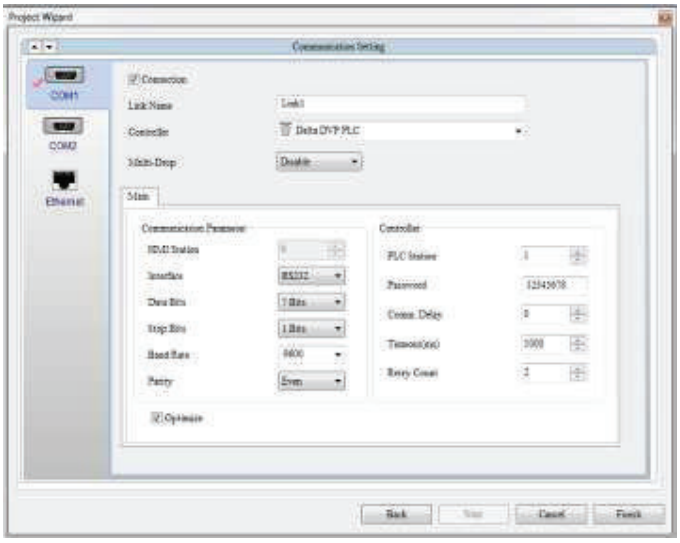


Figura 3.11. Configurar el protocolo de comunicación (COM), tomado de [16]

La comunicación puede ser a través de Ethernet, en cuyo caso se selecciona el ícono correspondiente, se agrega un nuevo enlace Ethernet y se configura: el número de modelo del controlador asociado, la dirección IP del controlador, el tiempo de retardo y espera de la comunicación y el recuento de intentos. [16]

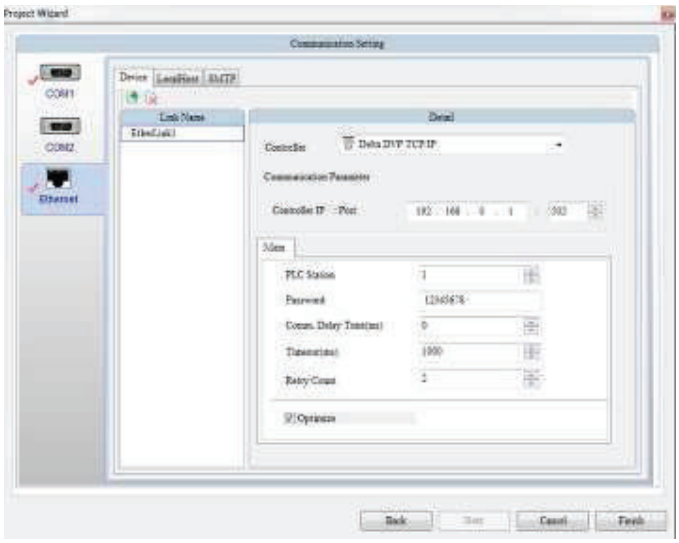


Figura 3.12. Configurar el protocolo de comunicación (Ethernet), tomado de [16]

Las alternativas para abrir proyectos existentes o guardar los modificados son idénticas a las de cualquier programa del entorno de Windows; sin embargo es necesario tener en cuenta que la extensión de los archivos creados en DOPSoft puede ser: *.dps, *.dpb o *.dop de acuerdo a la versión del software utilizado. [16]

3.2.2 ENTORNO DE TRABAJO

Tras crear un nuevo proyecto y configurar el dispositivo empleado, DOPSoft muestra el entorno de trabajo indicado en la figura 3.13.

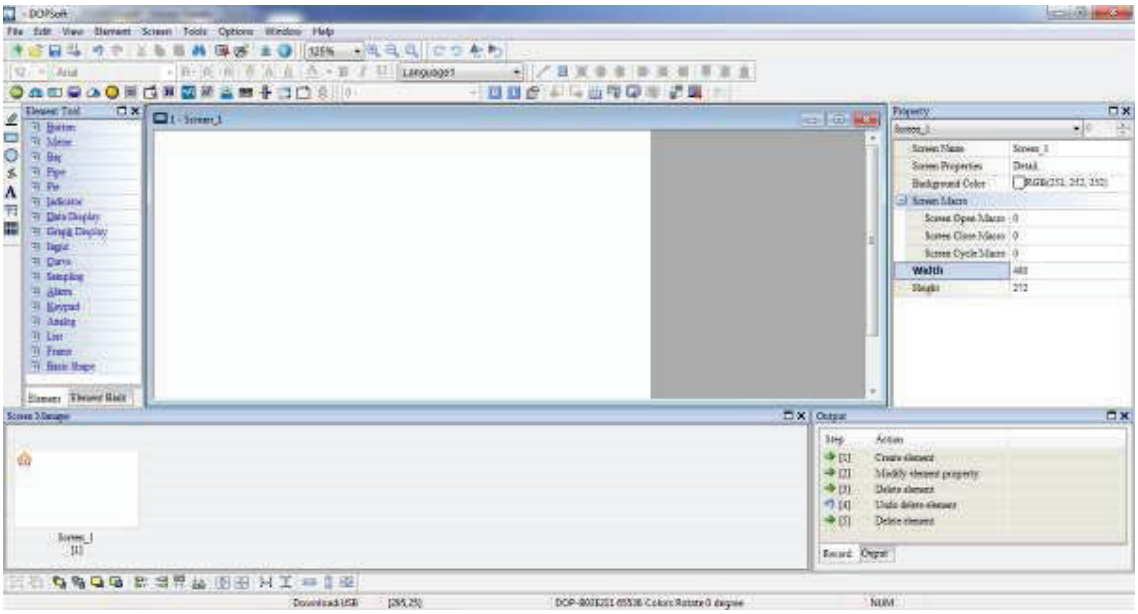


Figura 3.13. Ventana de Edición DOPSoft, tomado de [16]

Los principales componentes del entorno de trabajo de DOPSoft son [16]:

- La Barra de Menú que contiene nueve alternativas de selección, ahí se encuentran todas las funciones disponibles en el programa: File, Edit, View, Element, Screen, Tools, Options, Window, Help.
- Las Barras de Herramientas, presentan las principales funciones en forma gráfica, están organizadas de acuerdo a su utilidad y son: Barra Estándar, Barra de Visualización, Barra de Texto, Barra de Elementos, Barra de Lenguaje, Barra de Formato y Barra de Dibujo.
- La Barra de Elementos, provee varios tipos de componentes que pueden usarse en el espacio de trabajo al arrastrarlos hacia él, existe la opción de guardar los elementos utilizados y crear una librería del usuario.
- La Tabla de Propiedades muestra las características y propiedades de los elementos utilizados en el espacio de trabajo.

- La Ventana de Salida guarda el historial de las acciones ejecutadas con los elementos del espacio de trabajo, adicionalmente se muestran los errores de programación encontrados al compilar el programa.
- El Espacio de trabajo es el sitio que representa el HMI que se visualiza en pantalla y contienen a todos los elementos utilizados.
- La Ventana de Administración permite identificar el contenido de cada una de las ventanas creadas en el espacio de trabajo, mediante su vista previa; se accede a la ventana deseada dando doble clic en ella.

3.2.3 ELEMENTOS DISPONBLES

DOPSoft permite utilizar una gran cantidad de dispositivos dentro de las pantallas del HMI, estos están disponibles dentro de la barra de elementos y pueden ser:

- Botones de set, reset, momentáneos, mantenidos, multiestado, incremento, decremento, de configuración o para saltar entre pantallas.
- Indicadores ON/OFF, analógicos, multiestado, tipo barra normales o diferenciales y tipo pastel con diferentes modos de operación.
- Tanques y tuberías de paso, tipo codo, T o multidirección.
- Entradas y salidas numéricas, de caracteres, código de barra, hora y fecha.
- Gráficas XY, de dispersión, alarmas y figuras básicas decorativas.
- Teclados de diferente tamaño y tipo de caracteres.

Adicionalmente DOPSoft permite definir condiciones particulares para todos los elementos utilizados mediante la programación de macros, la misma que se realiza a través de código de programación PASCAL.

3.3 PROGRAMACIÓN DEL SIMATIC S7-1200

El elemento de control principal en el prototipo implementado es el PLC SIMATIC S7-1200 de SIEMENS, este componente ejecuta todas las operaciones que permiten el funcionamiento del sistema: lee el valor de la temperatura que sensan

las termocuplas, detecta las condiciones de trabajo especificadas por el programador a través de los HMIs, procesa los datos configurados a fin de controlar la temperatura de trabajo de los hornos, despliega la información del proceso para su visualización, indica cuál de los hornos está operativo o si la puerta de alguno está abierta a través de luces piloto y alarmas y se comunica con el computador mediante la interfaz Profinet.

3.3.1 CONFIGURACIONES BÁSICAS DEL PLC S7-1200

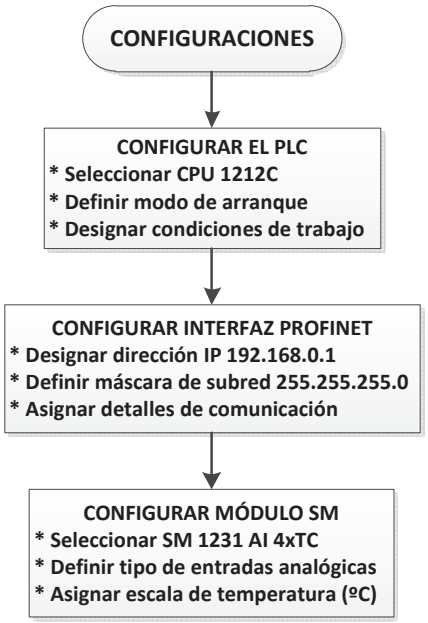


Figura 3.14. Diagrama de flujo de las configuraciones básicas del PLC

Al iniciar la programación es imprescindible realizar configuraciones básicas del PLC, primero se selecciona el CPU 1212C AC/DC/Rly como hardware utilizado, luego se definen las condiciones de trabajo y firmware; también se debe configurar la red Profinet que permite la comunicación del PLC con la pantalla táctil y el PC, siendo 192.168.0.1 la dirección IP asignada.

Finalmente es necesario definir que se utiliza el módulo de entradas analógicas para termocuplas SM 1231 AI 4xTC; al mismo que se le conectan 2 termopares tipo K a través de los canales 0 y 1; se debe especificar también que la lectura de

la temperatura será expresada en ºC. Es importante señalar que la etapa de configuración se efectúa únicamente al iniciar la programación del PLC.

3.3.2 PROGRAMA PRINCIPAL DEL PLC S7-1200

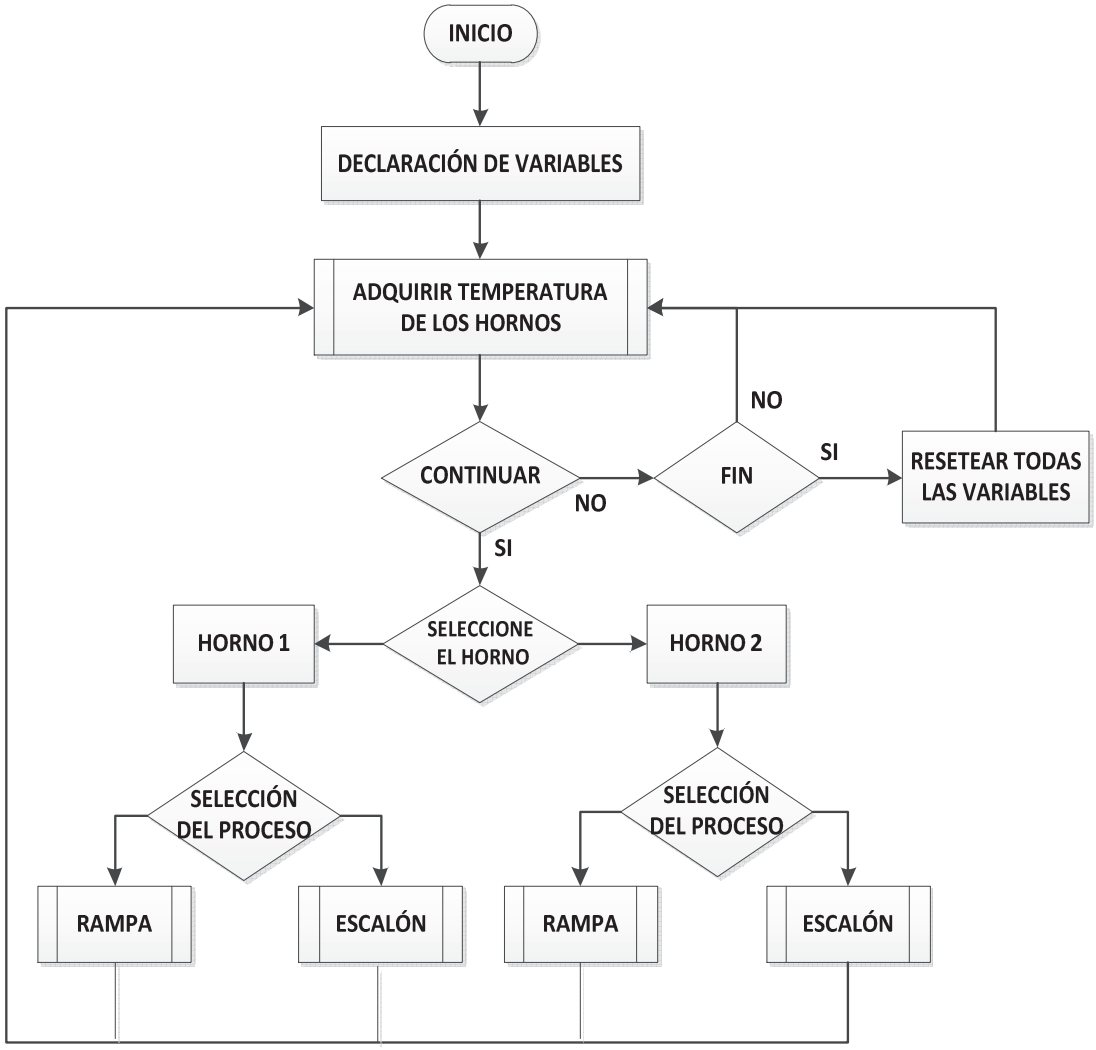


Figura 3.15. Diagrama de flujo del programa principal del PLC

El programa principal contiene el software que sustenta el funcionamiento del PLC, a la vez muestra subprocesos específicos que se detallan más adelante.

El desarrollo del software empieza con la declaración de variables, esta etapa consiste en denominar a cada dato que interviene en el proceso con un nombre

que guarda relación con el tipo de operación efectuada por el PLC y permite facilitar la tarea de programación, TIA Portal incluye una tabla de variables en la que se aprecian los nombres, tipo de datos y direcciones utilizadas por cada componente del proceso; cabe destacar que los tipos de datos utilizados en el proyecto son: booleanos, enteros, enteros de doble longitud, reales y palabras.

Tras declarar las variables, se debe sensar la temperatura de los hornos con ayuda de las termocuplas, de este modo se obtiene un valor de referencia para su operación. Para continuar con la operación del PLC es necesario que en alguno de los HMIs se seleccione la opción CONTINUAR, de lo contrario el equipo chequea si se ha pulsado la tecla FIN para resetear todas las variables del proceso, es decir las de los dos hornos; si ninguna de estas opciones se ha escogido el programa retorna a la adquisición de datos.

Una vez pulsada la tecla CONTINUAR se enclava esta opción, luego se debe indicar el horno que se va a utilizar para el tratamiento térmico; es importante aclarar que los dos hornos trabajan con absoluta independencia y sin restricción y pueden escogerse de forma indistinta en cualquier momento; posterior a la selección del horno se indica el tipo de proceso con el que se va a trabajar, las opciones disponibles para cada caso son RAMPA o ESCALÓN (Múltiples Rampas), se puede trabajar sólo con una de estas alternativas a la vez; cada proceso como se verá en la subrutina respectiva puede detenerse en cualquier momento mediante una tecla de apagado, si esto no ocurre después de los tiempos programados los procesos terminan y el programa retorna a la subrutina de adquisición de datos donde se reinicia el proceso hasta que se vuelva a seleccionar el horno para el tratamiento.

3.3.3 ADQUISICIÓN DE TEMPERATURA DE LOS HORNOS

La etapa de adquisición de datos monitorea la temperatura de los hornos a través de la lectura de las dos entradas analógicas tipo termocupla del módulo SM 1231 AI 4xTC; en el canal 0 se conecta el termopar del horno 1, mientras que el canal 1 se usa para sensar la temperatura del horno 2; posterior a la lectura, el sistema

convierte la temperatura sensada a diferentes tipos de datos que se utilizarán en los cálculos de las siguientes subrutinas y finalmente retorna al programa principal para continuar con el proceso.

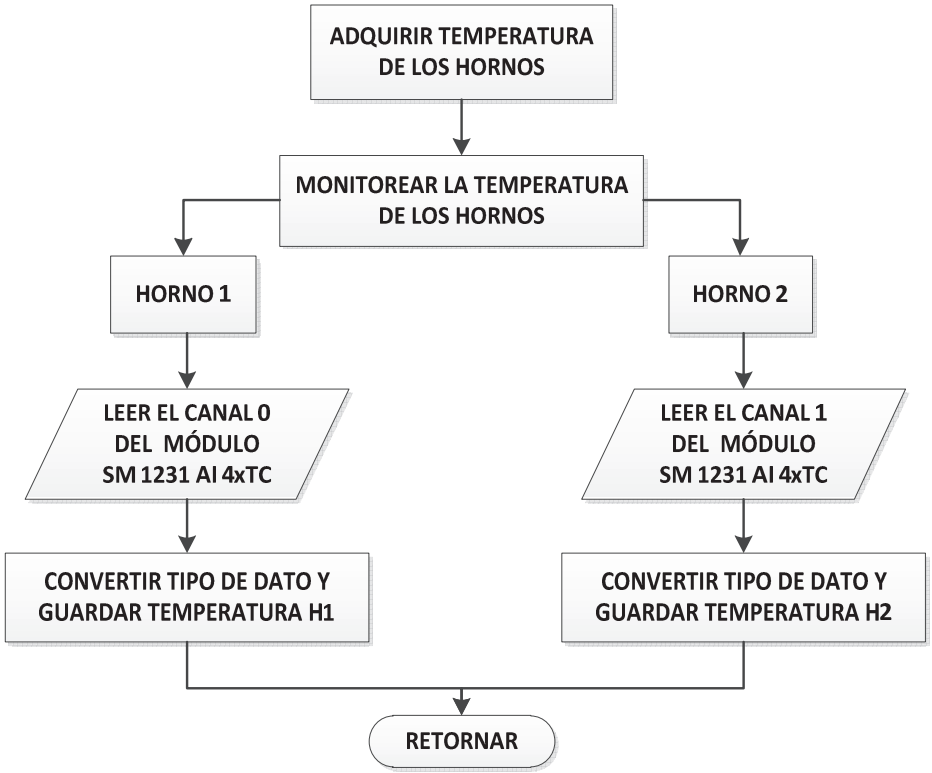


Figura 3.16. Diagrama de flujo de adquisición de temperatura de los hornos

3.3.4 RAMPA

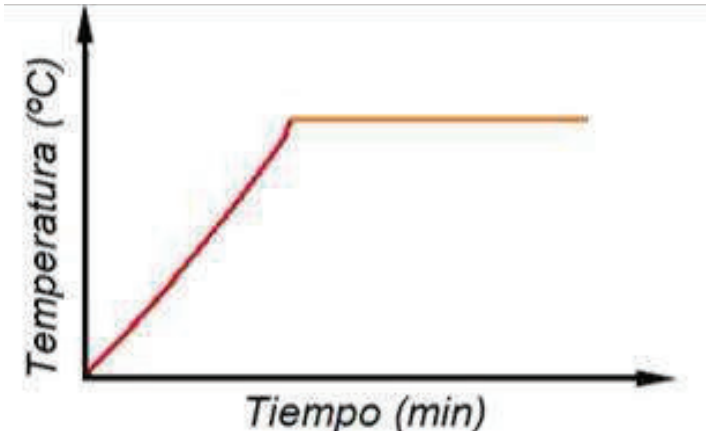


Figura 3.17. Bosquejo de la Rampa

La figura 3.17 muestra el bosquejo de una rampa, en color rojo se muestra la fase de calentamiento y en color naranja se puede notar la etapa de permanencia.

La rampa es un proceso caracterizado por el calentamiento del horno hasta alcanzar la Temperatura máxima (Tmax), el ritmo o velocidad de calentamiento está definido por la Pendiente (Pend) y el tiempo que la muestra permanece caliente está determinado por el tiempo de Permanencia (t Perm); es importante resaltar que en el diseño del software del proyecto, se utiliza como unidad de temperatura al grado Celcius (ºC) y como unidad de tiempo al minuto (min).

La generación de la rampa empieza con el ingreso de los datos de: Pendiente (ºC/min), Temperatura Máxima (ºC) y tiempo de Permanencia (min); estas variables se usan para calcular el tiempo de calentamiento, el mismo que constituye la base para generar la ecuación de calentamiento.

Si el usuario pulsa la opción MARCHA, la subrutina empieza a generar la ecuación de la rampa, la misma que toma como punto de referencia o partida la temperatura ambiente para generar la recta que controla el funcionamiento de las niquelinas; una vez que se empieza a generar la rampa, el proceso chequea si ha terminado el tiempo de calentamiento (t cal) en cuyo caso avanza a la siguiente etapa, de lo contrario accede a la subrutina de encendido de las niquelinas. Al culminar esta fase, verifica si se ha pulsado la tecla para apagar el horno, la misma que al activarse resetea las variables del proceso y retorna al programa principal; si no ha sido pulsada continua la generación de la rampa y el programa permanece en este lazo hasta que culmine el tiempo de calentamiento.

Al concluir el tiempo de calentamiento se da paso a la siguiente etapa que hace que la muestra se mantenga a la temperatura máxima durante el tiempo de permanencia, cuando este tiempo transcurre se finaliza el proceso para retornar al programa principal, de lo contrario se encienden las niquelinas tras lo cual se verifica si se pulsó la tecla para apagar el horno, si esta ha sido tocada se resetean las variables del proceso y luego se retorna al programa principal. Si la tecla de apagado no ha sido seleccionada el programa continua en la fase de

permanencia y se mantiene en este lazo mientras no culmine el tiempo de permanencia que se programó.

