



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

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.***

# **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **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**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**LUÍS MIGUEL HERRERA JUMBO**

**luismiguelhj@hotmail.com**

**ESTALIN ANDRÉS VÁSQUEZ TORRES**

**estalinvasquez@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. RODRIGO RUIZ**

**rodrigorui@epn.edu.ec**

**Quito, Julio 2011**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Luís Miguel Herrera Jumbo y Estalin Andrés Vásquez Torres, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por normativa institucional vigente

---

Luis Miguel Herrera Jumbo

CI: 1104455454

---

Estalin Andrés Vásquez Torres

CI: 1717006850

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que bajo mi supervisión, el presente proyecto de titulación fue realizado en su totalidad por los señores: LUIS MIGUEL HERRERA JUMBO Y ESTALIN ANDRÉS VÁSQUEZ TORRES.

---

Ing. Rodrigo Ruíz

DIRECTOR DEL PROYECTO

---

Ing. Álvaro Aguinaga PhD.

COLABORADOR

## **DEDICATORIA**

Este proyecto dedico con todo mi corazón a mis padres ya que con su amor, cariño y apoyo incondicional inculcaron en mí la fortaleza necesaria para conseguir esta profesión, han sido siempre una firme plataforma en mi vida y ejemplo palpable de lucha y sacrificio.

## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS por darme la vida y la satisfacción de contar con padres extraordinarios en los que siempre puedo confiar.

A mis hermanos y familia que reside en Quito por el continuo apoyo y cariño brindado. Su ayuda eficaz y desinteresada en los momentos difíciles facilitó la consecución de este objetivo.

A mis compañeros por ser personas solidarias, honestas y colaboradoras.

Al Ingeniero Rodrigo Ruíz, por su paciencia, consejos, sugerencias y acertada asesoría en el presente proyecto.

LUIS MIGUEL HERRERA JUMBO.

## **DEDICATORIA**

Este proyecto está dedicado a toda mi familia, ya que el haber alcanzado esta meta tan importante es resultado de todo su apoyo y amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme bendecido a lo largo de mi vida.

A mi familia

A mis compañeros y amigos en el transcurso de mi vida.

Al Ingeniero Rodrigo Ruiz por sus consejos y asesoría eficaz para la realización de este Proyecto de Titulación.

ESTALIN ANDRÉS VÁSQUEZ TORRES.

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
RESUMEN .....	xv
PRESENTACIÓN .....	xvi
CAPÍTULO 1 .....	1
CONTROL AUTOMÁTICO .....	1
1.1 DEFINICIÓN.....	1
1.1.1 LAZO REALIMENTADO.....	1
1.2 SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	2
1.2.1 TEMPERATURA .....	2
1.2.2 ESCALAS DE MEDICIÓN .....	3
1.2.3 TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA .....	4
1.2.4 TERMOCUPLAS .....	6
1.2.5 TIPOS DE TERMOCUPLAS .....	8
1.3 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (plc's).....	10
1.3.1 PRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LOS PLC's .....	10
1.3.2 ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	10
1.3.3 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN .....	11
1.3.4 OPERANDOS DE PROGRAMACIÓN.....	11
1.3.5 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN PLC.....	11
1.4 TRATAMIENTO TÉRMICO .....	13
1.4.1 RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	13
1.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	16
1.5 HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	27

1.5.1 SEGÚN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO .....	27
1.5.2 SEGÚN SU ATMÓSFERA .....	29
CAPÍTULO 2 .....	31
DESCRIPCIÓN Y ESTUDIO DE LOS SISTEMAS .....	31
2.1 ESTUDIO DEL SISTEMA DEL HORNO.....	31
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	31
2.1.2 ESTRUCTURA.....	32
2.2 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	35
2.2.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA.....	35
2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	38
2.3.1 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE CONTROL .....	38
2.3.2 CONSIDERACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL PLC Y SOFTWARE DE CONTROL .....	40
2.3.3 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL .....	41
2.3.4 NÚMERO DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA DE CONTROL .....	45
2.4 SISTEMAS SCADA.....	45
2.4.1 INTRODUCCIÓN .....	45
2.4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SCADA.....	46
2.4.3 FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA.....	46
CAPÍTULO 3 .....	48
DESARROLLO DEL SOFTWARE.....	48
3.1 TWIDO SOFT .....	48
3.1.1 GENERALIDADES.....	48
3.1.2 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.....	50
3.1.3 OBJETOS DEL LENGUAJE TWIDO SOFT .....	50
3.1.4 DIRECCIONAMIENTOS DE OBJETOS EN TWIDO SOFT.....	51
3.1.5 COMUNICACIONES DEL PLC TWIDO .....	53