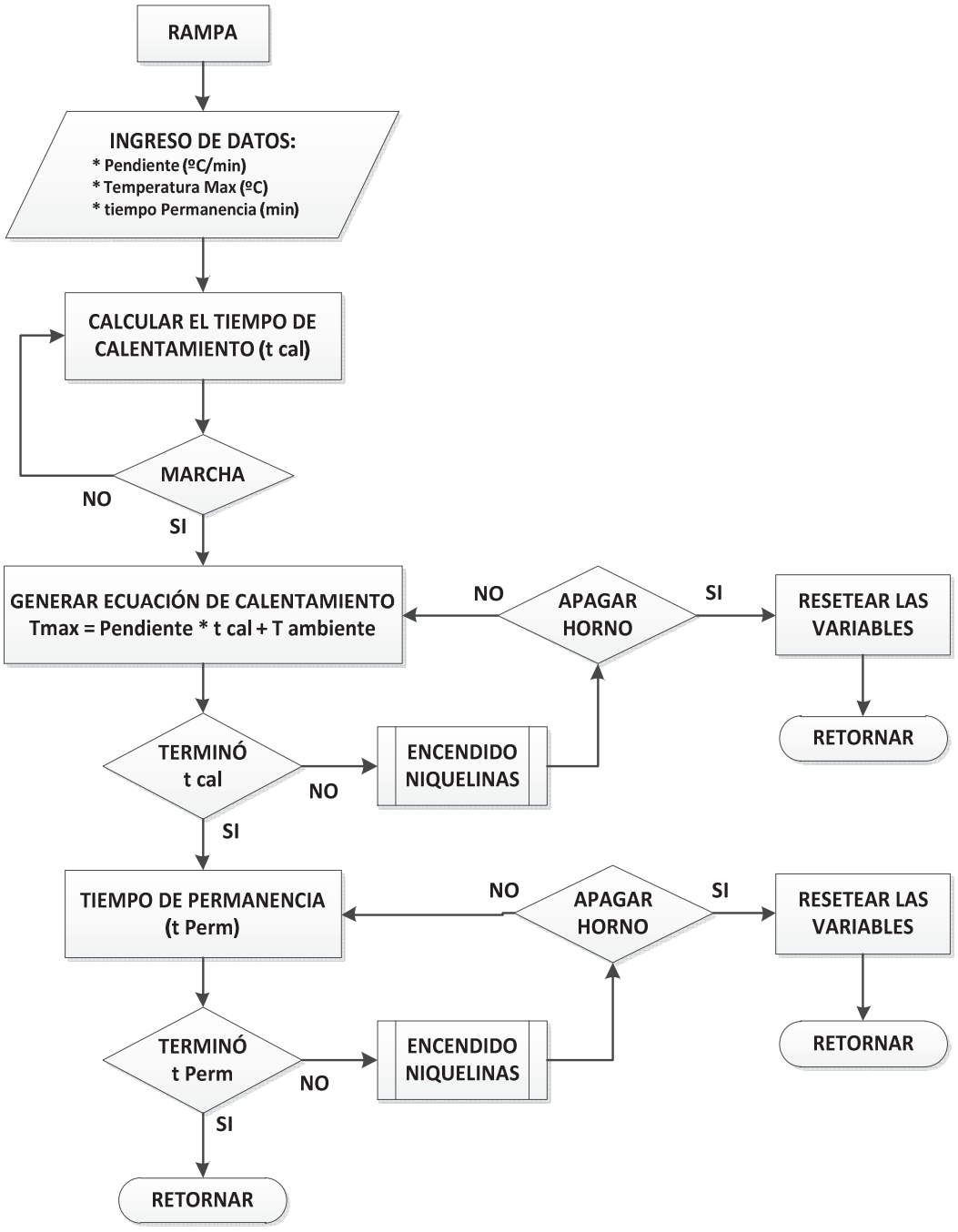


Figura 3.18. Diagrama de flujo de la rampa

3.3.5 RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN)

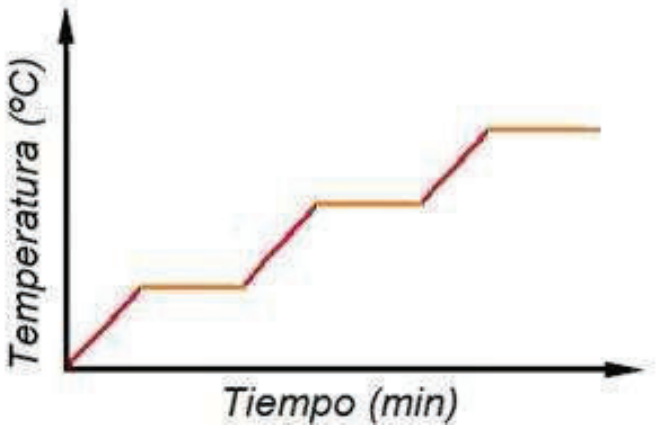


Figura 3.19. Bosquejo del escalón

La figura 3.19 representa el bosquejo del modo de trabajo de rampas consecutivas, el mismo que por razones de simplificación será denominado como escalón; consta de tres etapas cuyas fases de calentamiento se muestran en color rojo; mientras que en color naranja se resaltan sus etapas de permanencia.

El escalón es un proceso conformado por la generación de varias rampas consecutivas; en tal sentido cada parte o etapa del escalón también está caracterizada por la Temperatura máxima (Tmax), la Pendiente (Pend) y el tiempo de Permanencia (t Perm); siendo la principal característica que una etapa depende de la anterior.

La generación de las rampas consecutivas utiliza para su funcionamiento la subrutina de la rampa en cada sección, es importante señalar que los datos ingresados: Temperatura máxima (Tmax), Pendiente (Pend) y tiempo de Permanencia (t Perm) son independientes para cada una de las etapas.

Inicialmente se genera la rampa A, una vez finalizada la ejecución de esta subrutina, se almacenan los resultantes de modo que la temperatura alcanzada sirva como base para generar la rampa B; cuando finaliza la rampa B la temperatura existente se usa como referencia para generar la rampa C y así concluir con la generación del escalón.

La inicialización del proceso requiere que el usuario pulse la opción MARCHA con lo cual se genera la rampa A, la misma que al finalizar dispara un bit que permite el inicio de la rampa B; la cual al concluir de igual forma setea un bit que da inicio a la generación de la rampa C concluyendo así la creación del escalón.

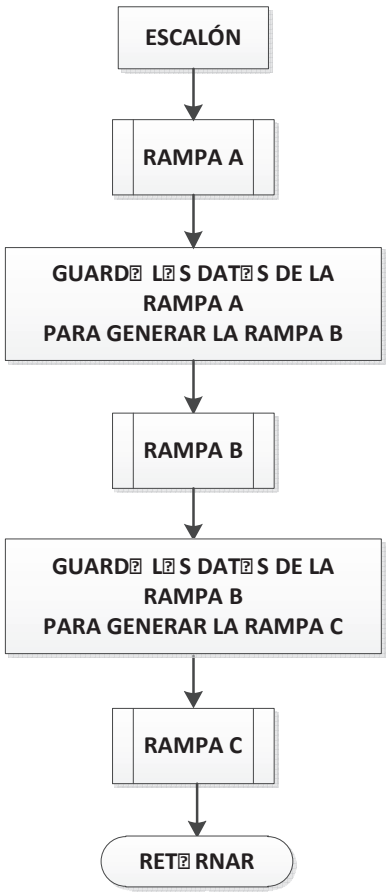


Figura 3.20. Diagrama de flujo del escalón

3.3.6 ENCENDIDO DE LAS NIQUELINAS

El encendido de las niquelinas es la subrutina que controla la temperatura de los hornos, lo primero que hace esta etapa es verificar si la temperatura medida es menor que la temperatura deseada en cuyo caso se encienden las niquelinas; posterior a la culminación de la rampa, es decir en la etapa de permanencia; el programa genera una histéresis representada por la Temperatura Superior (T SUP) y la Temperatura Inferior (T INF).

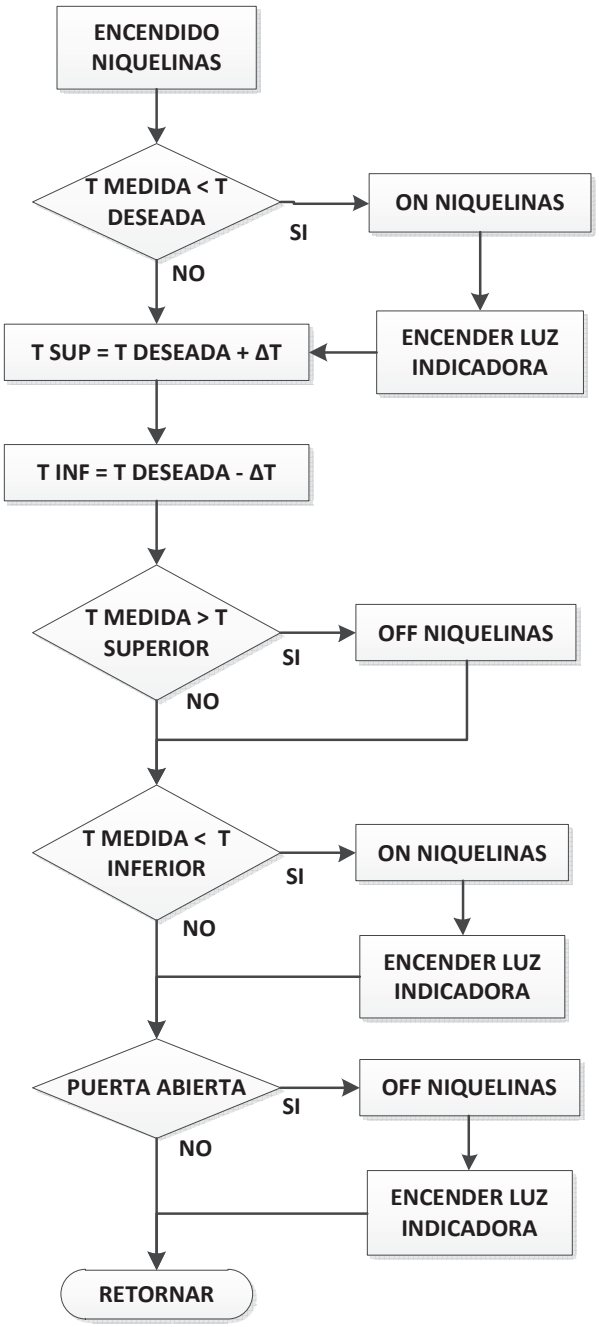


Figura 3.21. Diagrama de flujo del encendido de las niquelinas

Si la temperatura medida es mayor a la Temperatura Superior se apagan las niquelinas; por el contrario si es menor que la Temperatura Inferior se encienden las niquelinas; finalmente el programa verifica que no se abra la puerta del horno, si esta se abre las niquelinas se apagan y se enciende la luz indicadora, de lo contrario se retorna a la subrutina de la rampa.

3.4 PROGRAMACIÓN DEL HMI LOCAL

El control del PLC se realiza a través de la pantalla táctil (HMI local) o del computador (HMI remoto), las dos interfaces permiten controlar todas las funciones de los hornos en forma independiente; sin embargo si alguna de ellas está en ejecución restringe a la otra. La programación del HMI local se realiza con ayuda del software DOPSoft 1.01.08, este se usa para diseñar las pantallas que gobiernan la operación del PLC gracias a la comunicación a través del enlace Ethernet que utiliza la dirección IP: 192.168.0.3 para la pantalla Delta.

3.4.1 PANTALLA DE PRESENTACIÓN

Figura 3.22. Pantalla de presentación del HMI local

El HMI se inicia con una pantalla de presentación de similares características a la que se encontrará en el HMI remoto; en esta pantalla se muestran datos informativos del proyecto: título, autor, director y codirector; dentro de la pantalla se encuentran tres teclas de operación: la opción REINICIAR permite resetear el valor de todas las variables que intervienen en el proceso, es decir los datos de trabajo de los dos hornos; la tecla de MONITOREO hace que el programa salte directamente a la pantalla de visualización con el propósito de chequear la temperatura de los hornos antes de su trabajo o simplemente visualizar su valor en caso de que el equipo se haya configurado desde el HMI remoto y la opción CONTINUAR que permite iniciar el funcionamiento del PLC y avanzar a la siguiente pantalla para continuar con la configuración de los hornos.

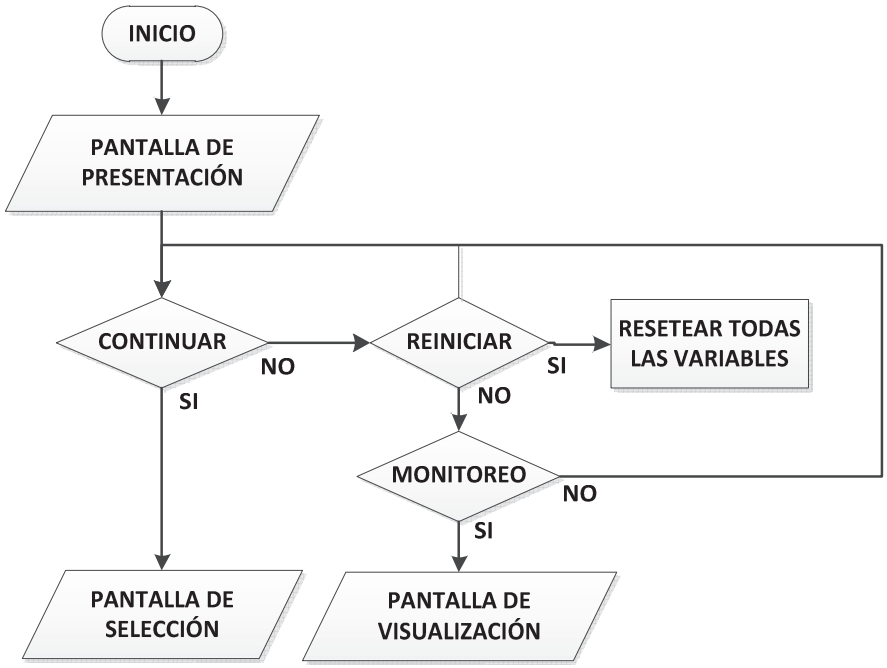


Figura 3.23: Diagrama de flujo de la pantalla de presentación del HMI local

3.4.2 PANTALLA DE SELECCIÓN

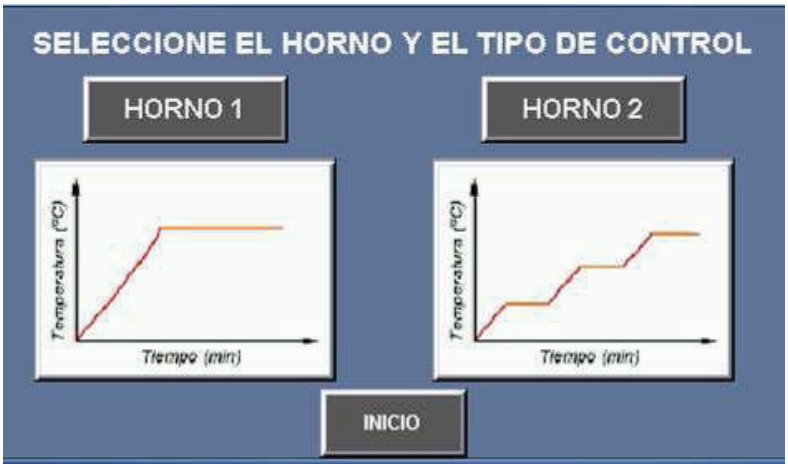


Figura 3.24. Pantalla de selección

La pantalla de selección permite regresar a la pantalla de presentación al pulsar la tecla INICIO, de lo contrario escoger el horno con el que se va a trabajar, es posible optar solo por uno de los hornos; sin embargo en otra sección del programa se puede retornar a la pantalla de selección para utilizar el horno restante. Tras seleccionar el horno para el tratamiento, se debe escoger el tipo de

proceso pulsando la gráfica que lo representa, las opciones son rampa o escalón; estas alternativas están presentes para cada horno y se puede escoger solo una a la vez; si alguna ha sido utilizada previamente la otra se bloquea. Una vez seleccionado el tipo de proceso se avanza a las pantallas rampa o escalón.

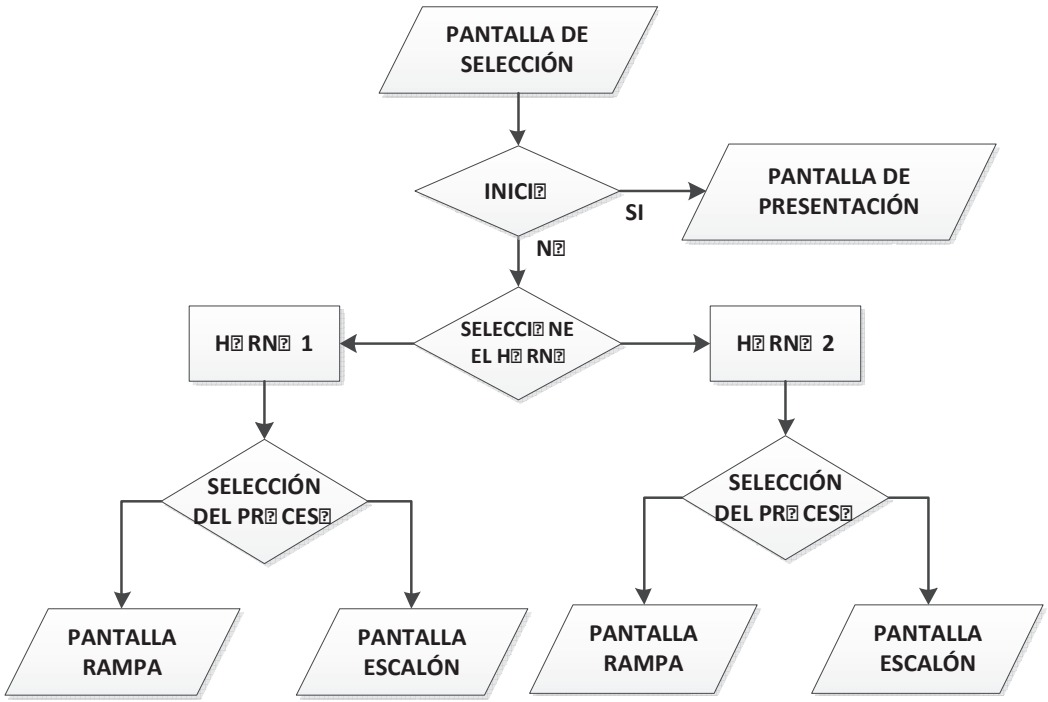


Figura 3.25. Diagrama de flujo de la pantalla de selección

3.4.3 PANTALLA RAMPA

Figura 3.26. Pantalla rampa

Existe una pantalla rampa independiente para cada horno, sin embargo dado que las dos pantallas son iguales, se explica el funcionamiento de una de ellas en general; en la pantalla rampa inicialmente se deben indicar los datos de: Pendiente (ºC/min), Temperatura Máxima (ºC) y tiempo de Permanencia (min); las variables se deben ingresar en forma secuencial, este hecho obliga a que el usuario no omita algún dato de forma involuntaria; los parámetros que se ingresan deben estar dentro de los rangos de trabajo admitidos, los mismos que difieren de cada horno y depende de su capacidad de trabajo.

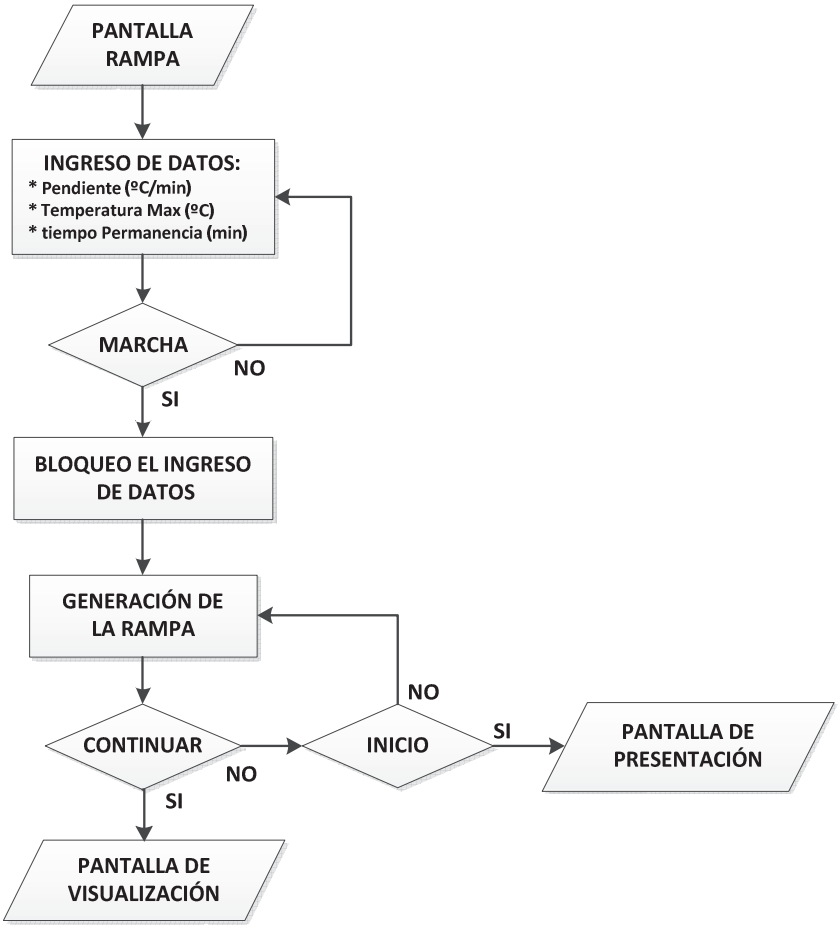


Figura 3.27. Diagrama de flujo de la pantalla rampa

Tras ingresar los datos del proceso, se habilita el botón MARCHA, cuando esta tecla se pulsa cambia de color rojo a color verde, indicando que el proceso ha iniciado y se empieza a generar la rampa de acuerdo a los datos configurados, a más de ello bloquea el ingreso de datos; es decir el proceso no podrá ser

modificado a menos que se apague el horno o se reinicie el equipo. Adicionalmente existe el botón CONTINUAR que permite ir a la pantalla de visualización para monitorear la temperatura o ver su variación en función del tiempo; se cuenta también con el botón INICIO que hace que el programa retorne a la pantalla de presentación previamente descrita.

3.4.4 PANTALLA RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN)

Figura 3.29. Pantalla escalón

La pantalla de rampas consecutivas, denominada escalón en el presente proyecto, tiene un funcionamiento similar al de la pantalla rampa, existe también una pantalla escalón por cada horno por lo que de igual forma su explicación se trata en forma general. Es importante señalar que el escalón está compuesto por tres gradas o secciones de trabajo y los datos de cada etapa son independientes, es así que el ingreso de los datos de: Pendiente (ºC/min), Temperatura Máxima (ºC) y tiempo de Permanencia (min) se debe ingresar para cada etapa del proceso en forma secuencial; es decir el usuario debe ingresar estos valores tres veces antes de que se active el botón MARCHA.

Al pulsar el botón MARCHA, su color cambia de rojo a verde con lo cual se reconoce que inicia la generación del escalón programado, enseguida se bloquea el ingreso de los datos hasta que el horno se apague o se reinicie por completo el prototipo. El botón CONTINUAR permite el salto a la pantalla de visualización

para monitorear el valor de la temperatura y su variación en función del tiempo y el botón INICIO hace que el programa retorne a la pantalla de presentación, es decir su funcionalidad es la misma que se describió en pantallas anteriores.

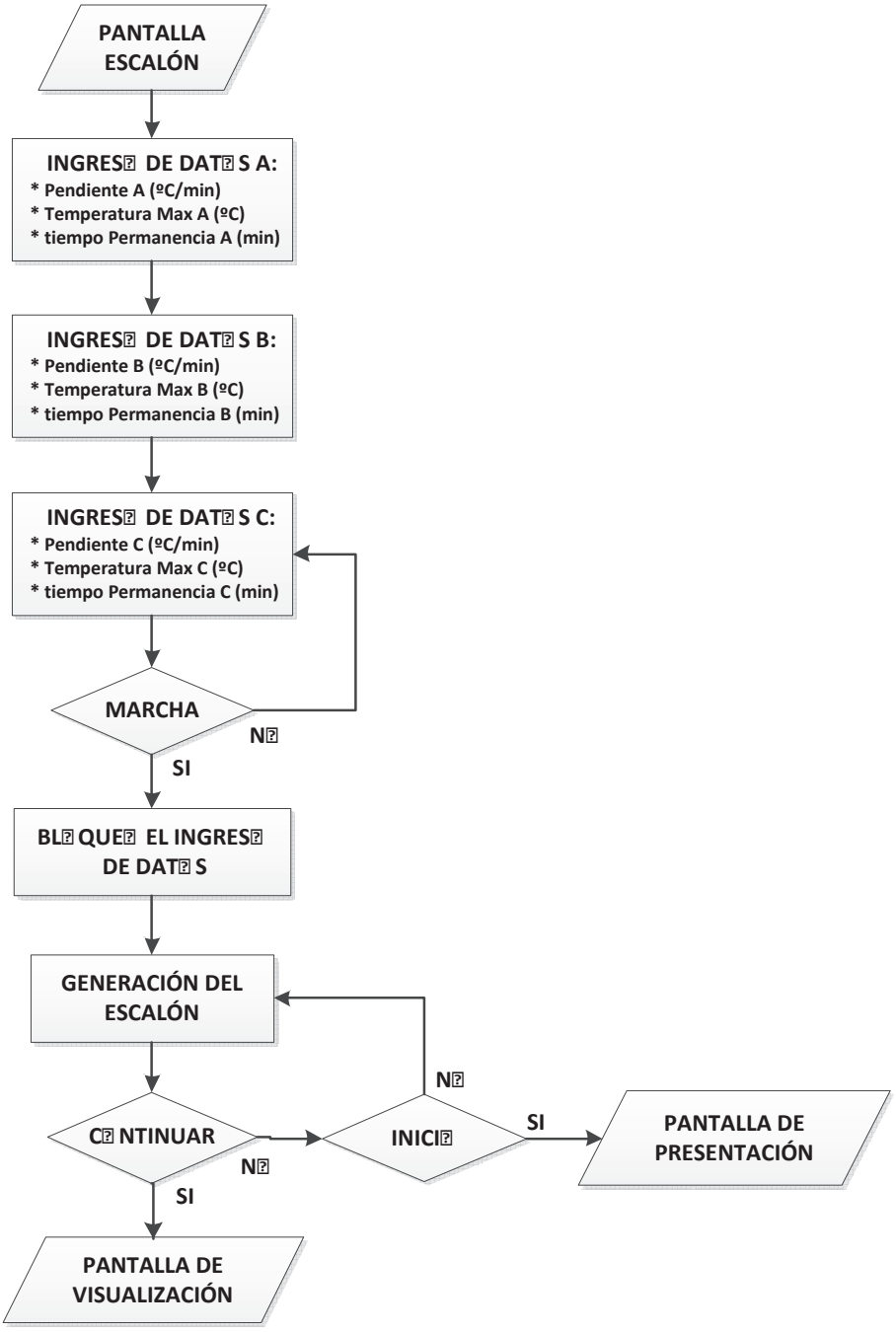


Figura 3.28. Diagrama de flujo de la pantalla escalón

3.4.5 PANTALLA DE VISUALIZACIÓN

Figura 3.30. Pantalla de visualización

La pantalla de visualización permite monitorear el estado de la temperatura de los dos hornos a la vez, para ello usa tres indicadores independientes por cada horno; el programa recibe los datos de temperatura desde el PLC y muestra su valor en: un indicador analógico tipo aguja, un display numérico digital y un slide analógico que cambia de color en función de la temperatura existente; cuando las niquelinas se encienden la palabra horno se torna de color rojo y el foco de la esquina superior izquierda de la gráfica analógica se enciende.

Para acceder a la gráfica del proceso, el usuario puede pulsar la tecla que lo lleva a esta pantalla; si no lo hace la subrutina verifica si se ha pulsado la tecla de apagado con lo cual se resetean las variables del horno y el programa va a la pantalla de selección; si el horno no es apagado, el programa monitorea si se escogió la opción INICIO en cuyo caso va a la pantalla de presentación, de lo contrario el programa continua recibiendo los datos del PLC de forma continua.

Para identificar el proceso de trabajo usado, en la esquina inferior izquierda para el horno 1 y derecha para el horno 2; se encuentran las palabras RAMPA o ESCALÓN en un recuadro que se torna de color rojo en función del proceso de trabajo utilizado en cada mufla.

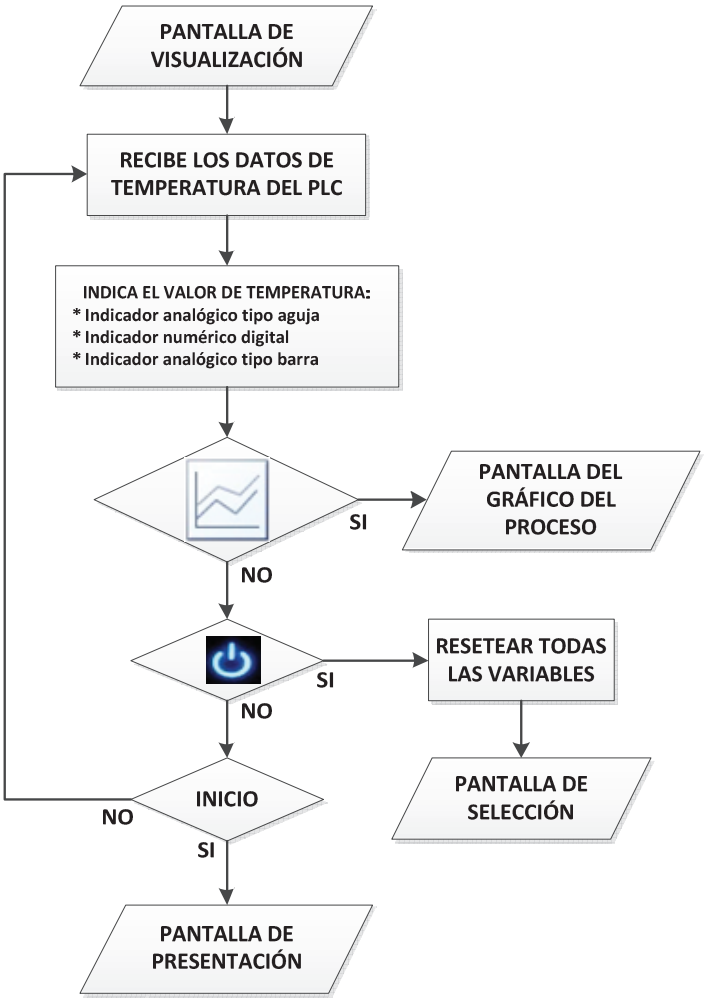


Figura 3.31. Diagrama de flujo de la pantalla de visualización

3.4.6 PANTALLA DEL GRÁFICO DEL PROCESO

Figura 3.32. Pantalla del gráfico del proceso

Adicional al monitoreo del valor actual de la temperatura en la pantalla de visualización, el HMI local permite observar la variación de la Temperatura en función del tiempo en la pantalla del gráfico del proceso; apenas se accede a esta pantalla se visualiza la gráfica, adicionalmente si las niquelinas están encendidas la palabra horno se torna de color rojo y el foco se enciende. Para regresar a la pantalla de visualización el usuario debe pulsar la tecla REGRESAR, de lo contrario el programa permanece en el gráfico de la temperatura.

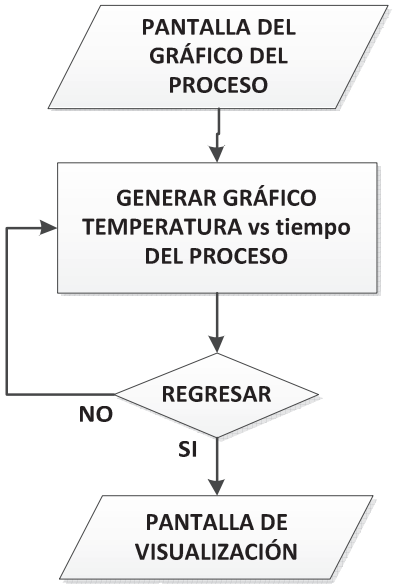


Figura 3.33. Diagrama de flujo de la pantalla del gráfico del proceso

3.5 PROGRAMACIÓN DEL HMI REMOTO

El HMI remoto constituye otra alternativa de control de la operación del equipo, funciona de forma independiente; sin embargo es importante resaltar que si el HMI local acciona al PLC, la interfaz remota servirá únicamente para monitoreo; hecho que garantiza que no se den órdenes contradictorias al controlador. La programación del HMI remoto se hace en LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), software que constituye una poderosa herramienta computacional para el diseño de HMIs usando lenguaje gráfico. [17]

3.5.1 PANTALLA DE PRESENTACIÓN

Figura 3.34. Pantalla de presentación del HMI remoto

Al inicializar la interfaz se abre la pantalla de presentación que es muy similar a la generada en el HMI local. En esta pantalla se muestra el título del proyecto, los datos del autor, director y codirector y tres teclas: la opción SALIR hace que se cierre LabVIEW, al pulsar RESET se formatean todos los datos cargados en las variables de los hornos y la tecla CONTINUAR permite inicializar el PLC a la vez que el programa salta a la pantalla principal donde se controla el proceso.

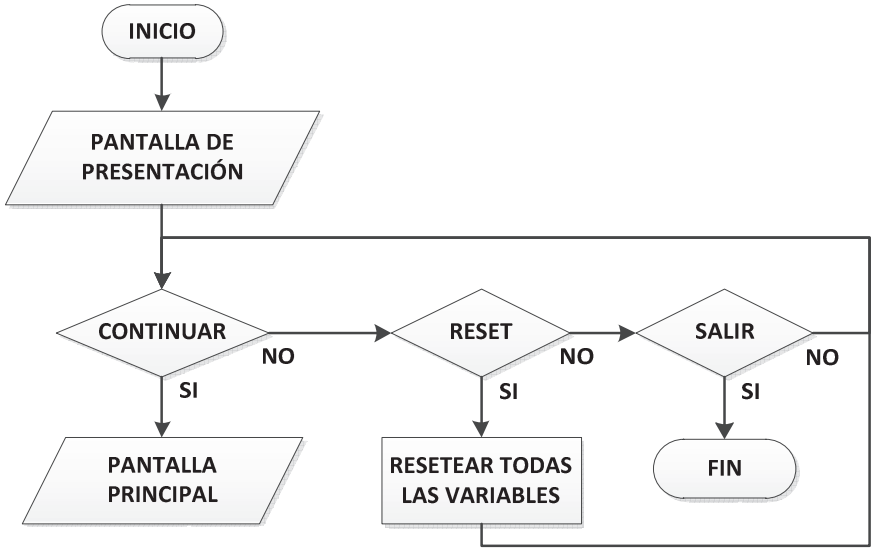


Figura 3.35. Diagrama de flujo de la pantalla de presentación del HMI remoto

3.5.2 PANTALLA PRINCIPAL

Tras pulsar la opción CONTINUAR, se ingresa a la pantalla principal del HMI, en esta se aprecia el tiempo de visualización para la gráfica de Temperatura vs Tiempo; este indicador está ubicado en el centro de la pantalla principal y permite indicar al usuario cada cuantos minutos se efectúa la visualización de datos.

Figura 3.36. Pantalla principal del HMI remoto

Para iniciar el trabajo del equipo se debe seleccionar el horno con el que se va a trabajar; es importante tener claro que los dos hornos pueden ser utilizados en cualquier momento. La selección se hace a través de los botones HORNO 1 y HORNO 2 ubicados al centro del lado izquierdo de la pantalla, cabe señalar que estos botones son multifunción y cambian su utilidad dependiendo de la fase en la que se encuentre el funcionamiento de cada horno; la instrucción que se debe ejecutar se anuncia a través de un cuadro de texto ubicado en la parte superior del recuadro que muestra la información de trabajo de los hornos; adicionalmente los procesos ya ejecutados se pueden apreciar a través de los checklist ubicados al lado izquierdo de la gráfica del proceso.

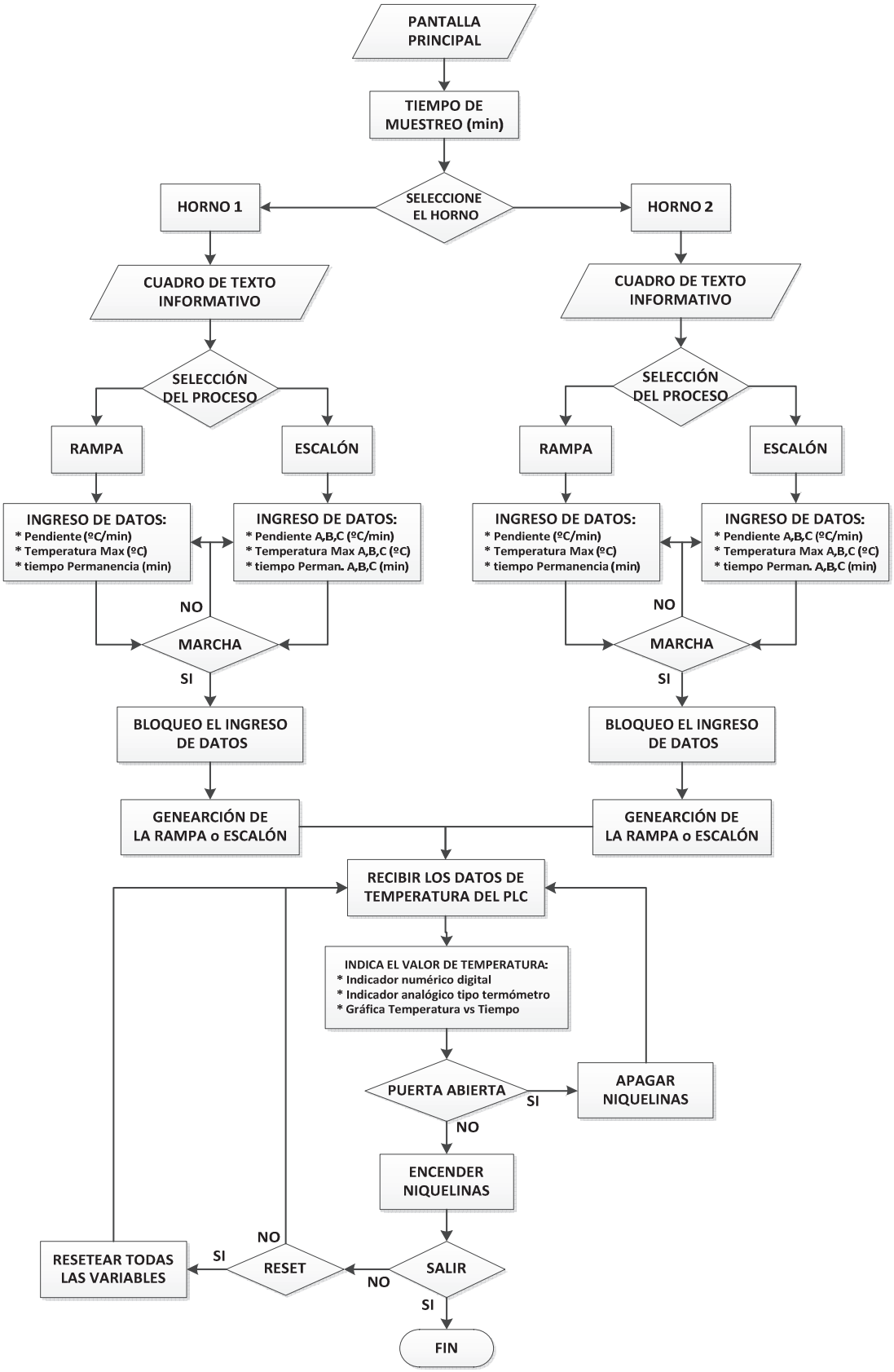


Figura 3.37. Diagrama de flujo del programa principal del HMI remoto

Tras seleccionar el horno se debe escoger el tipo de proceso que va a controlar su operación, este hecho se consigue utilizando las pestañas ubicadas a la izquierda del cuadro de diálogo; para que arranque el proceso definido con los datos correspondientes, es necesario pulsar el botón multiestado en su opción MARCHA, hecho que bloquea la modificación de datos y permite que se inicie el proceso seleccionado a la vez que se visualiza el valor de la temperatura.

El proceso regula la temperatura del horno a través del encendido de las niquelinas, de acuerdo a lo que le indica el PLC; sin embrago si la puerta se abre las niquelinas se apagan y en la pantalla se encienden los indicadores que detallan la presencia de esta condición, de lo contrario se verifica si el usuario pulsó la opción SALIR en cuyo caso se finaliza el programa y LabVIEW se cierra. Si esta opción no se presenta se chequea si el botón RESET es pulsado, hecho que hace que se enceren todas las variables del proceso y el programa se reinicie; si no se ha escogido ninguna alternativa el horno continúa su funcionamiento normal mientras el proceso seleccionado no concluya.

Adicional a lo indicado el programa puede guardar los datos de la variación de la temperatura en función del tiempo en Excel, para ello es necesario hacer un clic derecho sobre la gráfica del proceso y seleccionar la opción “Exportar los datos”.

Una vez diseñado, construido, configurado y programado el prototipo del equipo, es necesario verificar su operación de acuerdo a lo deseado y en caso de ser necesario ajustar algunos detalles en el hardware o la programación, de modo que el sistema funcione en excelentes condiciones; este hecho se analiza y describe en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4
PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO

En los capítulos previos se ha descrito el diseño y construcción del hardware del equipo, y adicionalmente se explicó el desarrollo del software que sustenta su funcionamiento; es importante verificar que estas tareas se hayan desarrollado adecuadamente a fin de permitir el correcto funcionamiento de los hornos. En tal sentido en el presente capítulo se pone a prueba al equipo tanto en vacío como sometido a la carga habitual que se utiliza para las prácticas de laboratorio que se efectúan en los hornos; hecho que permite depurar detalles de diseño para poder mejorar el trabajo de las muflas.

4.1 PRUEBAS EN VACÍO

Las pruebas en vacío permiten conocer la capacidad máxima de trabajo de los hornos, por este motivo se prueban las muflas sin componentes en su interior a fin de determinar su pendiente máxima de operación y verificar su comportamiento en los procesos rampa y escalón.

4.1.1 MÁXIMA PENDIENTE DE CALENTAMIENTO

La velocidad de calentamiento de los hornos depende esencialmente de la capacidad de trabajo de sus tres niquelinas conectadas en paralelo; la corriente y potencia de operación se obtienen cuando estas son alimentadas con el voltaje de la red que es de 222,3VAC.

La resistencia total medida en las muflas es de 10,3Ω para el horno 1 y 10,1 Ω para el horno 2.

La corriente calculada sería:

$$I_T = \frac{V_L}{R_T} \tag{4.1}$$

$$I_T = \frac{222,3}{10,3} = 21,58A \quad \text{(Horno 1)}$$

$$I_T = \frac{222,3}{10,1} = 22,01A \quad \text{(Horno 2)}$$

Dónde: I_T Corriente circulante (A)

V_L Voltaje de línea bifásico (V)

R_T Resistencia total de las niquelinas en paralelo (Ω)

La corriente medida es 21,3A para el horno 1 y 21,5A para el horno 2; con lo cual se tiene un error de 1,29% y 2,32% respectivamente. Para calcular la potencia de operación de los hornos, se utilizan los valores medidos.

$$P_T = V_L \times I_T \tag{4.2}$$

$$P_T = 211 \times 21,3 = 4494,3W \quad \text{(Horno 1)}$$

$$P_T = 211 \times 21,5 = 4536,5W \quad \text{(Horno 2)}$$

Dónde: P_T Potencia de trabajo (W)

V_L Voltaje de línea bifásico (V)

I_T Corriente circulante (A)

Una vez obtenidos los datos de operación de los hornos, es necesario medir la variación de la temperatura en función del tiempo y de este modo definir la pendiente máxima de operación de las muflas y su capacidad de calentamiento. El tiempo que se toma como base para las pruebas es 60 minutos, que es el valor aproximado del uso del equipo en las prácticas de laboratorio; los datos obtenidos de detallan en el Anexo A (Tabla A.1).