3.1.6 DESCARGA DEL PROGRAMA AL PLC .....	55
3.2 LABVIEW .....	57
3.2.1 INSTRUMENTOS VIRTUALES.....	57
3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PARA EL PLC.....	59
3.3.1 INTRODUCCIÓN .....	59
3.3.2 PROGRAMA PRINCIPAL.....	60
3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DEL PLC .....	71
3.4 DIAGRAMAS DE CONEXIONES .....	75
3.4.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES AL PLC .....	75
3.4.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL CIRCUITO DE CONTROL Y PROTECCIÓN .....	75
3.4.3 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL CIRCUITO DE POTENCIA .....	75
3.5 INTERFAZ DESARROLLADA EN LABVIEW .....	77
3.5.1 PANTALLA FRONTAL .....	77
3.5.2 PANTALLA MODO DE OPERACIÓN.....	77
3.5.3 DIRECCIONAMIENTO MODBUS .....	80
CAPÍTULO 4 .....	84
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	84
4.1 INTRODUCCIÓN. ....	84
4.1.1 PRUEBAS EN VACÍO PARA CINCO ESCALONES PROGRAMADOS.....	84
4.1.2 REALIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	93
4.2 ANÁLISIS METALOGRAFICO. ....	120
CAPÍTULO 5 .....	128
MANUAL DE PROGRAMACIÓN Y OPERACIÓN DEL HORNO LINDBERG ...	128
5.1 INSTALACIÓN DEL EJECUTABLE DE CONTROL DEL HORNO.....	128
5.1.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	128
5.1.2 PASOS PARA LA INSTALACIÓN .....	128

5.2 OPERACIÓN Y MANEJO DEL SISTEMA.....	130
5.3 ERRORES Y SOLUCIONES.....	141
5.4 PRECAUCIONES DE USO.....	141
5.4 MANTENIMIENTO.....	142
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	143
CONCLUSIONES.....	143
RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS.....	149
ANEXO No. 1.....	150
Hoja de Información de Seguridad de Producto Refractario:.....	150
ANEXO No. 2.....	151
Manual Usuario para el PLC Twido TWDLCAA24DRF:.....	151
ANEXO No. 3.....	152
Programa en TwidoSoft:.....	152
ANEXO No. 4.....	153
Programa en LABVIEW:.....	153
ANEXO No. 5.....	154
Catálogo de los aceros utilizados en los Tratamientos Térmicos.....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Velocidades de enfriamiento en el centro de una muestra de acero inoxidable de ½ pulg de diámetro por 2½ pulg de largo. ....	16
Tabla 1-2: Tipos de recocidos. ....	17
Tabla 1-3: Tipos de temple. ....	23
Tabla 1-4: Efecto de la frecuencia en la profundidad de la dureza de la porción externa. ....	26
Tabla 1-5: Tipos de revenido. ....	27
Tabla 2-1: Datos de temperatura y tiempo de conexión paralela y en serie. ....	36
Tabla 2-2: Elementos de control del sistema. ....	39
Tabla 2-3: PLC Twido TWDAA24DRF. ....	43
Tabla 2-4: Configuración del Módulo Analógico TWDALM3LT ....	44
Tabla 2-5: Entradas y Salidas Digitales y Analógicas del sistema de control. ....	45
Tabla 3-1: Objetos del lenguaje TwidoSoft. ....	50
Tabla 3-2: Elementos de direccionamiento de bits. ....	52
Tabla 3-3: Elementos de direccionamiento de objetos de palabras. ....	52
Tabla 3-4: Direccionamiento Modbus para PLC TWIDO. ....	54
Tabla 3-5: Entradas y salidas digitales y analógicas direccionadas del programa. ....	61
Tabla 3-6: Marcas digitales del programa. ....	61
Tabla 3-7: Marcas analógicas del programa. ....	62
Tabla 3-8: Parámetros de los temporizadores. ....	64
Tabla 3-9: Datos de Temperatura Vs. Tiempo de enfriamiento natural del horno. ....	65
Tabla 3-10: Variables que se programan en el HMI y sus respectivas marcas internas. ....	68
Tabla 3-11: Componentes para la pantalla de proceso. ....	78
Tabla 3-12: Elementos del Menú de Programación. ....	79
Tabla 3-13: Direccionamiento Modbus de las variables digitales. ....	82
Tabla 3-14: Direccionamiento Modbus de las variables analógicas. ....	83
Tabla 4-1: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante la prueba de cinco escalones. ....	85