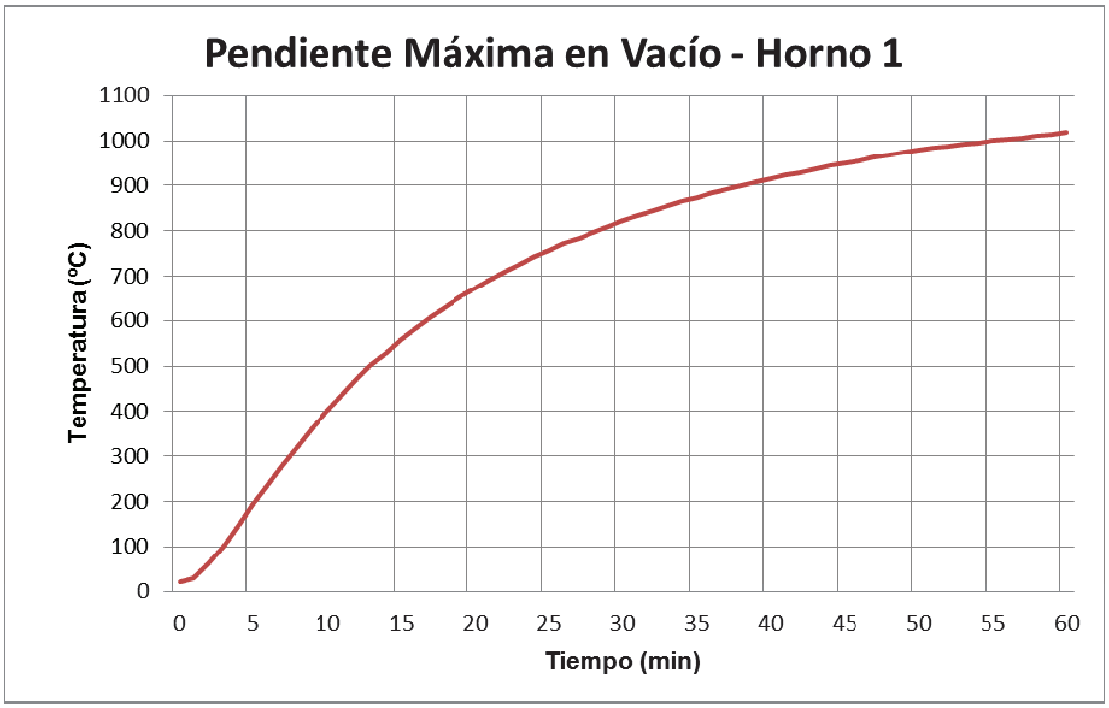


Figura 4.1. Pendiente máxima en vacío del horno 1

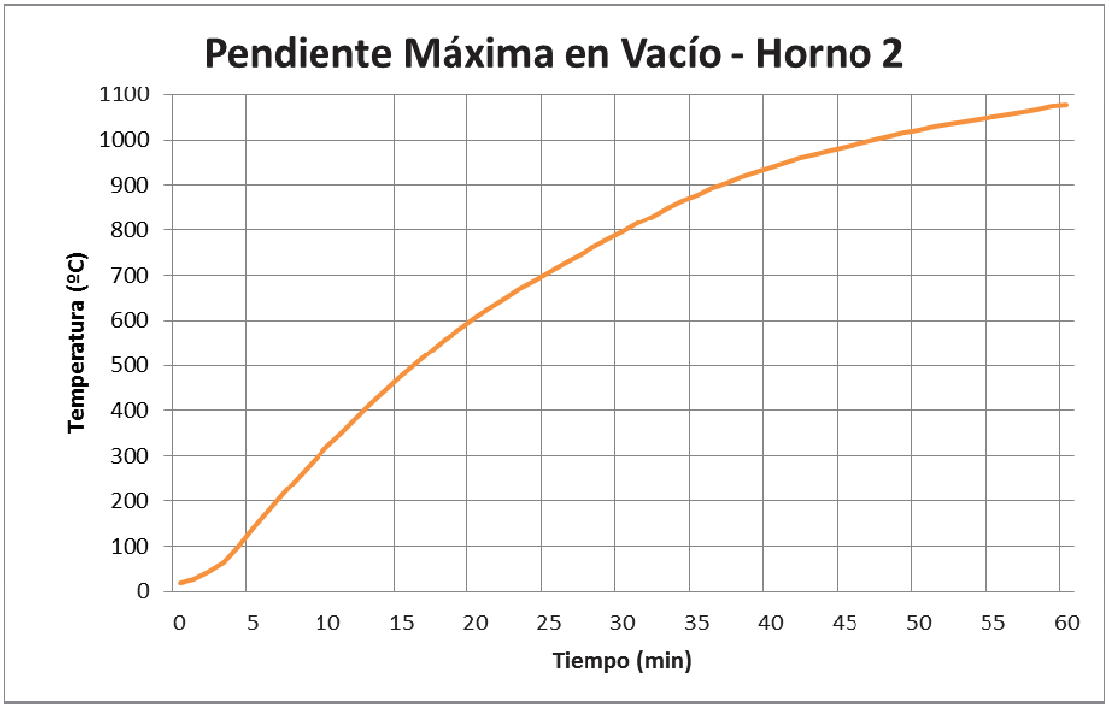


Figura 4.2. Pendiente máxima en vacío del horno 2

El resumen de datos obtenidos y las gráficas mostradas permiten reflejar que el comportamiento de los dos hornos es similar, al igual que su capacidad de

calentamiento que varía ligeramente, ya que el horno 2 alcanza mayor temperatura de operación debido a que su estructura interna se renovó durante el desarrollo del proyecto. Se puede apreciar también que la pendiente de calentamiento de las muflas es variable; cuando se inicia la operación del equipo y los hornos tienen baja temperatura en su interior, se tiene grandes velocidades de calentamiento; sin embargo cuando estos se calientan y alcanzan altas temperaturas, la pendiente se reduce considerablemente.

En el horno 1, la velocidad de calentamiento promedio es 38,0 ºC/min por debajo de 450ºC; a partir de este valor la pendiente decae a 25,5 ºC/min hasta alcanzar los 700ºC; en esta condición por acción de la alta temperatura interior, el calentamiento se vuelve más lento y se reduce a 14,6 ºC/min hasta que la temperatura se aproxima a los 850ºC; por sobre este valor la pendiente disminuye a 6,5 ºC/min ya que el horno ha alcanzado una alta temperatura en su interior.

Para el horno 2 se tiene una velocidad de calentamiento de 30,6 ºC/min a temperaturas por debajo de 450ºC, posteriormente la pendiente se reduce a 24,8 ºC/min hasta alcanzar los 700ºC; en esta condición la velocidad baja a 17,3 ºC/min hasta que la temperatura se aproxima a los 900ºC; por sobre este valor la pendiente de calentamiento es de 8,0 ºC/min.

El comportamiento de los hornos indica que la operación más adecuada se conseguirá cuando el equipo funcione con rampas consecutivas (escalón), proceso que se caracteriza por permitir el uso de diferentes pendientes de trabajo; por otro lado se puede apreciar que la velocidad de calentamiento promedio del horno 1 en el rango de operación regular en el que se usará el equipo que está por debajo de los 950ºC, es de 23,5 ºC/min; mientras que la pendiente promedio del horno 2 dentro del mismo rango de temperatura es de 23,1 ºC/min; estos datos son importantes ya que sirven como referencia para configurar la operación del equipo en modo rampa.

Una vez definida la máxima pendiente de calentamiento de los hornos y su valor promedio, es necesario verificar la correcta operación para los dos procesos de

trabajo que son rampa y rampas consecutivas (escalón). Los valores obtenidos se comparan con los valores teóricos de modo que se pueda obtener el error para cada medición, este hecho también se analiza en base a la gráfica teórica y gráfica real que se obtienen en cada proceso.

4.1.2 OPERACIÓN EN RAMPA

Para el trabajo en modo rampa, se utiliza una pendiente de trabajo por debajo del valor promedio obtenido para cada horno; es así que se utiliza una pendiente de 20ºC/min para los dos hornos; de este modo se garantiza que a temperaturas bajas se ejerce un correcto control de la velocidad de calentamiento, mientras que a altas temperaturas la pendiente no se vea muy reducida. Los valores teóricos y medidos de la temperatura de los hornos que trabajan en modo rampa, se muestran en el Anexo A (Tabla A.2).

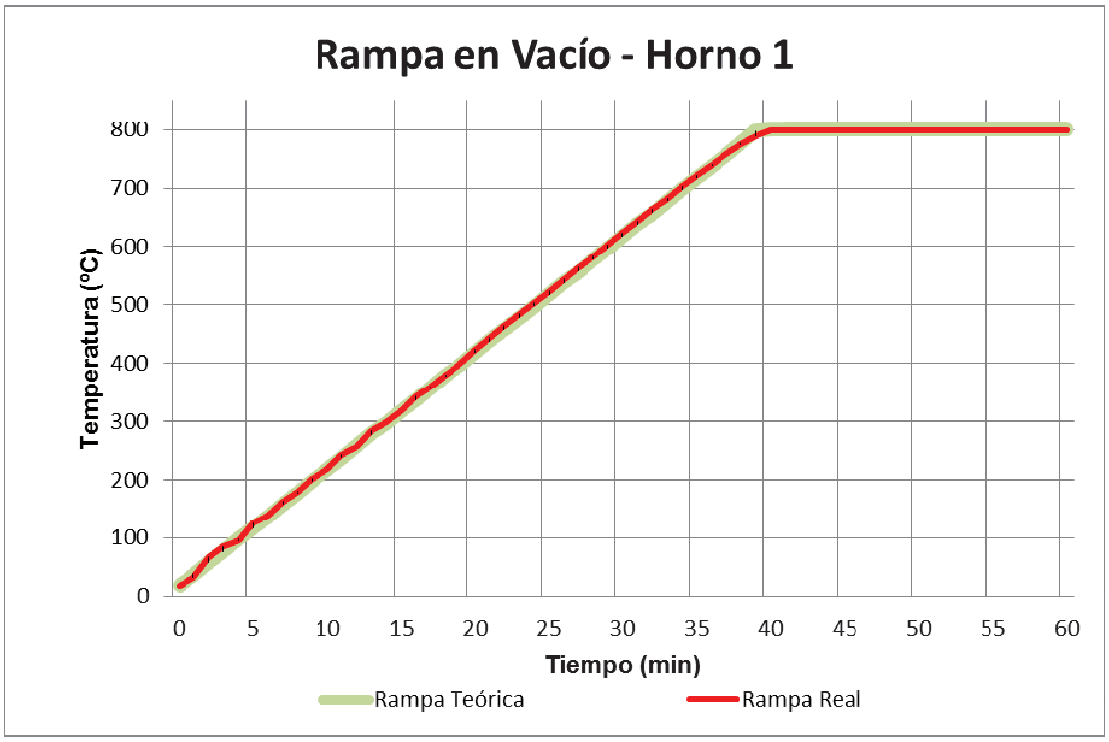


Figura 4.3. Rampa en vacío del horno 1

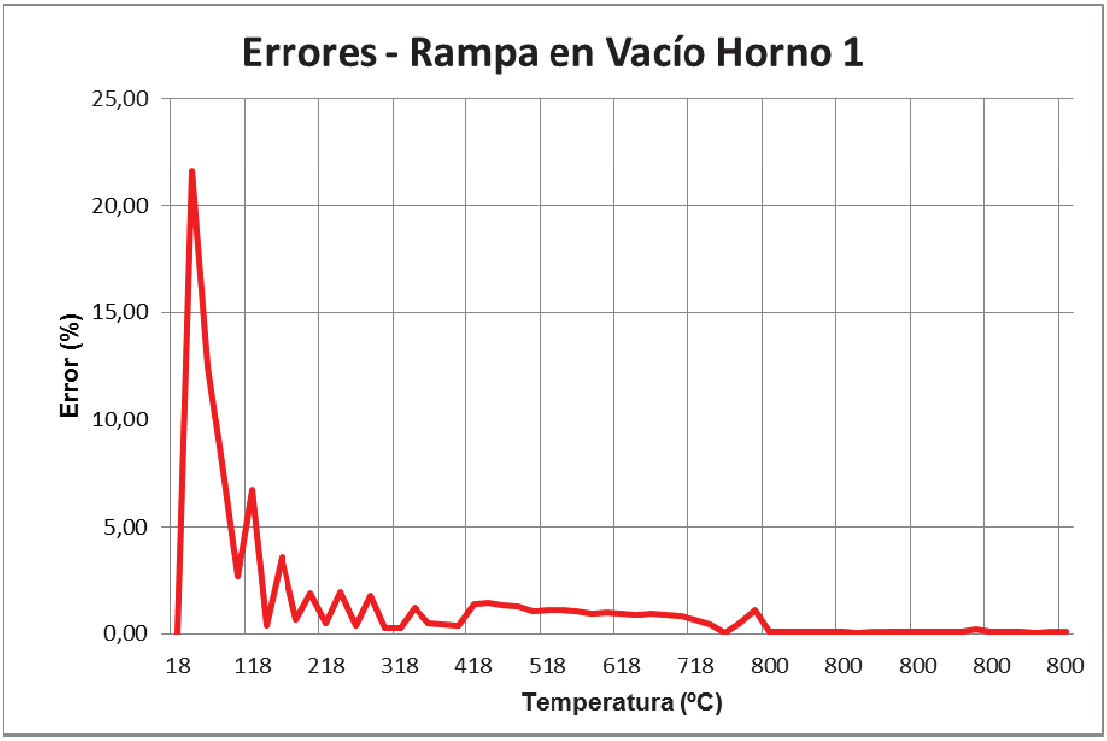


Figura 4.4. Errores - Rampa en vacío del horno 1

El muestreo de datos y las gráficas mostradas permite apreciar que para el horno 1, a temperaturas por debajo de 150ºC existe una desviación de la curva obtenida con respecto a la teórica, hecho que se refleja al verificar que los errores resultantes son mayores debido a que los hornos inician su proceso de calentamiento; sin embargo a temperaturas mayores al valor señalado, el error se reduce notablemente y la curva real se aproxima mejor a la teórica, tal como lo muestra la considerable reducción de errores obtenidos; esto se debe a que el horno en su interior ha alcanzado una temperatura homogénea y el proceso de calentamiento es más uniforme; finalmente se puede apreciar que el momento que el horno alcanza su temperatura máxima prácticamente no es apreciable la desviación entre la curva medida y la teórica como lo indica el casi imperceptible error existente en esta etapa del proceso.

El máximo error encontrado es de 21,62% obtenido a una temperatura de 31,08ºC, mientras que el error mínimo es de 0,03% a una temperatura de 758,0ºC; el error promedio de este proceso es 1,43%.

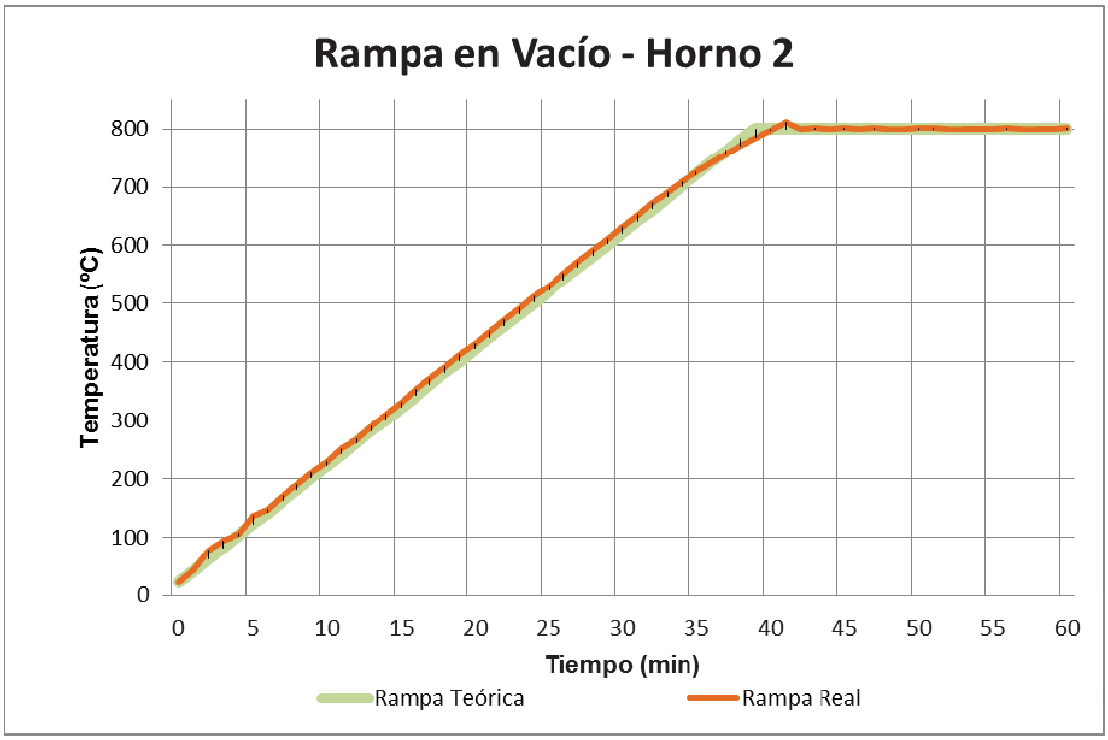


Figura 4.5. Rampa en vacío del horno 2

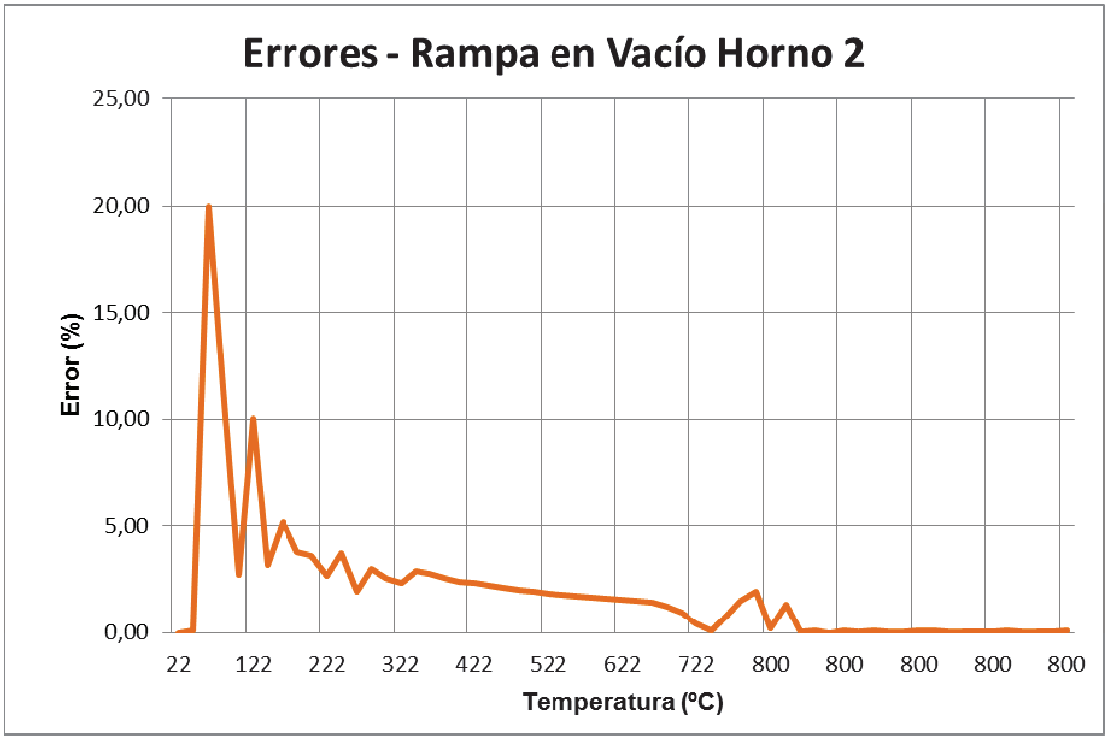


Figura 4.6. Errores - Rampa en vacío del horno 2

En el horno 2 se aprecia un comportamiento similar al del horno 1, caracterizado por errores grandes a temperaturas por debajo de 150ºC, los mismos que se van reduciendo conforme el horno se calienta y su temperatura interior se hace homogénea; al revisar los errores de este horno se puede apreciar un aumento con respecto al horno 1, teniendo un error máximo de 20,01% a 77,83ºC y un error mínimo de 0,05% obtenido a los 800,4ºC; el error promedio es de 2,0%.

4.1.3 OPERACIÓN EN RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN)

Para verificar la correcta operación del equipo operando con múltiples rampas (escalón), se definen las tres etapas de trabajo con distintos valores de operación; para el horno 1, se especifica una pendiente de 30ºC/min y una temperatura de 400ºC en la primera etapa; 25ºC/min y 700ºC en la segunda etapa y finalmente 15ºC/min y 850ºC para la tercera etapa; el tiempo de permanencia de cada etapa es de 10 minutos. Los valores teóricos y medidos de la temperatura de los hornos configurados en modo escalón, se detalla en el Anexo A (Tabla A.3).

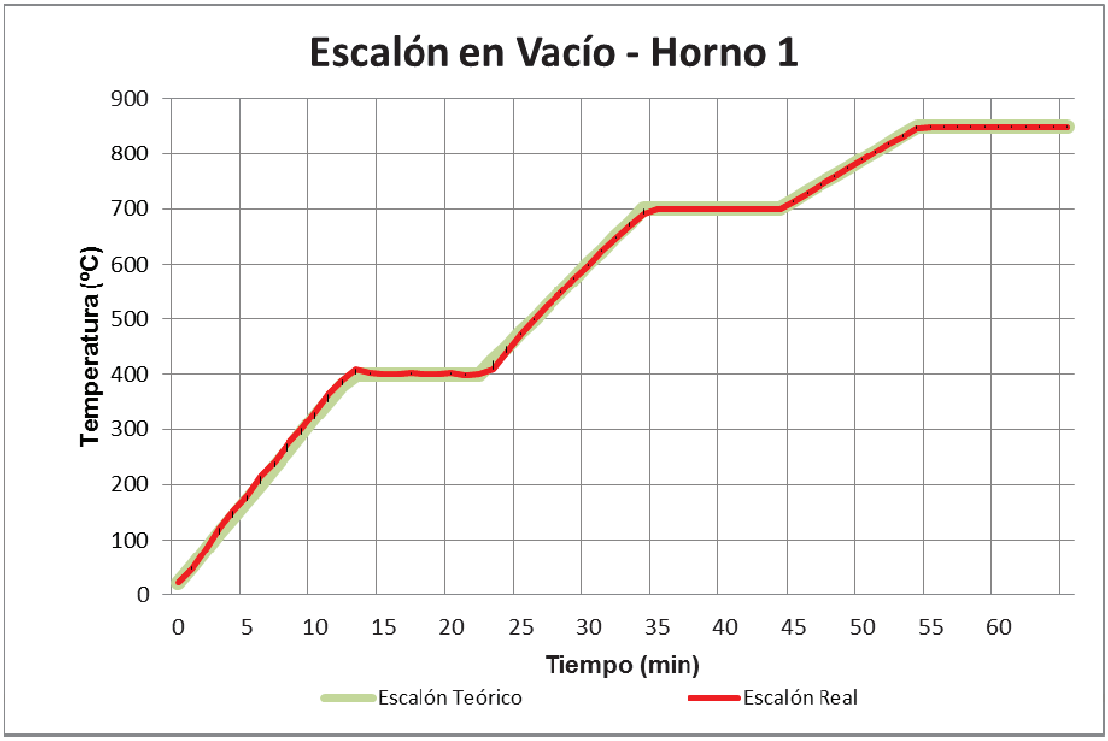


Figura 4.7. Escalón en vacío del horno 1

Figura 4.8. Errores – Escalón en vacío del horno 1

Al analizar los datos del horno 1 se aprecia que la curva medida en el modo de trabajo de rampas consecutivas (escalón) se ajusta de mejor manera al valor teórico, debido a que el usuario puede ajustar el trabajo del equipo a sus características máximas de operación; este hecho se refleja también al verificar que los errores en este proceso son menores a los obtenidos en el modo rampa, teniendo un error máximo de 9,4% a 46,58ºC y un error mínimo de 0,05% a 849,51C; en tal sentido el proceso de trabajo más adecuado para el equipo es en esta configuración que presenta un error promedio de 1,21%.

Para el caso del horno 2, se utilizan los mismos valores de pendiente y temperatura máxima de trabajo para cada escalón; exceptuando en la segunda etapa donde se utiliza una pendiente de 20ºC/min; los tiempo de permanencia usado para cada etapa es de 10 minutos.