Tabla 4-2: Tratamientos Térmicos para el acero AISI 1045.....	89
Tabla 4-3: Tratamientos Térmicos para el acero V320. ....	90
Tabla 4-4: Tratamientos Térmicos para el acero K100. ....	91
Tabla 4-5: Tratamientos Térmicos para el acero K110. ....	92
Tabla 4-6: Códigos de las probetas testigo y tratadas térmicamente de los aceros AISI 1045, V320, K100 y K110.....	93
Tabla 4-7: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el recocido del acero 1045.....	95
Tabla 4-8: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el normalizado del acero 1045.....	99
Tabla 4-9: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero 1045.....	103
Tabla 4-10: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero V320. ....	107
Tabla 4-11: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero V320. ....	111
Tabla 4-12: Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero K110. ....	116
Tabla 4-13: Durezas de las probetas testigo y tratadas térmicamente.....	126
Tabla 5-1: Componentes para la pantalla de proceso.....	133
Tabla 5-2: Elementos del Menú de Programación. ....	134

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Lazo de control automático. ....	1
Figura 1-2: Comparación de las escalas de temperatura. ....	3
Figura 1-3: Conexión de un termómetro de resistencia. ....	5
Figura 1-4: Efecto termopar. ....	7
Figura 1-5: Termocupla tipo K. ....	8
Figura 1-6: Termocupla tipo J. ....	9
Figura 1-7: Termocupla tipo T. ....	9
Figura 1-8: Termocupla tipo E. ....	10
Figura 1-9: Esquema de la estructura de un PLC. ....	10
Figura 1-10: Representación de un Tratamiento Térmico. ....	13
Figura 1-11: Diagrama Hierro – Carburo de Hierro. ....	14
Figura 1-12: Intervalo de normalización, recocido y endurecimiento para aceros al carbono. ....	18
Figura 1-13: Representación esquemática del porcentaje de martensita formada como función de la temperatura. ....	20
Figura 1-14: Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero templado en agua fría. ....	21
Figura 1-15: Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de ½ pulg de diámetro por 2½ pulg de largo, sin agitación. ....	22
Figura 1-16: Representación gráfica de los tipos de temple. ....	23
Figura 1-17: Arrollamientos para unidades de alta frecuencia y los modelos caloríficos obtenidos por cada una. ....	25
Figura 1-18: Horno Batch a gas para temple integral. ....	28
Figura 1-19: Horno eléctrico de tambor rotativo. ....	28
Figura 1-20: Horno de cámara con atmósfera controlada. ....	29
Figura 1-21: Hornos generadores de Atmósferas, Endotérmicas y Exotérmicas. ....	30
Figura 2-1: Horno eléctrico de tratamientos térmicos LINDBERG. ....	31
Figura 2-2: a) Armazón del Horno, b) Cubierta del Horno. ....	32
Figura 2-3: Dimensiones máximas del horno de tratamientos térmicos y sistema de apertura de la puerta. ....	33