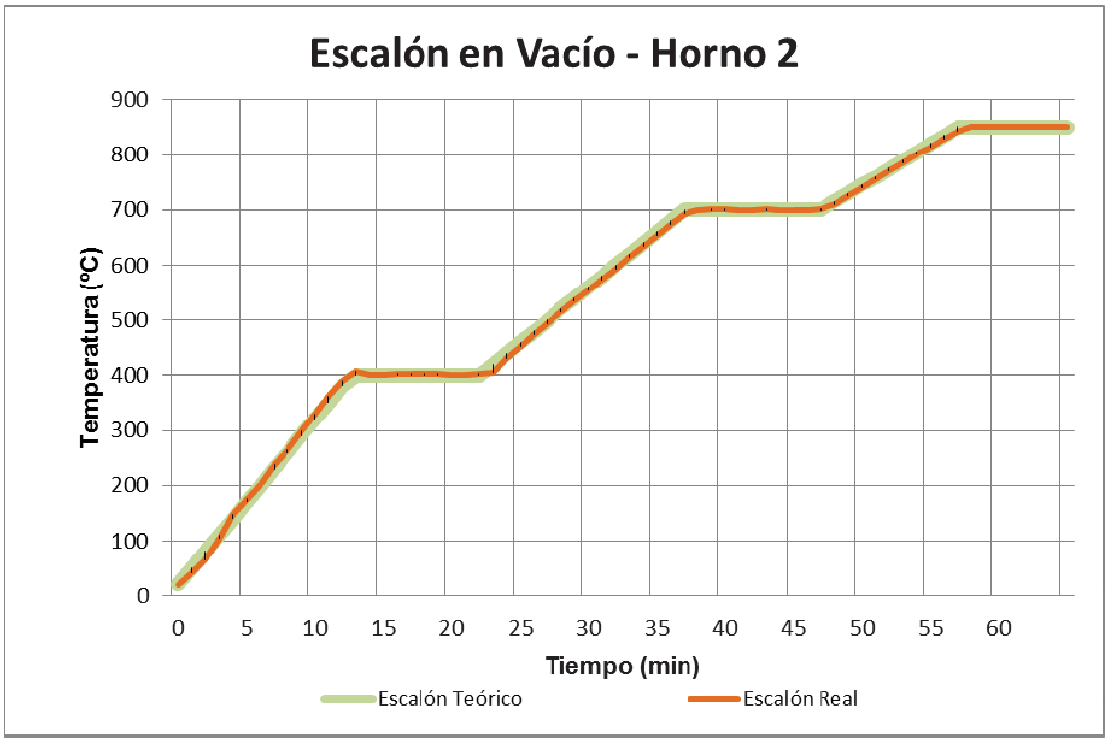


Figura 4.9. Escalón en vacío del horno 2

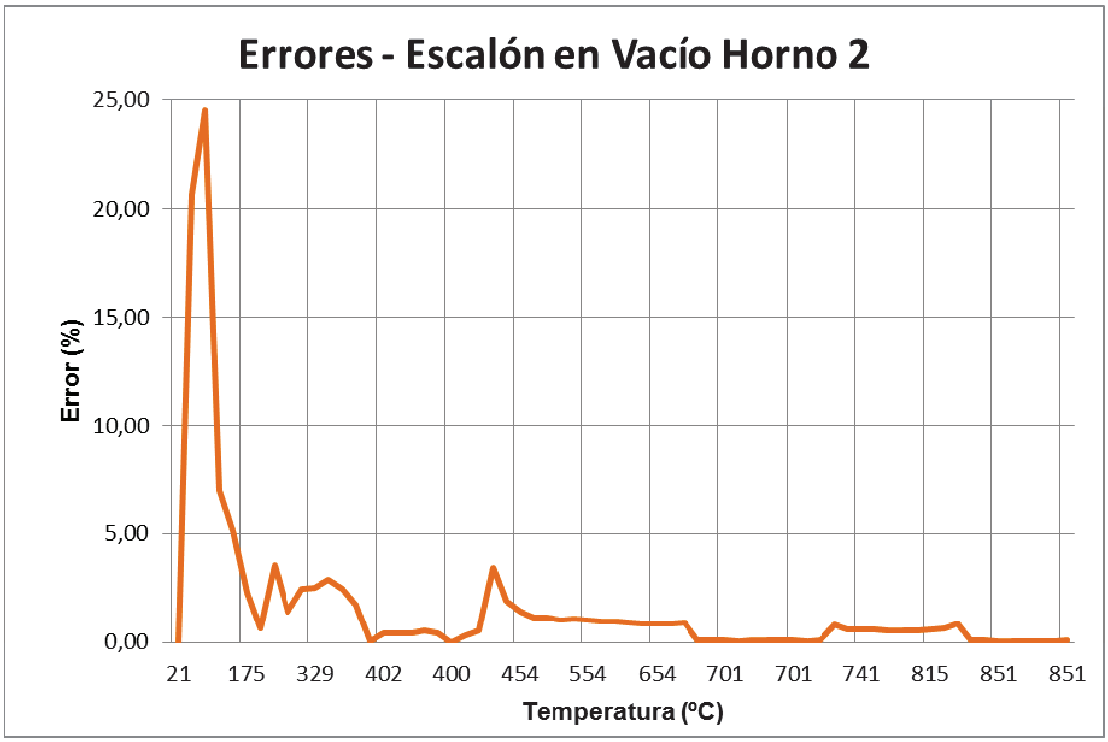


Figura 4.10. Errores – Escalón en vacío del horno 2

El análisis de los datos y gráficas del horno 2 muestran que los hornos al trabajar en las mismas condiciones de operación, ocasionan que los resultados obtenidos sean muy semejantes; el máximo error obtenido en este caso es de 24,5% a 64,66ºC, mientras que el error mínimo es de 0,03% a 399,9ºC el error promedio se reduce comparándolo con el modo rampa y su valor es de 1,64%.

4.2 PRUEBAS CON CARGA

Los componentes que se tratan térmicamente en las prácticas de laboratorio que se efectúan en los hornos difieren de acuerdo a las prácticas descritas en el capítulo 2, pero principalmente son probetas de acero normalizado que se introducen en las muflas en una caja llena de limallas que las cubren; el uso de estos componentes ocasiona que la capacidad de calentamiento de los hornos se reduzca al requerir mayor temperatura para calentar a las probetas y los componentes usados. En tal sentido es necesario volver a verificar todas las pruebas que se efectuaron en vacío con la carga que se utiliza en las prácticas de laboratorio en las que se usará el equipo.

4.2.1 MÁXIMA PENDIENTE DE CALENTAMIENTO

Es conocido que al utilizar los hornos con carga, su capacidad de calentamiento se reduce; en el Anexo B (tabla B.1) se resumen los datos que permiten determinar la máxima pendiente de calentamiento de los hornos con carga.

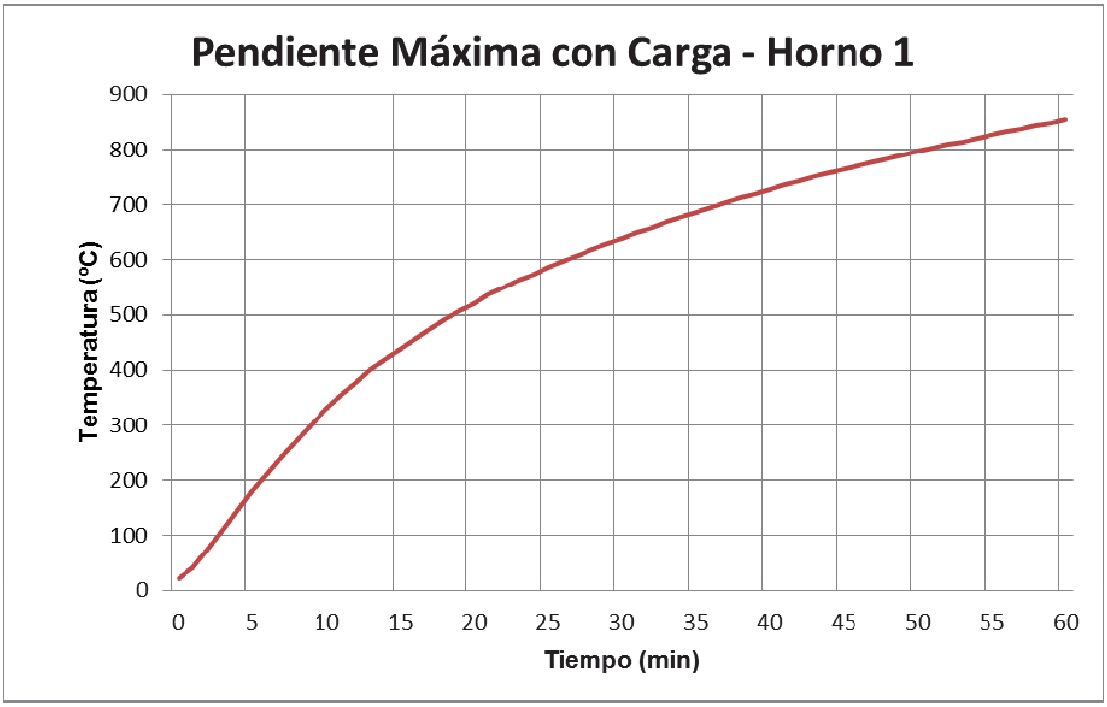


Figura 4.11. Pendiente máxima con carga del horno 1

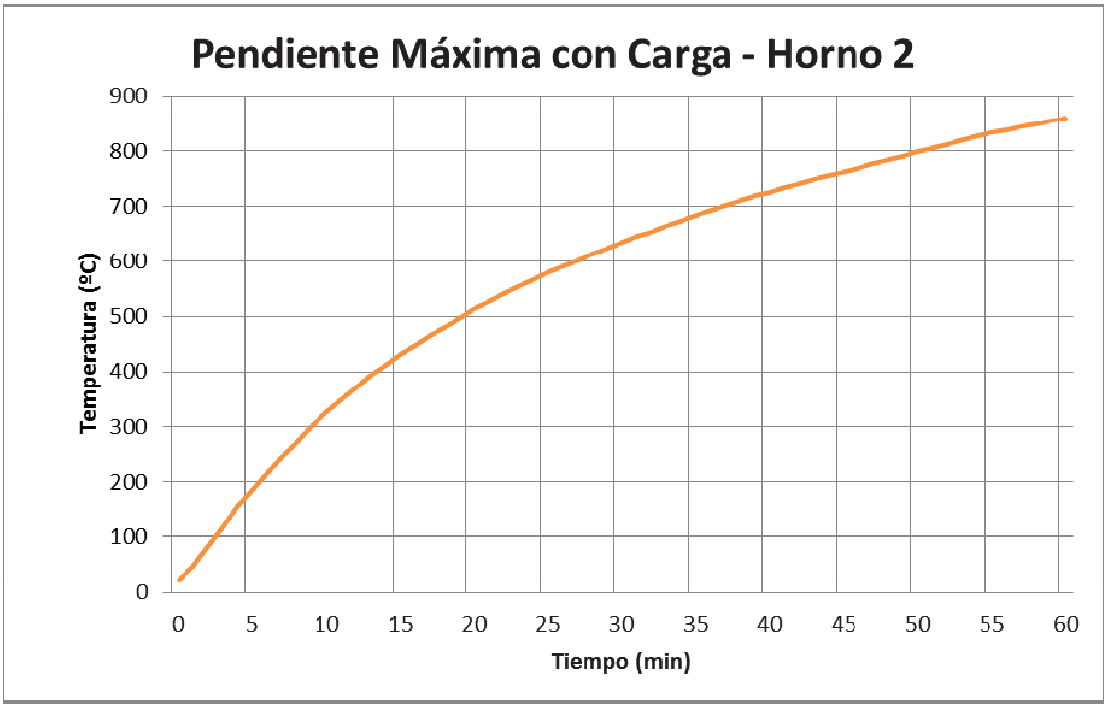


Figura 4.12. Pendiente máxima con carga del horno 2

Se puede apreciar que el comportamiento de los hornos no cambia con presencia de carga pero si su capacidad de calentamiento que se reduce considerablemente debido a que al interior del horno existen componentes que deben ser calentados durante la ejecución de los procesos de trabajo.

Para el caso del horno 1 a temperaturas por debajo de 400ºC, la velocidad de calentamiento es de 29,2 ºC/min; posteriormente su valor decae a 15,2 ºC/min hasta llegar a 600ºC; finalmente la pendiente se reduce a 9,0 ºC/min mientras se aproxima a los 750ºC; por sobre este valor la velocidad de calentamiento disminuye a 6,2 ºC/min. La temperatura del horno llegó a 854,2ºC, con lo cual se evidencia que sin variar el tiempo de operación de la prueba la temperatura alcanzada con la carga se reduce en un 16,1%.

En el horno 2 la velocidad de calentamiento es de 28,5 ºC/min a temperaturas menores a 400ºC, luego la pendiente se reduce a 15,4 ºC/min hasta llegar a los 600ºC; tras esta temperatura la velocidad baja a 9,2 ºC/min hasta que la temperatura se aproxima a los 750ºC; por sobre este valor la pendiente de calentamiento es de 6,5 ºC/min y la temperatura máxima alcanzada es de 859,3ºC con una reducción del 20,3% de la temperatura alcanzada en vacío.

La pendiente de calentamiento promedio del horno 1 es de 13,9 ºC/min; mientras que en el horno 2 es de 14,0 ºC/min.

4.2.2 OPERACIÓN EN RAMPA

Para el trabajo en modo rampa con carga se mantienen las mismas consideraciones que en vacío, se utiliza una pendiente de 12ºC/min para los dos hornos. El Anexo B (tabla B.2) resume los datos obtenidos.

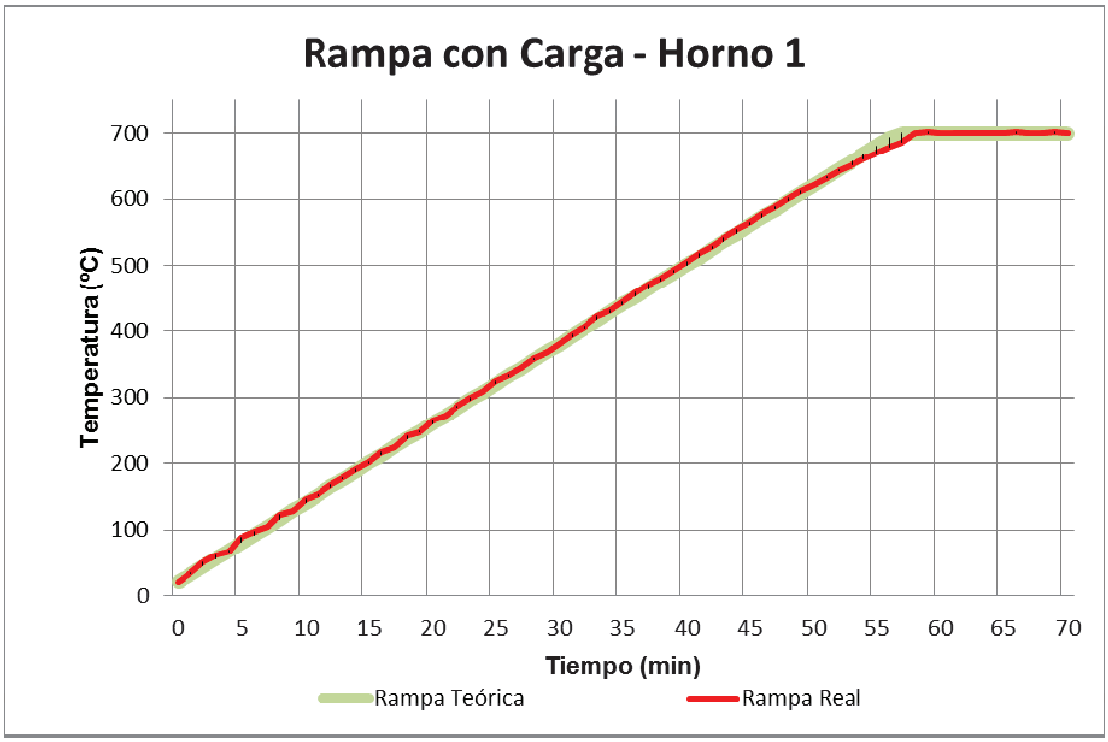


Figura 4.13. Rampa con carga del horno 1

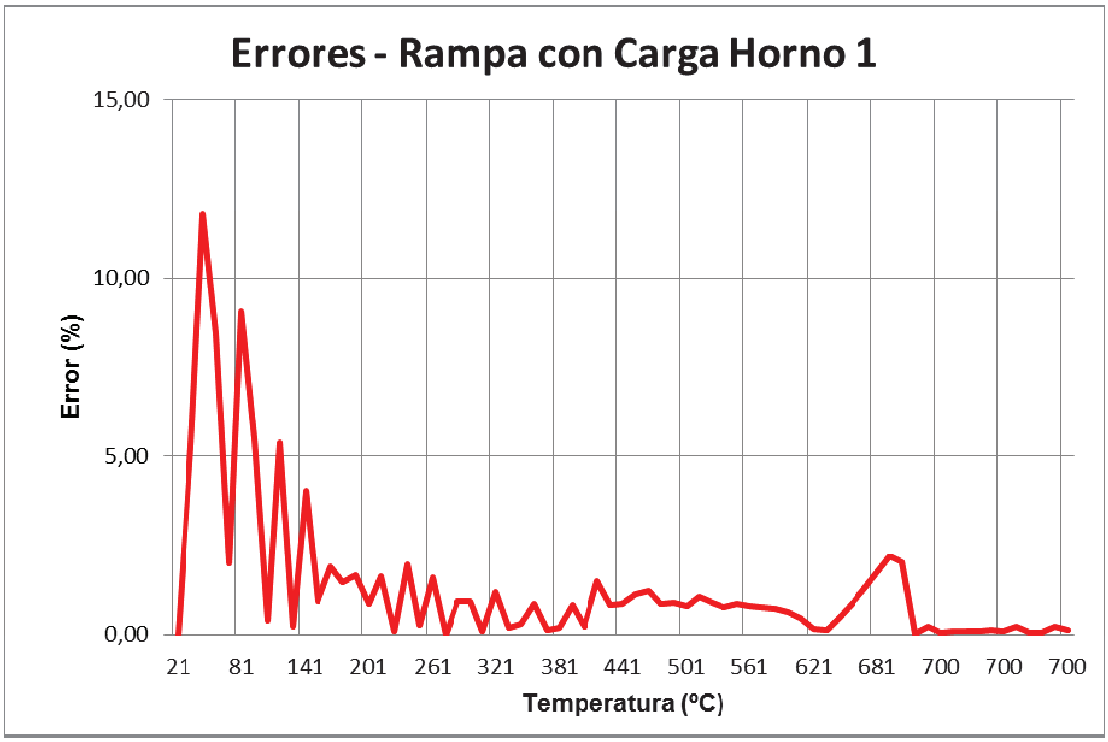


Figura 4.14. Errores - Rampa con carga del horno 1

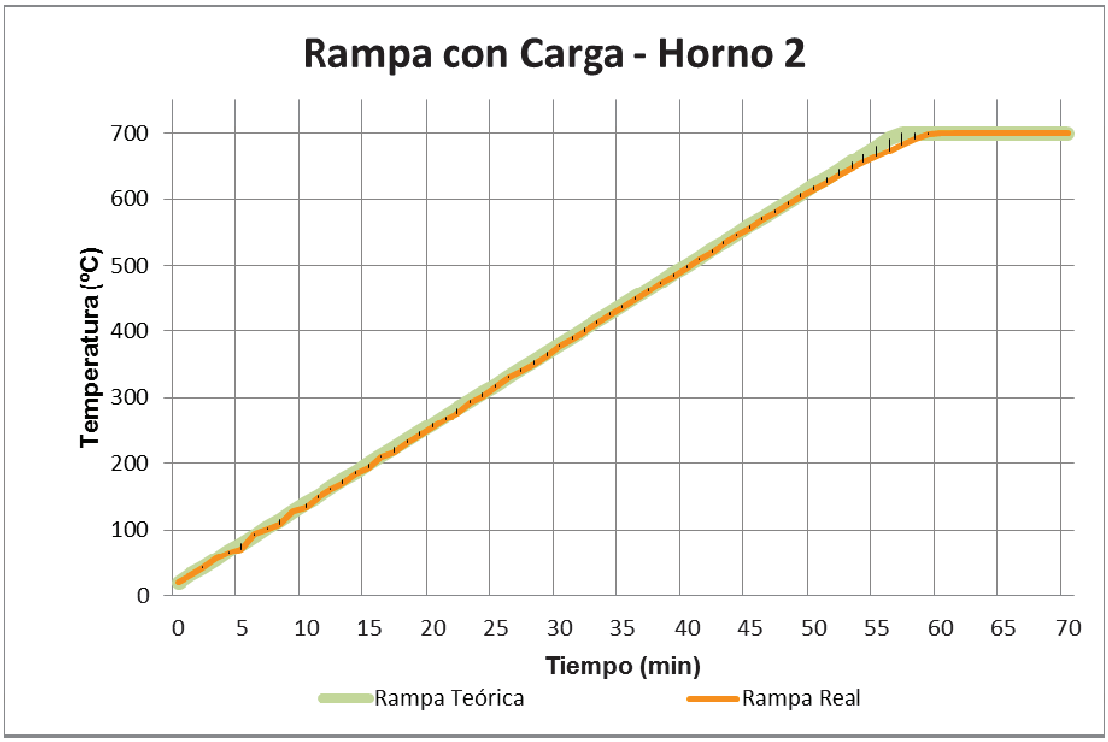


Figura 4.15. Rampa con carga del horno 2

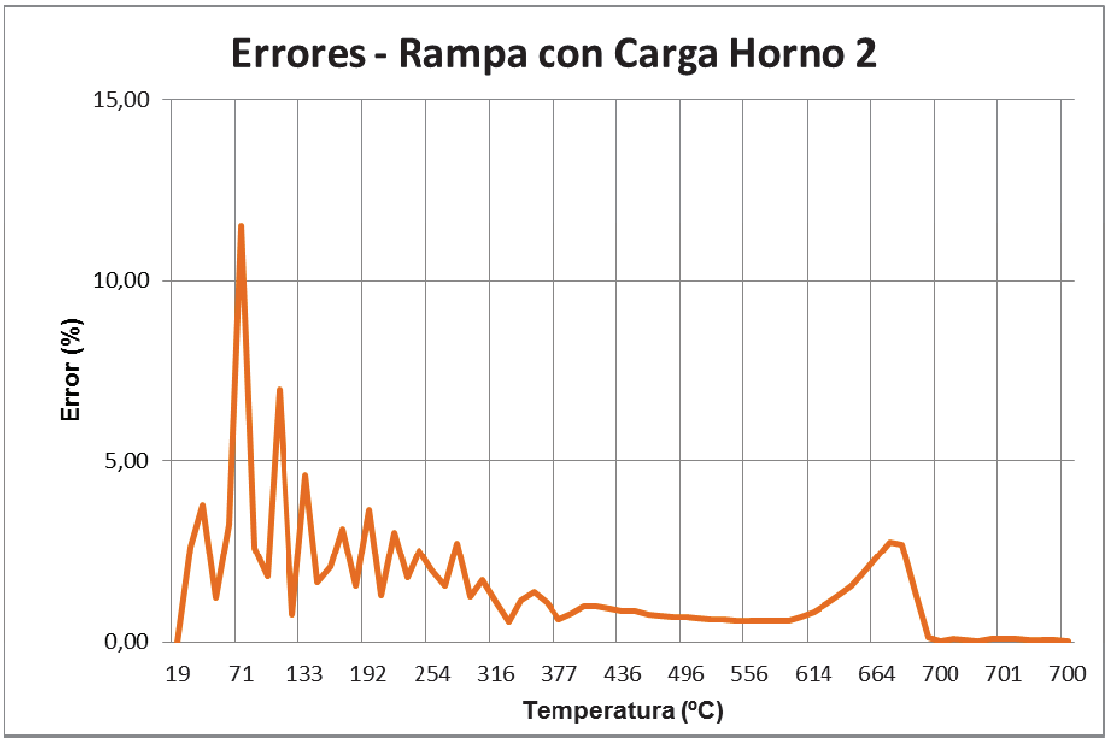


Figura 4.16. Errores - Rampa con carga del horno 2

La tendencia de los datos obtenidos en la rampa con carga es similar al estudio en vacío, los errores más grandes se obtienen a bajas temperaturas, mientras que su valor se reduce conforme incrementa la temperatura; adicionalmente se puede apreciar que los errores del trabajo con carga son menores que los errores en vacío. Teniendo que para el horno 1 el máximo error es de 11,79% a 50,45ºC, el error mínimo es de 0,03% a 699,8ºC; mientras que el error promedio es de 1,36%.

Para el horno 2 el error máximo es de 11,50% a 71,24ºC, el error mínimo es de 0,03% a 700,2%; mientras que el error promedio es de 1,50%.

4.2.3 OPERACIÓN EN RAMPAS CONSECUTIVAS (ESCALÓN)

La operación con carga de los hornos en el modo de rampas consecutivas (escalón) se realiza mediante la configuración de las tres etapas del proceso, manteniendo similares condiciones que el proceso en vacío.

Para los dos hornos se configura una pendiente de 24ºC/min y una temperatura de 450ºC en la primera etapa; la segunda etapa tiene como datos una pendiente de 12ºC/min y 650ºC y finalmente en la tercera etapa se usan los valores de 8ºC/min y 750ºC; el tiempo de permanencia de cada etapa es de 8 minutos.

Los valores teóricos y medidos de la temperatura de los hornos con carga configurados en modo escalón se detallan en el Anexo B (tabla B.3).

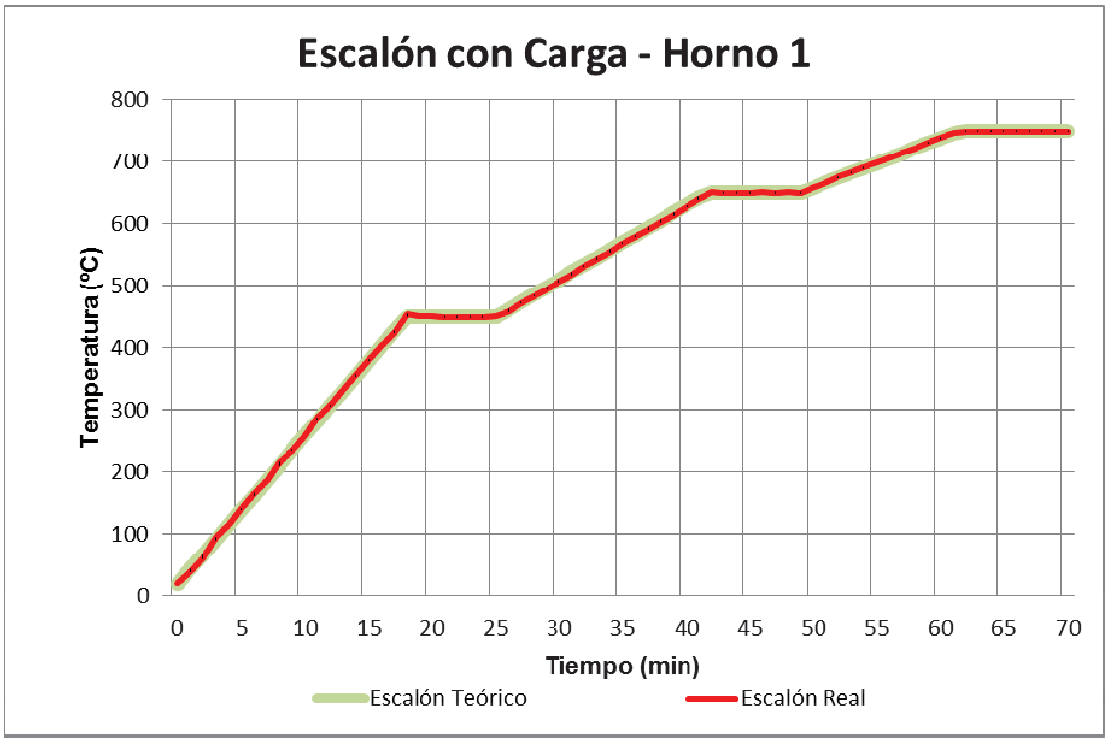


Figura 4.17. Escalón con carga del horno 1

Figura 4.18. Errores - Escalón con carga del horno 1

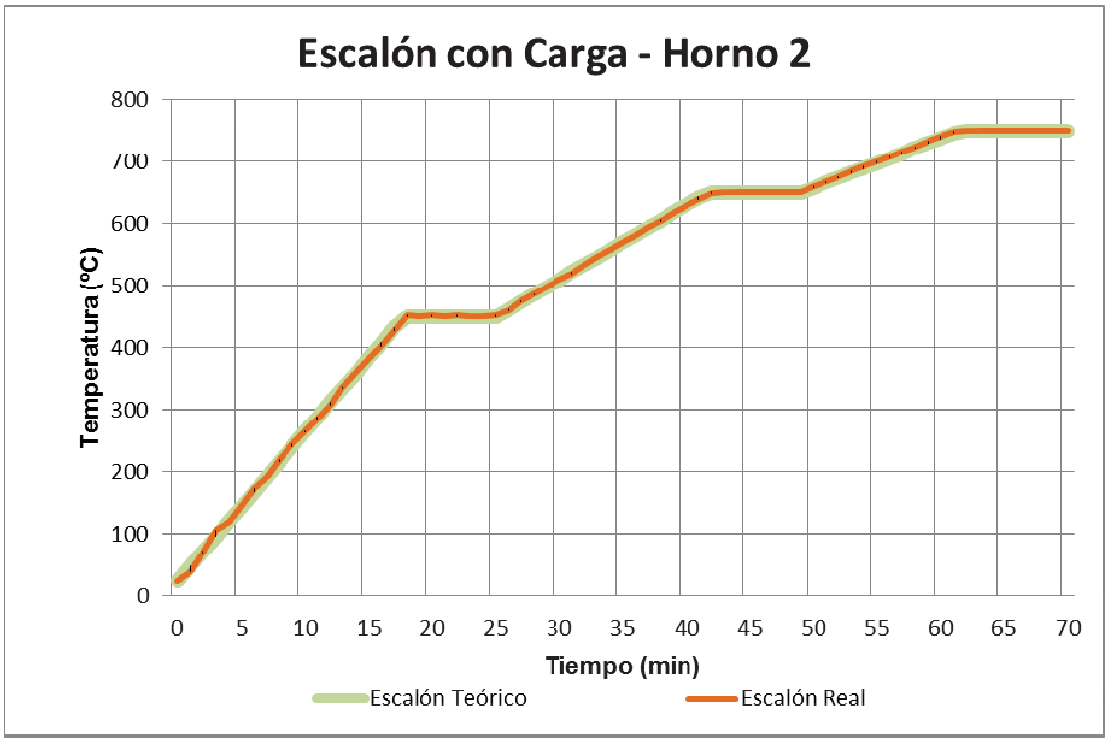


Figura 4.19. Escalón con carga del horno 2

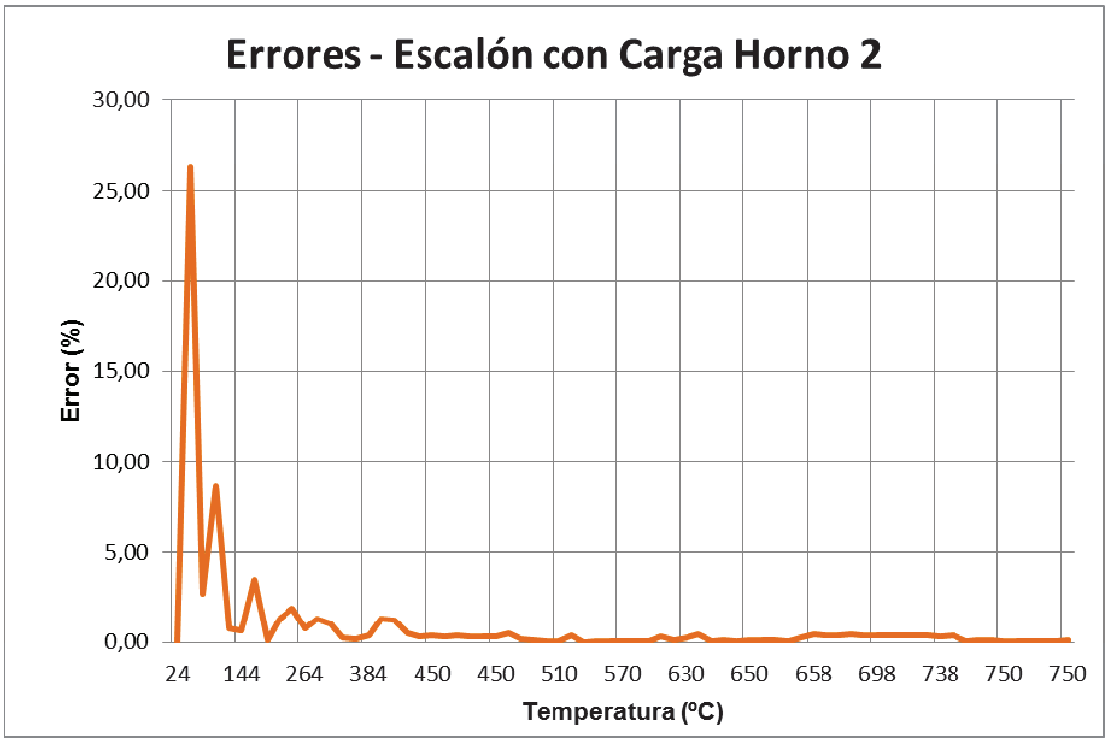


Figura 4.20. Errores - Escalón con carga del horno 2

Al igual que lo analizado sin carga, se puede apreciar que el modo de trabajo de rampas consecutivas (escalón) da como resultado menores errores de salida que al trabajar en modo rampa; teniendo que en el caso del horno 1 el máximo error es de 11,39% a 38,37ºC, el mínimo error es 0,02% a 650,1ºC con un error promedio de 0,73%. Para el horno 2 se tiene el error máximo de 11,91% a 38,72ºC, el error mínimo de 0,01/ a 124,1ºC y un error promedio de 0,90%.

Una vez que se ha comprobado la correcta operación del equipo y sus limitaciones tanto en vacío como con carga; es necesario detallar las conclusiones encontradas en el presente estudio e indicar algunas recomendaciones que permitirán mejorar la operación del equipo.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente capítulo constituye una recopilación de las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a lo largo de todo el estudio realizado en el proyecto; tanto en la sustentación teórica, el diseño e implementación del hardware, el desarrollo del software y las pruebas realizadas al equipo.

1.1 CONCLUSIONES

- El proyecto implementado es un Sistema para la Automatización de Hornos para Tratamiento Térmico del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla; su propósito es contribuir y facilitar el aprendizaje de los procesos de tratamiento térmico de los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.
- El equipo permite seleccionar la temperatura máxima de operación del horno, la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia a la temperatura definida, constituyendo un sistema amigable y de fácil utilización; basado en el monitoreo permanente de la temperatura a través del uso de termocuplas tipo K que se ajustan al equipo por su alto rango de medición y configurable a través de la pantalla táctil que constituye el HMI local o del computador que contiene al HMI remoto.
- El prototipo implementado es un sistema que utiliza como base para el control al PLC S7-1200 de SIEMENS, el mismo que en función de la lectura que detecta su módulo de entradas analógicas tipo termocupla, controla el encendido de las niquelinas a fin de regular la temperatura de operación de acuerdo al tipo de proceso y datos configurados por el usuario.
- El módulo tiene la versatilidad de poder trabajar con dos hornos en forma indistinta el momento que el usuario lo requiera, dentro de cada horno existen los procesos Rampa o Escalón; es importante tener en cuenta que solamente uno de estos procesos puede funcionar a la vez en cada horno;

siendo necesario que para cambiar de proceso concluya el inicial o se reinicie la operación del horno utilizado.

- En el diseño de las interfaces local y remota, se prioriza la facilidad de operación; este hecho se consigue con la aplicación de instrucciones claras y concisas que se deben ejecutar en forma secuencial, de modo que incluso personas sin experiencia puedan utilizarlo. En las pantallas se visualizan las instrucciones a seguir para inicializar el prototipo e ingresar los datos requeridos para su funcionamiento; así como el monitoreo del estado de la temperatura de los hornos.
- La comunicación entre el PLC, la pantalla táctil y el computador se realiza a través de una red Ethernet; siendo necesaria la utilización de un switch que permita controlar el flujo de datos entre los tres componentes señalados; la ventaja del dispositivo utilizado es su capacidad de autoconfiguración que facilita el trabajo del equipo.
- Con el propósito de mitigar el riesgo que puede ocasionar una apertura involuntaria de las puertas del horno, se instalaron interruptores magnéticos que permiten detectar la apertura de las puertas.
- Como una alternativa adicional de análisis, desde el HMI remoto se puede generar un archivo de Excel que guarde los valores de la temperatura de los hornos; de este modo los datos obtenidos podrán ser almacenados para su posterior tratamiento.
- Como se pudo verificar en las pruebas realizadas, la pendiente de operación de los hornos es variable y no lineal, caracterizada por ser alta a bajas temperaturas y disminuir considerablemente a medida que la temperatura incrementa.
- Es importante tener claro que la máxima pendiente de operación de los hornos constituye el límite de operación de los mismos; este hecho se debe tener en cuenta el momento de configurar los datos de operación de los hornos en cualquiera de los procesos posibles.
- Como se pudo evidenciar en las pruebas realizadas, el proceso escalón con pendientes que se ajustan al comportamiento natural de los hornos permite obtener mejores resultados de operación; es así que a bajas

temperaturas se utilizan pendientes grandes, mientras que a temperaturas altas se usan pendientes pequeñas.

- La obtención de la pendiente promedio de los hornos es un valor que se usa como referencia para la correcta operación de los mismos en modo rampa; su utilización permite obtener los resultados esperados; sin embargo es notorio que a bajas temperaturas hasta que se caliente el interior del horno se tiene un error considerable, mientras que a temperaturas elevadas el error se vuelve imperceptible pero el proceso se torna bastante lento.

1.2 RECOMENDACIONES

- El módulo posee un instructivo de operación, se recomienda su lectura y comprensión antes de utilizarlo o en caso de cualquier inconveniente con el mismo; de este modo se puede evitar cometer errores de configuración que afecten su funcionamiento.
- Para obtener óptimos resultados de operación es recomendable que la temperatura máxima de operación de los hornos sea de 900ºC.
- Cuando el equipo trabaje en proceso rampa se recomienda que la pendiente de los hornos sea 20ºC/min; si se utiliza valores más pequeños para la velocidad de calentamiento, el control a temperaturas inferiores se verá afectado; mientras que a pendientes mayores, en altas temperaturas las condiciones de los hornos evitarán que se logre alcanzar las pendientes señaladas.
- Para el trabajo en el proceso escalón es necesario que en la primera etapa se configuren pendientes grandes (30ºC/min) y que en las siguientes etapas disminuya este valor hasta llegar a pendientes menores a los 12ºC/min.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. H. Avner, “Introducción a la Metalurgia Física”, *2º* Ed. México, McGraw-Hill, 1988.

[2] F. Díaz del Castillo, y A. Reyes, “Aceros, Estructuras y Tratamientos Térmicos”, Cuautitlán Izcalli, Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Ingeniería, 2012.

[3] L. Herrera y E. Vásquez, “Diseño, Programación e Instalación de un Sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos de un Horno Lindberg para el Laboratorio de Tratamientos Térmicos”, Tesis (Ingeniero Mecánico), Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, 2011.

[4] E. Torres, “Apuntes acerca del Tratamiento Térmico y la Clasificación General de los Aceros”, Cuba, Universidad de Matanzas “Camilo Cien Fuegos”, Facultad de Ingenierías Química y Mecánica, 2004.

[5] S. Bazzana, P. Hegoburu, M. Ordoñez y D. Pieck, “Hornos y Tratamientos Térmicos”, Mendoza, Argentina, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Ingeniería Nuclear, 2008.

[6] Y. Tomé, “Manual de Procedimientos para Tratamientos Térmicos de la Empresa Industrias Varias Nacionales (INVANAL)”, Tesis (Bachiller en Ingeniería Metalúrgica), Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales, 2006.

[7] WIKIPEDIA, Enciclopedia Libre, *Temperatura*, [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura> [último acceso Septiembre 2014].

[8] M. Cortes y R. Garibay, “Temperatura”, México, Universidad, Academia de Bioinstrumentación, 2002.

[9] A. Creus, “Instrumentación Industrial”, 7º Ed. España, Marcombo, Ediciones Técnicas, 2005.

[10] R. Andrade y W. MACAS, Walter, “Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico para Medir y Controlar Caudal y Nivel”, Tesis (Ingeniero en Electrónica y Control), Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2010.

[11] WIKIPEDIA, Enciclopedia Libre, *Sensor final de carrera*, [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_final_de_carrera> [último acceso Septiembre 2014].

[12] SIEMENS, *SIMATIC S7-1200 Easy Book*, Manual de Producto, Alemania, 2012.

[13] DELTA, *DOP-B03 (B03S211 / B03E211) Instrunction Sheet*, Taiwan, 2012

[14] D-LINK, *DES-1008A*, [en línea] <http://www.dlinkla.com.ec/des-1008a> [último acceso Septiembre 2014].

[15] DELTA, *Technical Datasheet CliQ DIN Rail Power Suply*, Taiwan, 2012.

[16] DELTA, *DOPSoft User Manual*, Taiwan, 2012

[17] J. Lajara, J. Pelegri, "LabVIEW Entorno gráfico de programación", España, Alfaomega, 2011

[18] MONOGRAFÍAS.COM, *Práctica de Moldeo y Fundición en Farmacias,* [en línea]. <http://www.monografias.com/trabajos63/moldeo-fundicion/moldeo-fundicion2.shtml> [último acceso Septiembre 2014].

[19] WIKIPEDIA, Enciclopedia Libre, *Horno De Arco Eléctrico*, [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_arco_eléctrico> [último acceso Septiembre 2014].

[20] Lección 10.- *Hornos de resistencias,* [en línea] <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.PDF> [último acceso Septiembre 2014].

[21] E. Alvares, "Mediciones de Temperatura, Termómetros e Introducción", Argentina, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Automatización y Control, 2007

[22] C. Beltrán, "Medición de Temperatura", Chile, Colegio Salesiano de Concepción, Escuela Industrial "San José", Departamento de Electrónica

[23] LECCIONES DE ELECTRÓNICA, *Resistores PTC* [en línea] <http://www.ifent.org/lecciones/ptc/ptc.asp> [último acceso Septiembre 2014].

[24] A. Bautista, "2.4 Medición de Temperatura", Venezuela, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana

[25] COMO HACER TU ROBOT, *Sensor de Temperatura LM35DZ y LM335A* [en línea] <http://www.comohacerturobot.com/Taller/taller-sensortemperatura.htm> [último acceso Septiembre 2014].

[26] DCL METROLOGÍA, *Instrumentos de Medida, Medición y Control, Termómetro Infrarrojo Pirómetro Extech IR400* [en línea] <http://www.instrumentacion-metrologia.es/Pirometros-Extech-IR400> [último acceso Septiembre 2014].

[27] Tomado de MERCADO LIBRE., *Termocupla K* [en línea] <http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-526151167-termocupla-k-hasta-1350c-hornos-ceramica-vitrofusion-_JM> [último acceso Septiembre 2014].

ANEXOS

Anexo A. PRUEBAS DE LOS HORNOS EN VACÍO

Tabla A.1. Máxima pendiente de calentamiento de los hornos en vacío

Tiempo (min)	HORNO 1		HORNO 2	
	Temperatura Medida (ºC)	Pendiente Calculada (ºC/min)	Temperatura Medida (ºC)	Pendiente Calculada (ºC/min)
0	18,69		17,85	
1	28,11	9,4	26,99	9,1
2	60,39	32,3	43,41	16,4
3	101,70	41,3	64,47	21,1
4	146,60	44,9	97,50	33,0
5	193,20	46,6	137,40	39,9
6	238,50	45,3	177,00	39,6
7	281,60	43,1	214,70	37,7
8	323,00	41,4	250,90	36,2
9	363,30	40,3	285,70	34,8
10	400,90	37,6	319,70	34,0
11	437,00	36,1	352,80	33,1
12	470,50	33,5	384,80	32,0
13	501,70	31,2	416,60	31,8
14	530,30	28,6	446,80	30,2
15	558,30	28,0	476,50	29,7
16	584,00	25,7	504,70	28,2
17	608,20	24,2	532,00	27,3
18	631,10	22,9	557,80	25,8
19	652,70	21,6	582,20	24,4
20	673,00	20,3	605,30	23,1
21	691,60	18,6	627,30	22,0
22	709,40	17,8	648,40	21,1
23	726,30	16,9	668,90	20,5
24	742,30	16,0	688,90	20,0
25	757,70	15,4	707,80	18,9
26	772,50	14,8	726,30	18,5
27	783,10	10,6	744,40	18,1
28	796,40	13,3	762,50	18,1
29	809,20	12,8	780,10	17,6
30	821,60	12,4	797,70	17,6
31	833,50	11,9	815,00	17,3
32	844,60	11,1	832,10	17,1
33	854,90	10,3	848,40	16,3
34	864,30	9,4	864,00	15,6
35	873,40	9,1	878,90	14,9
36	882,60	9,2	893,20	14,3
37	891,10	8,5	906,00	12,8

38	899,40	8,3	918,10	12,1
39	907,10	7,7	929,30	11,2
40	914,80	7,7	939,80	10,5
41	922,30	7,5	949,90	10,1
42	929,30	7,0	960,30	10,4
43	936,60	7,3	969,00	8,7
44	943,60	7,0	977,40	8,4
45	950,10	6,5	985,40	8,0
46	956,20	6,1	993,10	7,7
47	961,80	5,6	1001,00	7,9
48	967,50	5,7	1008,00	7,0
49	973,00	5,5	1015,00	7,0
50	978,00	5,0	1022,00	7,0
51	983,00	5,0	1028,00	6,0
52	987,80	4,8	1034,00	6,0
53	992,30	4,5	1040,00	6,0
54	995,40	3,1	1046,00	6,0
55	999,30	3,9	1051,00	5,0
56	1002,60	3,3	1056,00	5,0
57	1006,00	3,4	1062,00	6,0
58	1010,00	4,0	1067,00	5,0
59	1014,00	4,0	1073,00	6,0
60	1018,00	4,0	1078,00	5,0