Figura 2-4: Puerta del Horno reforzada con manta refractaria. ....	33
Figura 2-5: Cámara de Calentamiento. ....	34
Figura 2-6: Espacio de conexión de las resistencias de calentamiento del horno. ....	35
Figura 2-7: Temperatura Vs. Tiempo de conexión paralela y en serie. ....	36
Figura 2-8: Esquema de conexión de resistencias. ....	37
Figura 2-9: Pirámide de Automatización. ....	38
Figura 2-10: Elementos de control del sistema. ....	39
Figura 2-11: Esquema del sistema de control. ....	40
Figura 2-12: PLC Twido TWDAA24DRF. ....	42
Figura 2-13: Conexión de Termocupla en el Módulo TWDALM3LT. ....	43
Figura 3-1: Entorno de TwidoSoft. ....	49
Figura 3-2: Formato de direccionamiento de objetos de bits. ....	51
Figura 3-3: Formato de direccionamiento de objetos de palabras. ....	52
Figura 3-4: Formato de direccionamiento de entradas y salidas. ....	53
Figura 3-5: Configuración de parámetros de comunicación TWIDO. ....	55
Figura 3-6: Conexión PLC TWIDO con PC. ....	56
Figura 3-7: Transferencia del programa en el controlador. ....	56
Figura 3-8: Imagen de un Instrumento Virtual (VI) en LABVIEW. ....	57
Figura 3-9: Panel Frontal. ....	58
Figura 3-10: Diagrama de bloques. ....	58
Figura 3-11: Esquema del sistema de control en lazo cerrado para el horno. ....	59
Figura 3-12: Configuración del modulo TWDALM3LT. ....	60
Figura 3-13: Funcionamiento de los temporizadores TON. ....	63
Figura 3-14: Temperatura Vs. Tiempo de enfriamiento natural del horno. ....	65
Figura 3-15: Funcionamiento del horno. ....	66
Figura 3-16. Variables del proceso. ....	67
Figura 3-17: Proceso de la segunda rampa en el programa. ....	70
Figura 3-18: Gráfica del control ON-OFF para el horno. ....	71
Figura 3-19: Diagrama de flujo del Programa. ....	74
Figura 3-20: Diagrama del circuito de control y protección. ....	75
Figura 3-21: Diagrama del circuito de potencia. ....	75
Figura 3-22: Diagrama de conexiones del PLC. ....	76

Figura 3-23: Pantalla Frontal del programa.....	77
Figura 3-24: Pantalla de proceso para el control del horno.....	78
Figura 3-25: Menú de Programación.....	79
Figura 3-26: Creando la librería Modbus.....	80
Figura 3-27: a) Configuración Modbus Labview. b) Configuración Modbus Twido.....	81
Figura 3-28: Creando variables del protocolo Modbus.....	81
Figura 4-1: Rampa programada para la prueba en vacío.....	84
Figura 4-2: Temperatura real y teórica vs tiempo para la prueba de cinco escalones.....	88
Figura 4-3: Probetas testigo y probeta elaboradas para someterlas a diversos tratamientos térmicos.....	93
Figura 4-4: Caja metálica y carbón utilizados en la protección de las probetas...	94
Figura 4-5: Régimen de tratamiento térmico de recocido del acero 1045.....	94
Figura 4-6: Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el recocido del acero 1045.....	98
Figura 4-7: Régimen de tratamiento térmico de normalizado del acero 1045.....	98
Figura 4-8: Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el normalizado del acero 1045.....	102
Figura 4-9: Régimen de tratamiento térmico de temple del acero 1045.....	102
Figura 4-10: Proceso de templado de las probetas en diferentes medios.....	103
Figura 4-11: Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero 1045.....	106
Figura 4-12: Régimen de tratamiento térmico de temple del acero V320.....	107
Figura 4-13: Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero V320.....	110
Figura 4-14: Régimen de tratamiento térmico de temple del acero V320.....	111
Figura 4-15: Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero K100.....	115
Figura 4-16: Régimen de tratamiento térmico de temple del acero K110.....	115
Figura 4-17: Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero K110.....	120
Figura 4-18: Metalografías del acero 1045 probeta testigo.....	121