Tabla A.2. Rampa en vacío de los hornos

Tiempo (min)	HORNO 1			HORNO 2		
	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)
0	17,8	17,81		22,26	22,26	
1	37,8	31,08	21,62	42,26	42,3	0,09
2	57,8	66,05	12,49	62,26	77,83	20,01
3	77,8	84,51	7,94	82,26	92,86	11,42
4	97,8	95,27	2,66	102,26	105,1	2,70
5	117,8	126,3	6,73	122,26	135,9	10,04
6	137,8	138,3	0,36	142,26	146,9	3,16
7	157,8	163,6	3,55	162,26	171,1	5,17
8	177,8	179,0	0,67	182,26	189,4	3,77
9	197,8	201,6	1,88	202,26	209,8	3,59
10	217,8	218,9	0,50	222,26	228,4	2,69
11	237,8	242,5	1,94	242,26	251,6	3,71
12	257,8	256,9	0,35	262,26	267,4	1,92
13	277,8	282,7	1,73	282,26	291,0	3,00
14	297,8	298,6	0,27	302,26	310,2	2,56
15	317,8	318,6	0,25	322,26	330,0	2,35
16	337,8	342,0	1,23	342,26	352,5	2,90
17	357,8	359,6	0,50	362,26	372,6	2,78

18	377,8	379,3	0,40	382,26	392,3	2,56
19	397,8	399,2	0,35	402,26	412,0	2,36
20	417,8	423,5	1,35	422,26	432,2	2,30
21	437,8	444,2	1,44	442,26	452,3	2,22
22	457,8	463,8	1,29	462,26	472,1	2,08
23	477,8	483,8	1,24	482,26	492,1	2,00
24	497,8	503,1	1,05	502,26	512,2	1,94
25	517,8	523,4	1,07	522,26	532,1	1,85
26	537,8	543,7	1,09	542,26	552,1	1,78
27	557,8	563,5	1,01	562,26	572,0	1,70
28	577,8	583,2	0,93	582,26	592,1	1,66
29	597,8	603,7	0,98	602,26	612,2	1,62
30	617,8	623,5	0,91	622,26	632,1	1,56
31	637,8	643,5	0,89	642,26	651,9	1,48
32	657,8	663,8	0,90	662,26	671,8	1,42
33	677,8	683,7	0,86	682,26	690,5	1,19
34	697,8	703,5	0,81	702,26	708,8	0,92
35	717,8	722,6	0,66	722,26	725,5	0,45
36	737,8	740,8	0,40	742,26	741,6	0,09
37	757,8	758,0	0,03	762,26	756,6	0,75
38	777,8	773,9	0,50	782,26	770,9	1,47
39	797,8	789,1	1,10	800	784,7	1,95
40	800	799,2	0,10	800	798,2	0,23
41	800	799,4	0,08	800	810,8	1,33
42	800	799,2	0,10	800	800,4	0,05
43	800	799,4	0,08	800	800,6	0,07
44	800	799,3	0,09	800	800,0	0,00
45	800	799,4	0,08	800	800,6	0,07
46	800	799,6	0,05	800	800,5	0,06
47	800	799,4	0,08	800	800,6	0,07
48	800	799,3	0,09	800	800,4	0,05
49	800	799,5	0,06	800	800,4	0,05
50	800	799,3	0,09	800	800,6	0,07
51	800	799,4	0,08	800	800,6	0,07
52	800	799,4	0,08	800	800,5	0,06
53	800	799,4	0,08	800	800,4	0,05
54	800	798,5	0,19	800	800,4	0,05
55	800	799,5	0,06	800	800,4	0,05
56	800	799,2	0,10	800	800,6	0,07
57	800	799,4	0,08	800	800,5	0,06
58	800	799,6	0,05	800	800,4	0,05
59	800	799,4	0,08	800	800,4	0,05
60	800	799,3	0,09	800	800,6	0,07

Tabla A.3. Escalón en vacío de los hornos

Tiempo (min)	HORNO 1			HORNO 2		
	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)
0	20,96	20,96		20,5	20,5	
1	50,96	46,58	9,40	50,5	41,84	20,70
2	80,96	80,52	0,55	80,5	64,66	24,50
3	110,96	121,4	8,60	110,5	103,3	6,97
4	140,96	151,9	7,20	140,5	148,1	5,13
5	170,96	180,0	5,02	170,5	174,5	2,29
6	200,96	213,5	5,87	200,5	201,8	0,64
7	230,96	241,1	4,21	230,5	239,0	3,56
8	260,96	272,4	4,20	260,5	264,3	1,44
9	290,96	301,1	3,37	290,5	297,9	2,48
10	320,96	332,1	3,35	320,5	328,8	2,52
11	350,96	363,5	3,45	350,5	360,9	2,88
12	380,96	390,9	2,54	380,5	390,1	2,46
13	400	409,3	2,27	400	407,1	1,74
14	400	403,5	0,87	400	399,9	0,03
15	400	400,7	0,17	400	401,6	0,40
16	400	400,0	0,00	400	401,8	0,45
17	400	402,1	0,52	400	401,8	0,45
18	400	399,9	0,03	400	402,2	0,55
19	400	400,0	0,00	400	401,8	0,45
20	400	402,1	0,52	400	400,0	0,00
21	400	398,9	0,28	400	401,3	0,32
22	400	401,4	0,35	400	402,2	0,55
23	425	410,2	3,61	420	405,9	3,47
24	450	439,1	2,48	440	431,7	1,92
25	475	472,2	0,59	460	453,6	1,41
26	500	497,3	0,54	480	474,6	1,14
27	525	523,1	0,36	500	494,3	1,15
28	550	548,1	0,35	520	514,6	1,05
29	575	573,4	0,28	540	534,3	1,07
30	600	598,2	0,30	560	554,4	1,01
31	625	623,1	0,30	580	574,5	0,96
32	650	647,5	0,39	600	594,3	0,96
33	675	670,2	0,72	620	614,5	0,90
34	700	691,0	1,30	640	634,4	0,88
35	700	698,7	0,19	660	654,4	0,86
36	700	699,4	0,09	680	674,1	0,88
37	700	699,3	0,10	700	693,6	0,92
38	700	699,4	0,09	700	700,5	0,07
39	700	699,5	0,07	700	700,6	0,09
40	700	699,5	0,07	700	700,6	0,09
41	700	699,6	0,06	700	700,3	0,04
42	700	699,4	0,09	700	700,5	0,07
43	700	699,6	0,06	700	700,6	0,09

44	700	699,4	0,09	700	700,5	0,07
45	715	713,3	0,24	700	700,5	0,07
46	730	727,8	0,30	700	700,4	0,06
47	745	743,1	0,26	700	700,6	0,09
48	760	757,9	0,28	715	709,4	0,79
49	775	772,7	0,30	730	725,9	0,56
50	790	787,2	0,36	745	740,6	0,59
51	805	802,8	0,27	760	755,6	0,58
52	820	817,9	0,26	775	770,7	0,56
53	835	832,0	0,36	790	785,7	0,55
54	850	847,4	0,31	805	800,6	0,55
55	850	849,4	0,07	820	815,2	0,59
56	850	849,4	0,07	835	829,6	0,65
57	850	849,4	0,07	850	842,9	0,84
58	850	849,6	0,05	850	850,6	0,07
59	850	849,5	0,06	850	850,6	0,07
60	850	849,4	0,07	850	850,5	0,06
61	850	849,4	0,07	850	850,4	0,05
62	850	849,5	0,06	850	850,4	0,05
62	850	849,5	0,06	850	850,3	0,04
64	850	849,4	0,07	850	850,4	0,05
65	850	849,4	0,07	850	850,6	0,07

Anexo B. PRUEBAS DE LOS HORNOS CON CARGA

Tabla B.1. Máxima pendiente de calentamiento de los hornos con carga

Tiempo (min)	HORNO 1		HORNO 2	
	Temperatura Medida (ºC)	Pendiente Calculada (ºC/min)	Temperatura Medida (ºC)	Pendiente Calculada (ºC/min)
0	21,43		21,7	
1	41,65	20,2	45,2	23,5
2	74,03	32,4	79,8	34,6
3	109,6	35,6	117,4	37,6
4	144,5	34,9	155,5	38,1
5	179,6	35,1	184,9	29,4
6	212,5	32,9	216,1	31,2
7	242,5	30,0	245,4	29,3
8	273,7	31,2	273,1	27,7
9	302,0	28,3	300,0	26,9
10	329,5	27,5	325,1	25,1
11	354,5	25,0	348,9	23,8
12	377,5	23,0	370,8	21,9
13	400,5	23,0	391,6	20,8
14	420,1	19,6	411,5	19,9
15	438,1	18,0	430,4	18,9
16	457,9	19,8	448,1	17,7
17	474,6	16,7	465,0	16,9
18	491,1	16,5	481,2	16,2
19	506,8	15,7	496,8	15,6
20	520,7	13,9	512,2	15,4
21	536,2	15,5	527,1	14,9
22	549,9	13,7	541,2	14,1
23	562,5	12,6	554,3	13,1
24	574,1	11,6	566,9	12,6
25	586,0	11,9	579,2	12,3
26	597,6	11,6	591,1	11,9
27	608,3	10,7	602,5	11,4
28	618,8	10,5	613,5	11,0
29	629,3	10,5	624,1	10,6
30	639,4	10,1	634,4	10,3
31	649,1	9,7	644,3	9,9
32	658,6	9,5	654,4	10,1
33	668,3	9,7	664,3	9,9
34	677,1	8,8	673,9	9,6
35	686,5	9,4	683,1	9,2
36	694,4	7,9	692,3	9,2
37	703,3	8,9	701,1	8,8
38	712,2	8,9	709,8	8,7
39	719,6	7,4	718,2	8,4

40	727,3	7,7	726,0	7,8
41	735,3	8,0	733,8	7,8
42	743,0	7,7	740,9	7,1
43	750,4	7,4	748,3	7,4
44	757,6	7,2	755,4	7,1
45	764,6	7,0	762,6	7,2
46	771,3	6,7	769,5	6,9
47	778,2	6,9	776,3	6,8
48	784,2	6,0	783,2	6,9
49	790,3	6,1	791,1	7,9
50	796,5	6,2	798,6	7,5
51	802,7	6,2	805,7	7,1
52	808,6	5,9	812,6	6,9
53	814,4	5,8	819,9	7,3
54	820,2	5,8	826,9	7,0
55	826,4	6,2	832,8	5,9
56	832,6	6,2	838,5	5,7
57	838,1	5,5	843,8	5,3
58	843,5	5,4	849,0	5,2
59	848,7	5,2	854,1	5,1
60	854,2	5,5	859,3	5,2

Tabla B.2. Rampa con carga de los hornos

Tiempo (min)	HORNO 1			HORNO 2		
	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)
0	20,5	20,5		19,43	19,43	
1	32,5	34,32	5,30	31,43	30,62	2,65
2	44,5	50,45	11,79	43,43	41,84	3,80
3	56,5	61,69	8,41	55,43	56,11	1,21
4	68,5	67,16	2,00	67,43	65,31	3,25
5	80,5	88,5	9,04	79,43	71,24	11,50
6	92,5	97,87	5,49	91,43	93,88	2,61
7	104,5	104,9	0,38	103,43	101,6	1,80
8	116,5	123,1	5,36	115,43	107,9	6,98
9	128,5	128,2	0,23	127,43	128,4	0,76
10	140,5	146,4	4,03	139,43	133,3	4,60
11	152,5	153,9	0,91	151,43	149,0	1,63
12	164,5	167,7	1,91	163,43	160,1	2,08
13	176,5	179,1	1,45	175,43	170,1	3,13
14	188,5	191,7	1,67	187,43	184,6	1,53
15	200,5	202,2	0,84	199,43	192,4	3,65
16	212,5	216	1,62	211,43	208,8	1,26
17	224,5	224,7	0,09	223,43	216,9	3,01
18	236,5	241,2	1,95	235,43	231,3	1,79
19	248,5	247,9	0,24	247,43	241,3	2,54

20	260,5	264,7	1,59	259,43	254,4	1,98
21	272,5	272,5	0,00	271,43	267,3	1,55
22	284,5	287,1	0,91	283,43	275,9	2,73
23	296,5	299,3	0,94	295,43	291,8	1,24
24	308,5	308,2	0,10	307,43	302,3	1,70
25	320,5	324,4	1,20	319,43	315,9	1,12
26	332,5	333,1	0,18	331,43	329,6	0,56
27	344,5	345,5	0,29	343,43	339,6	1,13
28	356,5	359,6	0,86	355,43	350,6	1,38
29	368,5	368,9	0,11	367,43	363,5	1,08
30	380,5	381,2	0,18	379,43	377,1	0,62
31	392,5	395,8	0,83	391,43	388,4	0,78
32	404,5	405,4	0,22	403,43	399,5	0,98
33	416,5	422,8	1,49	415,43	411,4	0,98
34	428,5	432,1	0,83	427,43	423,6	0,90
35	440,5	444,3	0,86	439,43	435,7	0,86
36	452,5	457,7	1,14	451,43	447,6	0,86
37	464,5	470,3	1,23	463,43	460,0	0,75
38	476,5	480,6	0,85	475,43	472,0	0,73
39	488,5	492,9	0,89	487,43	484,1	0,69
40	500,5	504,5	0,79	499,43	496,1	0,67
41	512,5	517,9	1,04	511,43	508,1	0,66
42	524,5	529,2	0,89	523,43	520,3	0,60
43	536,5	540,5	0,74	535,43	532,1	0,63
44	548,5	553,2	0,85	547,43	544,3	0,58
45	560,5	564,9	0,78	559,43	556,2	0,58
46	572,5	576,9	0,76	571,43	568,2	0,57
47	584,5	588,7	0,71	583,43	580,0	0,59
48	596,5	600,2	0,62	595,43	591,9	0,60
49	608,5	611,2	0,44	607,43	603,4	0,67
50	620,5	621,5	0,16	619,43	614,4	0,82
51	632,5	631,7	0,13	631,43	625,0	1,03
52	644,5	641,6	0,45	643,43	635,3	1,28
53	656,5	651	0,84	655,43	645,5	1,54
54	668,5	660,2	1,26	667,43	655,0	1,90
55	680,5	669	1,72	679,43	664,0	2,32
56	692,5	677,6	2,20	691,43	672,8	2,77
57	700	686	2,04	700	681,7	2,68
58	700	699,8	0,03	700	690,6	1,36
59	700	701,5	0,21	700	699,2	0,11
60	700	700,4	0,06	700	700,2	0,03
61	700	699,3	0,10	700	700,5	0,07
62	700	699,3	0,10	700	700,3	0,04
63	700	699,4	0,09	700	700,2	0,03
64	700	700,8	0,11	700	700,5	0,07
65	700	699,4	0,09	700	700,6	0,09
66	700	701,5	0,21	700	700,5	0,07
67	700	700,4	0,06	700	700,3	0,04
68	700	700,4	0,06	700	700,3	0,04

69	700	701,5	0,21	700	700,4	0,06
70	700	700,8	0,11	700	700,2	0,03

Tabla B.3. Escalón en vacío de los hornos

Tiempo (min)	HORNO 1			HORNO 2		
	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)	Temperatura Calculada (ºC)	Temperatura Medida (ºC)	Error (%)
0	18,74	18,74		19.11	19.11	
1	42,74	38,37	11,39	34.11	38.72	11.91
2	66,74	60,76	9,84	49.11	45.45	8.05
3	90,74	94,62	4,10	64.11	64.56	0.70
4	114,74	115,8	0,92	79.11	78.94	0.22
5	138,74	140,5	1,25	94.11	92.76	1.46
6	162,74	166,2	2,08	109.11	107.9	1.12
7	186,74	186,6	0,08	124.11	124.1	0.01
8	210,74	215,6	2,25	139.11	139.2	0.06
9	234,74	233,1	0,70	154.11	154.3	0.12
10	258,74	258,9	0,06	169.11	168.8	0.18
11	282,74	287,2	1,55	184.11	183.5	0.33
12	306,74	307,9	0,38	199.11	198.9	0.11
13	330,74	331,8	0,32	214.11	213.8	0.14
14	354,74	356,8	0,58	229.11	228.8	0.14
15	378,74	380,8	0,54	244.11	243.6	0.21
16	402,74	402,8	0,01	259.11	258.7	0.16
17	426,74	423,9	0,67	274.11	273.4	0.26
18	450	453,8	0,84	289.11	288.5	0.21
19	450	451,3	0,29	304.11	303.8	0.10
20	450	450,2	0,04	319.11	319.9	0.25
21	450	448,8	0,27	334.11	335.4	0.38
22	450	448,1	0,42	349.11	350.3	0.34
23	450	449,4	0,13	350	350.2	0.06
24	450	448,7	0,29	350	350.9	0.26
25	450	450,2	0,04	350	350.8	0.23
26	462	458,3	0,81	350	350.6	0.17
27	474	470,9	0,66	350	350.4	0.11
28	486	482,6	0,70	350	350.4	0.11
29	498	494,1	0,79	350	350.6	0.17
30	510	506	0,79	360	359.8	0.06
31	522	518,6	0,66	370	370.5	0.13
32	534	531,4	0,49	380	380.6	0.16
33	546	543,6	0,44	390	390.4	0.10
34	558	554,6	0,61	400	400.4	0.10
35	570	567,1	0,51	410	410.4	0.10
36	582	578,9	0,54	420	420.2	0.05
37	594	591,4	0,44	430	430.4	0.09
38	606	602,9	0,51	440	440.4	0.09

39	618	615	0,49	450	450.5	0.11
40	630	626,7	0,53	460	460.3	0.07
41	642	638,7	0,52	470	470.3	0.06
42	650	650,1	0,02	480	480.1	0.02
43	650	649,5	0,08	490	490.1	0.02
44	650	649,6	0,06	500	500	0.00
45	650	649	0,15	500	500.4	0.08
46	650	650,1	0,02	500	500.5	0.10
47	650	649,6	0,06	500	500.6	0.12
48	650	650,7	0,11	500	500.8	0.16
49	650	649,4	0,09	500	500.2	0.04
50	658	658,6	0,09	500	500.4	0.08
51	666	666,3	0,05	500	500.5	0.10
52	674	674,9	0,13	507	508.2	0.24
53	682	682,7	0,10	514	515.2	0.23
54	690	690,6	0,09	521	522.1	0.21
55	698	698,8	0,11	528	529	0.19
56	706	706,6	0,08	535	536.1	0.21
57	714	714,8	0,11	542	543	0.18
58	722	722,3	0,04	549	549.9	0.16
59	730	730,7	0,10	556	557.2	0.22
60	738	738,6	0,08	563	564	0.18
61	746	746,5	0,07	570	571.1	0.19
62	750	749,3	0,09	577	578	0.17
62	750	749,2	0,11	584	585	0.17
64	750	749,3	0,09	591	592	0.17
65	750	749,4	0,08	598	599	0.17
66	750	749,6	0,05	600	600.5	0.08
67	750	749,3	0,09	600	600.3	0.05
68	750	749,2	0,11	600	600.6	0.10
69	750	749,4	0,08	600	600.3	0.05
70	750	749,3	0,09	600	600.4	0.07

Anexo C. FICHA TÉCNICA DE LOS CPU DEL PLC S7-1200 [12]

Tabla A- 8 Especificaciones generales

Especificaciones generales		CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1215C
Dimensiones An. x Al. x P. (mm)		90 x 100 x 75	90 x 100 x 75	110 x 100 x 75	130 x 100 x 75
Peso	• AC/DC/relé	• 420 gramos	• 425 gramos	• 475 gramos	• 530 gramos
	• DC/DC/relé	• 380 gramos	• 385 gramos	• 435 gramos	• 585 gramos
	• DC/DC/DC	• 370 gramos	• 370 gramos	• 415 gramos	• 520 gramos
Disipación de potencia	• AC/DC/relé	• 10 W	• 11 W	• 14 W	• 14 W
	• DC/DC/relé	• 8 W	• 9 W	• 12 W	• 12 W
	• DC/DC/DC	• 8 W	• 9 W	• 12 W	• 12 W
Intensidad disponible (5 V DC) para SM y bus CM		750 mA máx.	1000 mA máx.	1600 mA máx.	1600 mA máx.
Intensidad disponible (24 V DC) alimentación de sensores		300 mA máx.	300 mA máx.	400 mA máx.	400 mA máx.
Consumo de corriente de las entradas digitales (24 V DC)		4 mA/entrada utilizada	4 mA/entrada utilizada	4 mA/entrada utilizada	4 mA/entradas utilizadas

Tabla A- 9 Propiedades de la CPU

Propiedades de la CPU	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1215C
Memoria de usuario				
• Memoria de trabajo	• 30 KB	• 50 KB	• 75 KB	• 100 KB
• Memoria de carga	• 1 MB	• 1 MB	• 4 MB	• 4 MB
• Memoria remanente	• 10 KB	• 10 KB	• 10 KB	• 10 KB
E/S digitales integradas	6 entradas	8 entradas	14 entradas	14 entradas
Consulte los datos técnicos (Página 268).	4 salidas	6 salidas	10 salidas	10 salidas
E/S analógicas integradas	2 entradas	2 entradas	2 entradas	2 entradas 2 salidas
Consulte los datos técnicos (Página 277).				
Tamaño de la memoria imagen de proceso				
• Entradas	• 1024 bytes	• 1024 bytes	• 1024 bytes	• 1024 bytes
• Salidas	• 1024 bytes	• 1024 bytes	• 1024 bytes	• 1024 bytes
Área de marcas (M)	4096 bytes	4096 bytes	8192 bytes	8192 bytes

Propiedades de la CPU	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1215C
Memoria temporal (local)	• 16 KB para arranque y ciclo (incluyendo los FBs y FCs asociados) • 4 KB para eventos de alarma estándar, incluyendo FBs y FCs • 4 KB para eventos de alarma de error, incluyendo FBs y FCs			
Ampliación con módulos SM	Ninguno	2 SM máx.	8 SM máx.	8 SM máx.
Ampliación con SB, CB o BB	1 máx.	1 máx.	1 máx.	1 máx.
Ampliación con CM	3 máx.	3 máx.	3 máx.	3 máx.
Contadores rápidos	3 E/S incorporadas, 5 con SB	4 E/S incorporadas, 6 con SB	6 en total	6 en total
• Fase simple (frecuencia de reloj)	• 3 a 100 kHz SB: 2 a 30 kHz	• 3 a 100 kHz y 1 a 30 kHz SB: 2 a 30 kHz	• 3 a 100 kHz y 3 a 30 kHz	• 3 a 100 kHz y 3 a 30 kHz
• Fase de cuadratura (frecuencia de reloj)	• 3 a 80 kHz SB: 2 a 20 kHz	• 3 a 80 kHz y 1 a 20 kHz SB: 2 a 20 kHz	• 3 a 80 kHz y 3 a 20 kHz	• 3 a 80 kHz y 3 a 20 kHz
Generadores de impulsos [1]	4	4	4	4
Entradas de captura de impulsos	6	8	14	14
Alarmas de retardo/cíclicas	4 en total con resolución de 1 ms	4 en total con resolución de 1 ms	4 en total con resolución de 1 ms	4 en total con resolución de 1 ms
Alarmas de flanco Con SB opcional	6 crecientes y 6 decrecientes 10 crecientes y 10 decrecientes	8 crecientes y 8 decrecientes 12 crecientes y 12 decrecientes	12 crecientes y 12 decrecientes 16 crecientes y 16 decrecientes	12 crecientes y 12 decrecientes 16 crecientes y 16 decrecientes
Reloj en tiempo real				
• Precisión	• +/- 60 segundos/mes	• +/- 60 segundos/mes	• +/- 60 segundos/mes	• +/- 60 segundos/mes
• Tiempo de retención (capacitador de alto rendimiento sin mantenimiento)	• 20 días típ./12 días mín. a 40 °C	• 20 días típ./12 días mín. a 40 °C	• 20 días típ./12 días mín. a 40 °C	• 20 días típ./12 días mín. a 40 °C
Velocidad de ejecución				
• Booleano	• 0,08 µs/instrucción	• 0,08 µs/instrucción	• 0,08 µs/instrucción	• 0,08 µs/instrucción
• Transferir palabra	• 12 µs/instrucción	• 12 µs/instrucción	• 12 µs/instrucción	• 12 µs/instrucción
• Funciones matemáticas con números reales	• 18 µs/instrucción	• 18 µs/instrucción	• 18 µs/instrucción	18 µs/instrucción

[1] Para modelos de CPU con salidas de relé, se debe instalar una Signal Board (SB) digital para emplear los generadores de impulsos.