Figura 4-19: Metalografías del acero 1045, probeta recocida. ....	121
Figura 4-20: Metalografías del acero 1045, probeta normalizada. ....	122
Figura 4-21: Metalografías del acero 1045 probeta templada. ....	122
Figura 4-22: Metalografías del acero V320, probeta testigo. ....	123
Figura 4-23: Metalografías del acero V320, probeta templada. ....	123
Figura 4-24: Metalografías del acero K100, probeta testigo. ....	124
Figura 4-25: Metalografías del acero K100, probeta templada. ....	124
Figura 4-26: Metalografías del acero K110, probeta testigo. ....	125
Figura 4-27: Metalografías del acero K110, probeta testigo. ....	125
Figura 5-1: Proceso de direccionamiento del ejecutable del HMI. ....	129
Figura 5-2: Contrato de licencia de Software. ....	129
Figura 5-3: Elementos que se instalan. ....	130
Figura 5-4: Instalación del ejecutable. ....	130
Figura 5-5: Encendido del PLC. ....	131
Figura 5-6: Cable de programación TSX PCX 1031. ....	131
Figura 5-7: Guardando un archivo del proceso. ....	132
Figura 5-8: Panel Frontal del HMI. ....	132
Figura 5-9: Pantalla de proceso del HMI. ....	133
Figura 5-10: Menú de Programación del HMI. ....	134
Figura 5-11: Paso CONFIGURACIÓN. ....	135
Figura 5-12: Paso GRAFICAR. ....	136
Figura 5-13: Alarmas del Proceso. ....	137
Figura 5-14: Paso TRANSFERENCIA-CPU. ....	137
Figura 5-15: Luz indicadora del funcionamiento del proceso. ....	138
Figura 5-16: Luz indicadora del funcionamiento de las resistencias. ....	139
Figura 5-17: Luz indicadora de cada escalón. ....	139
Figura 5-18: Final del proceso. ....	140
Figura 5-19: Alarma de Proceso Finalizado. ....	140



## RESUMEN

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN debido a la innovación tecnológica, ha destinado recursos económicos al campo de la investigación, con lo cual es posible realizar estudios en el área de tratamientos térmicos y específicamente en lo referente a como diseñar un sistema SCADA para controlar la temperatura de un horno tipo mufla del Laboratorio de Tratamientos Térmicos.

La finalidad de este proyecto era contar con un módulo didáctico que permita entender claramente cómo se desarrollan los tratamientos térmicos en tiempo real, además tener un horno de mayor versatilidad que permita tratar térmicamente piezas de mayor tamaño y programar diversas temperaturas de calentamiento, tiempos de permanencia y velocidades de calentamiento a través de una interfaz gráfica amigable con el usuario.

Para la consecución de este objetivo se diseñó, programó e instaló un sistema de control de supervisión, adquisición y almacenamiento de datos, empleando un PLC, el cual se programó utilizando el software TWIDO SOFT y mediante el programa LABVIEW se elaboró la interfaz gráfica del horno LINDBERG del laboratorio de tratamientos térmicos. Previamente se construyó la estructura metálica y la puerta para garantizar la funcionalidad y operatividad del horno.

En el presente proyecto se muestra como se realizó el estudio del sistema de control para el horno, las fases que se deben seguir para el diseño del HMI, y como se realizan las pruebas en vacío y diferentes tratamientos térmicos para llegar a conseguir la calibración del sistema de control. Además se realizó un análisis metalográfico y de dureza de las probetas con el fin de corroborar que estas hayan seguido el régimen programado.

Los pasos para programar las diferentes rampas están sistematizados de tal manera que no se necesita tener un bagaje amplio en el campo de la programación ya que el HMI cuenta con diversas señales visuales y auditivas que indican posibles errores cometidos en el transcurso de la programación.

Finalmente se elaboró un manual de operación y programación del horno, con el objetivo de facilitar a los usuarios la manipulación del sistema de control y evitar posibles daños del equipo y errores en el ingreso de datos.