Tabla A- 10 Comunicación

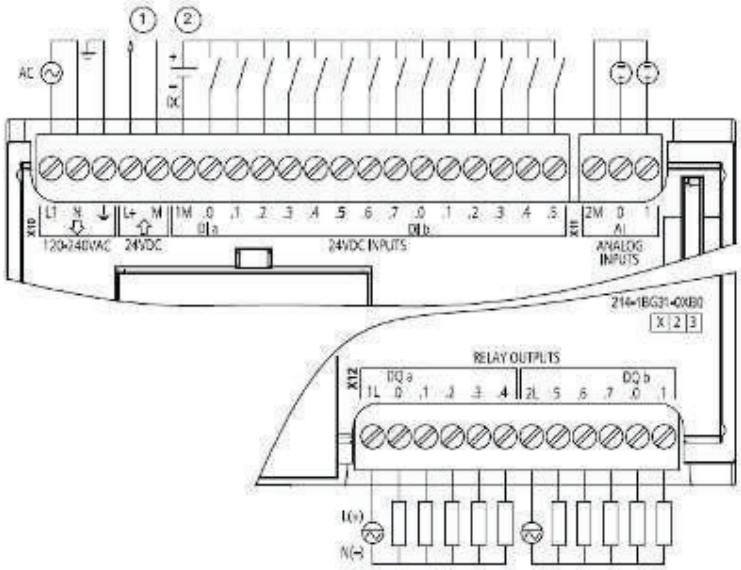
Datos técnicos	CPU 1211C, CPU 1212C, CPU 1214C	CPU 1215C
Comunicación	1 puerto Ethernet	2 puertos Ethernet
• Transferencia de datos • Aislamiento (señal externa a lógica del PLC) • Tipo de cable	• 10/100 Mb/s • Aislado por transformador, 1500 V DC • CAT5e apantallado	• 10/100 Mb/s • Aislado por transformador, 1500 V DC • CAT5e apantallado
Dispositivos	• 3 HMI[1] • 1 PG	• 3 HMI[1] • 1 PG
Conexiones Ethernet[2]	8 (activas o pasivas)	8 (activas o pasivas)
Conexiones S7 de CPU a CPU (GET/PUT)	• 8 (cliente) • 3 (servidor)	• 8 (cliente) • 3 (servidor)

1 La CPU proporciona conexiones HMI dedicadas que admiten un máximo de 3 dispositivos HMI. Se pueden tener hasta 2 SIMATIC Comfort Panel. El número total de HMI depende del tipo de paneles HMI indicados en la configuración. Así por ejemplo, pueden conectarse a la CPU hasta tres SIMATIC Basic Panels, o bien hasta dos SIMATIC Comfort Panel con un Basic Panel adicional.

2 conexiones para Open User Communications (activas o pasivas): TSEND_C, TRCV_C, TCON, TDISCON, TSEND y TRCV.

Tabla A- 11 Esquema de cableado para CPU 1214C AC/DC/relé

CPU 1214C AC/DC/relé



① Salida alimentación de sensor 24 V DC. Para una inmunidad a pertubaciones adicional, conecte "M" a masa
aunque no se utilice la alimentación del sensor.

② Para entradas NPN, conecte "-" a "M" (como se indica). Para entradas PNP, conecte "+" a "M".

Anexo D. FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO SM 1231 AI 4xTC [12]

Tabla A- 48 Especificaciones generales

Modelo	SM 1231 AI4 x 16 bits TC	SM 1231 AI8 x 16 bits TC
Referencia	6ES7 231-5QD30-0XB0	6ES7 231-5QF30-0XB0
Dimensiones An. x Al. x P. (mm)	45 x 100 x 75	45 x 100 x 75
Peso	180 gramos	xxx gramos
Disipación de potencia	1,5 W	1,5 W
Consumo de corriente (bus SM)	80 mA	80 mA
Consumo de corriente [1] (24 V DC)	40 mA	40 mA
Número de entradas (Página 290) Tipo	4 TC flotante y mV	8 TC flotante y mV
Diagnóstico	• Rebase por exceso/defecto[2] • Baja tensión 24 V DC[2] • Rotura de hilo (sólo en modo de intensidad) [3]	• Rebase por exceso/defecto[2] • Baja tensión 24 V DC[2] • Rotura de hilo (sólo en modo de intensidad) [3]

1 20,4 a 28,8 V DC (clase 2, potencia limitada o alimentación de sensor de la CPU)

2 La información de las alarmas de diagnóstico de baja tensión y de rebase por exceso/defecto se indicará en los valores de datos analógicos aunque las alarmas estén deshabilitadas en la configuración del módulo.

3 Si la alarma de rotura de hilo está deshabilitada y se presenta una condición de rotura de hilo en la línea del sensor, el módulo puede señalizar valores aleatorios.

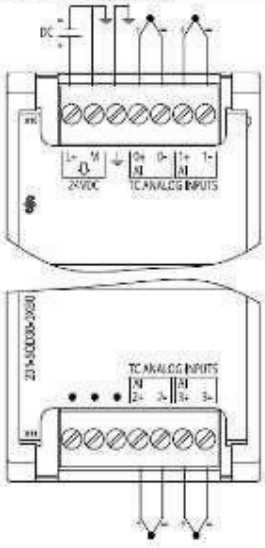
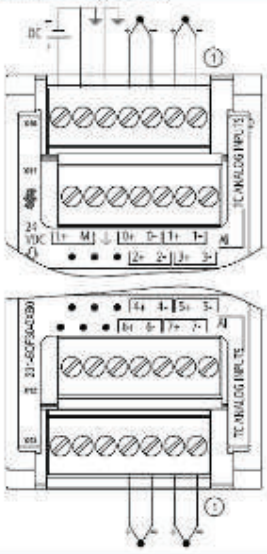
SM 1231 AI 4 TC (16 bits)	SM 1231 AI 8 TC (16 bits)	Notas
		① SM 1231 AI 8 TC: Para mejorar la claridad, TC 2, 3, 4 y 5 no se muestran conectados.

Tabla A- 50 Entradas analógicas para módulos RTD y TC (SB y SM)

Datos técnicos		RTD y termopar (TC)
Número de entradas		1 (SB), 4 u 8 (SM)
Tipo		• RTD: RTD y Ω indicado por el módulo • TC: TC flotante y mV
Rango • Rango nominal (palabra de datos) • Rango de sobreimpulso/subimpulso (palabra de datos) • Rebase por exceso/defecto (palabra de datos)		Consultar las tablas de tipo RTD/TC: • RTD (Página 293) • TC (Página 291)
Resolución	Temperatura	0,1 °C / 0,1 °F
	Resistencia / tensión	Signo más (+) de 15 bits
Tensión soportada máxima		±35 V
Supresión de ruido		85 dB para el ajuste de filtro seleccionado (10 Hz, 50 Hz, 60 Hz ó 400 Hz)
Rechazo en modo común		> 120 dB a 120 V AC
Impedancia		≥ 10 MΩ
Aislamiento	De campo a lógica	500 V AC
	De campo a 24 V DC	SM RTD y SM TC: 500 V AC (no aplicable a SB RTD y SB TC)
	24 V DC a circuito lógico	SM RTD y SM TC: 500 V AC (no aplicable a SB RTD y SB TC)
Aislamiento entre canales		• SM RTD: Ninguno (no aplicable a SB RTD) • SM TC: 120 V AC (no aplicable a SB TC)
Precisión (25 °C / de -20 a 60 °C)		Consultar las tablas de tipo RTD/TC: • RTD (Página 293) • TC (Página 291)
Repetitividad		±0,05% FS
Disipación máxima del sensor		• RTD: 0,5 mW • TC: No aplicable
Principio de medición		Integrador
Tiempo de actualización del módulo		Consultar las tablas de selección de filtro RTD/TC: • RTD (Página 294) • TC (Página 292)
Error de unión fría		• RTD: No aplicable • TC: ±1,5 °C
Longitud de cable (metros)		100 metros hasta el sensor (máx.)
Resistencia del cable		• RTD: 20 Ω, 2.7 Ω para 10 Ω RTD máx. • TC: 100 Ω máx.

Tabla A- 51 Tabla de selección de termopares (rangos y precisión)

Tipo	Rango de saturación mínimo[1]	Rango nominal límite inferior	Rango nominal límite superior	Rango de saturación máximo[2]	Precisión rango [3, 4] normal a 25 °C	Precisión del rango [3, 4] normal entre - 20 °C y 60 °C
J	-210,0 °C	-150,0 °C	1200,0 °C	1450,0 °C	±0,3 °C	±0,6 °C
K	-270,0 °C	-200,0 °C	1372,0 °C	1622,0 °C	±0,4 °C	±1,0 °C
T	-270,0 °C	-200,0 °C	400,0 °C	540,0 °C	±0,5 °C	±1,0 °C
E	-270,0 °C	-200,0 °C	1000,0 °C	1200,0 °C	±0,3 °C	±0,6 °C
R & S	-50,0 °C	100,0 °C	1768,0 °C	2019,0 °C	±1,0 °C	±2,5 °C
N	-270,0 °C	-200,0 °C	1300,0 °C	1550,0 °C	±1,0 °C	±1,6 °C
C	0,0 °C	100,0 °C	2315,0 °C	2500,0 °C	±0,7 °C	±2,7 °C
TXK / XK(L)	-200,0 °C	-150,0 °C	800,0 °C	1050,0 °C	±0,6 °C	±1,2 °C
Tensión	-32512	-27648 -80 mV	27648 80 mV	32511	±0,05%	±0,1%

1 Los valores de termopares inferiores al valor del rango de saturación mínimo se notifican como -32768.

2 Los valores de termopares superiores al valor del rango de saturación máximo se notifican como 32767.

3 El error de la unión fría interna es de ±1,5 °C en todos los rangos. Esto debe añadirse al error en esta tabla. Para cumplir estas especificaciones, el módulo requiere como mínimo 30 minutos de calentamiento.

4 Solo para SM TC de 4 canales: En presencia de radiofrecuencia radiada de 970 MHz a 990 MHz, la precisión puede verse reducida.

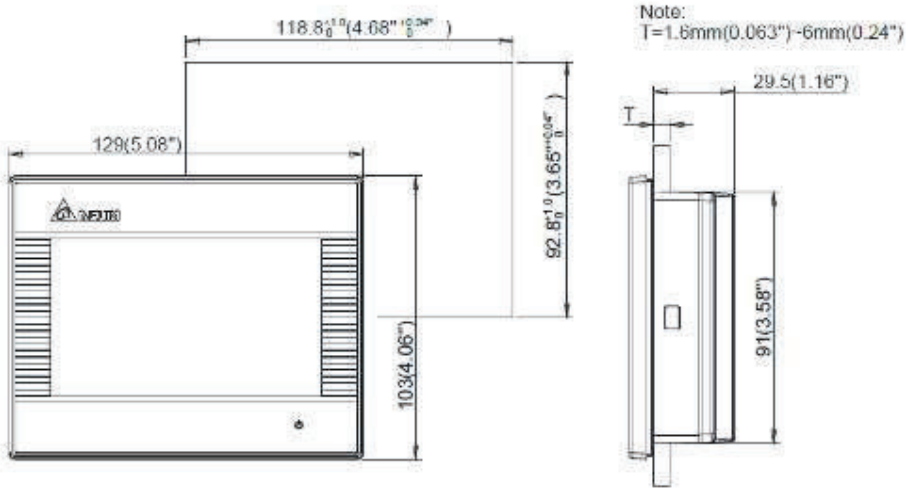
Anexo E. FICHA TÉCNICA DE LA PANTALLA TÁCTIL DELTA [13]

DOP-B03S211 / DOP-B03E211 COM1 and COM2 Ports

COM Port	PIN	MODE1		MODE2		MODE3	
		COM1	COM2	COM1	COM2	COM1	COM2
		RS-232	RS-485	RS-485	RS-485	RS-232	RS-422
PIN1	1			D+			TXD+
	2	RXD				RXD	
	3	TXD				TXD	
	4		D+		D+		RXD+
	5	GND		GND		GND	
	6			D-			TXD-
	7	RTS					
	8	CTS					
	9		D-		D-		RXD-

Note1: Blank = No Connection.

DOP-B03S211 / DOP-B03E211



MODEL		DOP-B03S211	DOP-B03E211
LCD MODULE	Display Type	4.3" TFT LCD (65536 colors)	
	Resolution	480 x 272 pixels	
	Backlight	LED Back Light (less than 20,000 hours half-life at 25°C) (Note 1)	
	Display Size	95.04 x 53.856mm	
Operation System		Delta Real Time OS	
MCU		32-bit RISC Micro-controller	
NOR Flash ROM		Flash ROM 128 MB (OS System: 30MB / Backup: 16MB / User Application: 82MB)	
SDRAM		64Mbytes	
Backup Memory		32Kbytes	
Buzzer		Multi-Tone Frequency (2K ~ 4K Hz) / 85dB	
USB		1 USB Slave Ver 2.0 1 USB Host Ver 1.1	
Serial COM Port	COM1	RS-232(supports hardware flow control) / RS-485	
	COM2	RS-422/RS-485	
Ethernet Interface		N/A	10M/100M
Perpetual Calendar		Built-in	
Cooling Method		Natural air circulation	
Safety Approval		CE / UL (Note 3)	
Waterproof Degree		IP65 / NEMA4 (Note 3)	
Operation Voltage (Note2)		DC +24V (-10% ~ +15%) (please use isolated power supply)	
Voltage Endurance		AC500V for 1 minute (between charging (DC24V terminal) and FG terminals)	
Power Consumption (Note 2)		4.8W	7.2W
Backup Battery		3V lithium battery CR2032 x 1	
Backup Battery Life		It depends on the temperature used and the conditions of usage, about 3 years or more at 25°C.	
Operation Temperature		0°C ~ 50°C	
Storage Temperature		-20°C ~ +60°C	
Ambient Humidity		10% ~ 90% RH [0 ~ 40°C], 10% ~ 55% RH [41 ~ 50°C], Pollution Degree 2	
Vibration Resistance		IEC 61131-2 Compliant 5Hz≦f＜9Hz = Continuous: 1.75mm / Occasional: 3.5mm 9Hz≦f≦150Hz = Continuous: 0.5g / Occasional: 1.0g X, Y, Z directions for 10 times	
Dimensions (W) x (H) x (D) mm		129 x103 x 39	
Panel Cutout (W) x (H) mm		118.8 x 92.8	
Weight		Approx. 230g	Approx. 264g

Anexo F. FICHA TÉCNICA DE LA FUENTE DE VOLTAJE DELTA

[15]

Input Ratings / Characteristics

Nominal Input Voltage	100-240Vac
Input Voltage Range	85-264Vac
Nominal Input Frequency	50-60Hz
Input Frequency Range	47-63Hz
Nominal DC Input Voltage	125-250Vdc
DC Input Voltage Range	120-375Vdc
Input Current	< 1.10A @ 115Vac, < 0.70A @ 230Vac
Efficiency	> 86.0% @ 115Vac, > 87.0% @ 230Vac
Max Inrush Current	< 40A @ 115Vac, < 80A @ 230Vac
Power Factor	Conform to EN61000-3-2
Leakage Current	< 1mA @ 240Vac

Output Ratings / Characteristics

Nominal Output Voltage	24Vdc
Output Voltage Tolerance	± 2% (initial set point tolerance)
Output Voltage Adjustment Range	22-28Vdc
Output Current	2.5A
Output Power	60W
Line Regulation	< 0.5% typ. (@ 85-264Vac input, 100% input)
Load Regulation	< 1% typ. (@ 85-264Vac input, 0-100% input)
Residual Ripple / PARD (20MHz)	< 50mVpp / 240mVpp @ 25°C
Rise Time	< 100ms @ nominal input (100% load, 25°C)
Start-up Time	< 3000ms @ nominal input (100% load, 25°C)
Hold-up Time	> 20ms @ 115Vac, > 125ms @ 230Vac (100% load, 25°C)
Dynamic Response (Overshoot & Undershoot O/P Voltage)	± 5% @ 10-100% load
Start-up with Capacitive Loads	8,000μF Max

Mechanical

Case Cover		Plastic
Dimensions (L x W x D)		120.6 x 32 x 113 mm
Unit Weight		0.33 kg
Indicator		Green LED (DC OK)
Cooling System		Convection
Terminal	Input	M4 x 3 Pins (Rated 300V/20A)
	Output	M4 x 2 Pins (Rated 300V/20A)
Wire	Input	AWG 22-14
	Output	AWG 22-14
Mounting Rail		Standard TS35 DIN Rail in accordance with EN60715

Environment

Surrounding Air Temperature	Operating	-20°C to +75°C
	Storage	-25°C to +85°C
Power De-rating		< 0°C to -20°C de-rate power by 1% / °C > 50°C de-rate power by 2.5% / °C > 70°C de-rate power by 4% / °C
Operating Humidity		< 95% RH (Non-Condensing)
Operating Altitude		3,000 Meters
Shock Test (Non-Operating)		IEC60068-2-27, 30G (300m/S²) for a duration of 18ms
Vibration (Non-Operating)		IEC60068-2-6, 10Hz to 150Hz @ 50m/S² (5G peak); 90 min per axis for all X, Y, Z direction
Bump		IEC60068-2-29; 11ms / 10gn
Pollution Degree		2

Protections

Overvoltage	32V ±10%, SELV Output, Hicc-up Mode, Non-Latching (Auto-Recovery)
Overload / Overcurrent	> 150% of rated load current, Hicc-up Mode, Non-Latching (Auto-Recovery)
Over Temperature	< 80°C Surrounding Air Temperature @ 100% load, Non-Latching (Auto-Recovery)
Short Circuit	Hicc-up Mode, Non-Latching (Auto-Recovery when the fault is removed)
Degree of Protection	IPX0
Protection Against Shock	Class I without PE* connection

*PE: Primary Earth

Reliability Data

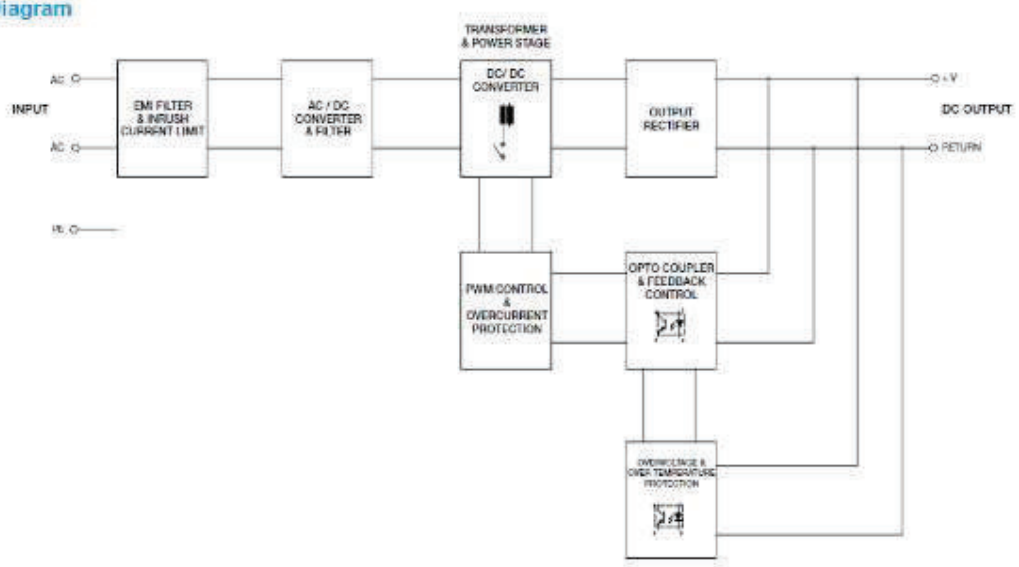
MTBF	> 800,000 hrs. as per Telcordia SR-332
Expected Cap Life Time	10 years (115Vac & 230Vac, 50% load @ 40°C)

Safety Standards / Directives

Electronic Equipment in Power Installations		EN50718 / IEC62103
Electrical Safety		SIQ to EN60950-1, UL/cUL recognized to UL60950-1, CSA C22.2 No. 60950-1, CB scheme to IEC60950-1, CSA to UL60950-1 and CSA C22.2 No. 60950-1 (File No. 181564)
Industrial Control Equipment		UL/cUL listed to UL508 and CSA C22.2 No. 107.1-01, CSA to CSA C22.2 No. 107.1-01 (File No. 181564)
Hazardous Location / ATEX		Pending
Ⓔx II 3G ATEX 94/9/EC; IECEX Test Report		Certificate No. Pending For IEC60079-0, IEC60079-15
CE		In conformance with EMC Directive 2004/108/EC and Low Voltage Directive 2006/95/EC
Material and Parts		RoHS Directive 2011/65/EU Compliant
Galvanic Isolation	Input to Output	4.0KVac
	Input to Ground	1.5KVac
	Output to Ground	1.5KVac

EMC

EMC / Emissions		CISPR22, EN55022, EN55011, FCC Title 47: Class B
Immunity to		
Electrostatic Discharge	EN61000-4-2	Level 4 Criteria A[1] Air Discharge: 15kV Contact Discharge: 8kV
Radiated Field	EN61000-4-3	Level 3 Criteria A[1] 80MHz–1GHz, 10V/M with 1kHz tone / 80% modulation
Electrical Fast Transient / Burst	EN61000-4-4	Level 3 Criteria A[1] 2kV
Surge	IEC6100-4-5	Level 3 Criteria A[1] Common Mode[2]: 2kV Differential Mode[3]: 1kV
Conducted	EN61000-4-6	Level 3 Criteria A[1] 150kHz-80MHz, 10Vrms
Power Frequency Magnetic Fields	EN61000-4-8	Level 3 Criteria A[1] 10A/Meter
Voltage Dips	EN61000-4-11	Level 3 Criteria A[1] 100% dip; 1 cycle (20ms); Self Recoverable
Low Energy Pulse Test (Ring Wave)	IEC61000-4-12	Level 3 Criteria A[1] Common Mode[2]: 2kV Differential Mode[3]: 1kV

1) Criteria A: Normal performance within the specification limits
2) Asymmetrical: Common mode (Line to earth)
3) Symmetrical: Differential mode (Line to line)

Block Diagram