## **PRESENTACIÓN**

El presente proyecto de titulación surge de la necesidad de contar con un horno para tratamientos térmicos controlado por un PLC y mediante el diseño de la interface Hombre-Máquina (HMI) programar, supervisar, visualizar y almacenar los datos obtenidos durante el proceso de tratamiento térmico de un acero (Sistema SCADA), esto con la finalidad de brindar al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional, un equipo didáctico que mejore notablemente la comprensión de estos procesos, a través de un análisis en tiempo real de los mismos.

El propósito de este proyecto es ampliar nuestro conocimiento en el campo de la automatización de procesos, a través de la resolución de los problemas que se presentan cuando se trata de establecer la comunicación PLC-PC, programación del PLC y el diseño de la interface gráfica. Dar solución a estos problemas implica una investigación adicional a la instrucción recibida durante la formación de un ingeniero mecánico, contribuyendo al mejoramiento de su perfil profesional.

Los aportes realizados comprenden el diseño de una interfaz hombre - máquina sencilla, de fácil manejo que permite programar cinco rampas con diferentes temperaturas de calentamiento, tiempos de permanencia y velocidades de calentamiento y/o enfriamiento, visualizar en tiempo real la variación de temperatura respecto al tiempo y almacenar automáticamente los valores de temperatura y tiempo en una hoja de Excel para intervalos de tiempo establecidos. Esto sin duda facilita al operador la adquisición, manipulación y análisis de datos permitiéndole tener una mayor visión de la forma como se está desarrollando el tratamiento térmico. Además se diseñó un sistema de control de temperatura ON/OFF para el horno LINDBERG que tiene bajos márgenes de error en los rangos donde generalmente se producen los tratamientos térmicos, esto garantiza la eficacia de los mismos. La versatilidad de este sistema de control es amplia, pudiéndolo utilizar en cualquier proceso industrial en donde la temperatura sea la variable a controlar.

Finalmente se elaboró un manual de operación del sistema de control, el cual permite el manejo adecuado del mismo.

Todo el proceso de investigación ejecutado para conseguir este objetivo se resume en cinco capítulos.

El primer capítulo muestra las generalidades del control automático, sensores, controladores, un resumen detallado de todos los tratamientos térmicos que se realizan en la industria y los tipos de hornos existentes.

El segundo capítulo describe el sistema de control, particularmente el controlador TWIDO TWDLCAA24DRF, el modulo analógico TWDALM3LT utilizado, y se da una breve descripción de los programas utilizados para la programación, y la adquisición de datos. Además se describe como se realizó la construcción de la estructura del horno.

El capítulo tres comprende el diseño del programa en TwidoSoft para el control del PLC y del HMI en Labview para la adquisición, almacenamiento y visualización de datos, las pantallas que dispone el HMI para el control desde el computador y las conexiones eléctricas realizadas en la caja de control del horno.

El capítulo cuatro muestra los resultados de las pruebas realizadas al sistema de control del horno para constatar el correcto funcionamiento del mismo, calibrándolo mediante pruebas en vacío y diversos tratamientos térmicos a probetas de diferentes tipos de materiales, complementando además con un análisis metalográfico y de durezas de las probetas con la finalidad de confirmar que estos hayan alcanzado y permanecido a las temperaturas programadas

El capítulo cinco lo constituye un manual de programación y operación del horno, indica además las virtudes del sistema de control y posibles errores que se pueden cometer al momento de realizar la programación, además se muestra recomendaciones de seguridad al momento de utilizar el horno y como efectuar el mantenimiento del sistema de control.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante todo el proceso de diseño del sistema de control del horno LINDBERG tipo mufla.

# CAPÍTULO 1

## CONTROL AUTOMÁTICO

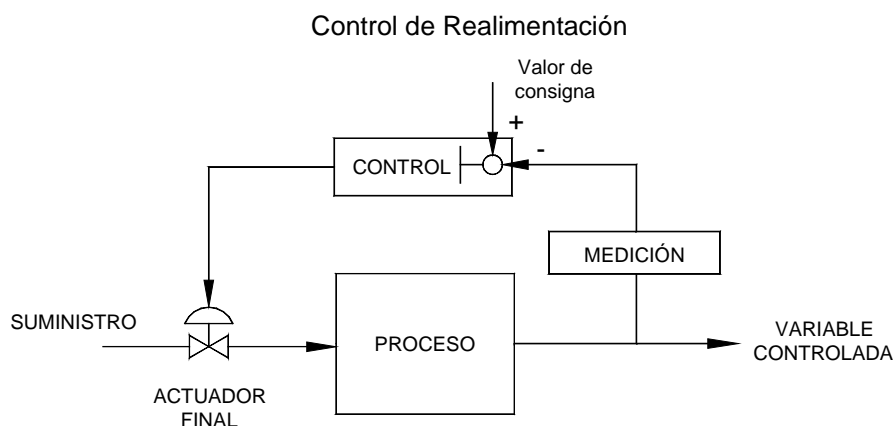
### 1.1 DEFINICIÓN

Es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

El elemento más importante de cualquier sistema de control automático es el lazo de control realimentado básico.

#### 1.1.1 LAZO REALIMENTADO

El lazo de control realimentado simple sirve para ilustrar los cuatro elementos principales de cualquier lazo de control (Ver Figura 1-1).



**Figura 1-1:** Lazo de control automático.

La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo. Mediciones corrientes usadas en la industria incluyen caudal, presión, mediciones analíticas tales como PH, conductividad, etc.

##### 1.1.1.1 Realimentación

Es la propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida sea comparada con la entrada al sistema de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Se dice que existe realimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema

### **1.1.1.2 Características de la Realimentación**

Los rasgos más importantes que la presencia de realimentación imparte a un sistema son:

- Aumento de la exactitud.
- Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones de las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

### **Actuador Final**

Por cada proceso debe haber un actuador final, que regule el suministro de energía o material al proceso y cambie la señal de medición.

### **El Proceso**

Es cualquier cambio de estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema, dentro de cada proceso se establecen variables que regulan estos cambios de estado y son las que serán objeto de medición y posterior control.

### **El Controlador Automático**

Es el último elemento del lazo y su trabajo es controlar la medición. "Controlar" significa mantener la medición dentro de límites aceptables. Todos los controladores automáticos usan las mismas respuestas generales, a pesar de que los mecanismos internos y las definiciones dadas para esta respuesta pueden ser ligeramente diferentes de un fabricante a otro.

## **1.2 SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA**

### **1.2.1 TEMPERATURA**

Es una manifestación del promedio de energía cinética, ondulatoria y de traslación de las moléculas de una sustancia.

Cuando un cuerpo se calienta, la velocidad de vibración de sus moléculas aumenta rápidamente. Esto produce diferentes efectos físicos, por ejemplo: en un metal varía su dimensión física así como su resistencia eléctrica; en el caso de un

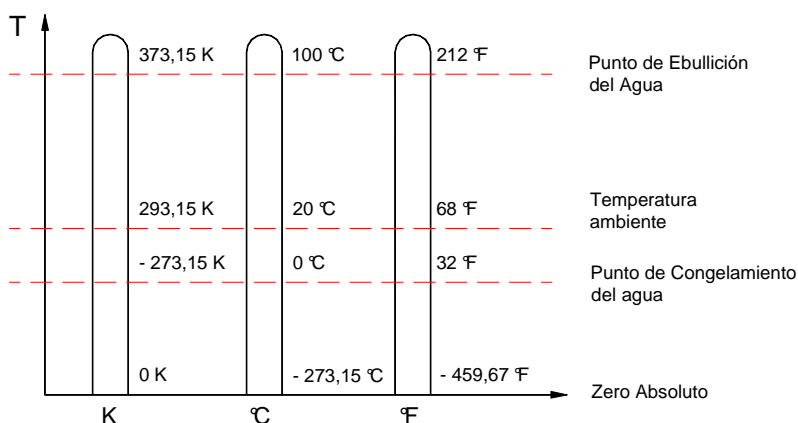
fluido contenido en un recipiente cerrado, su presión aumenta. En ambos casos, la temperatura se eleva como resultado del calor ganado. Físicamente hablando, la temperatura es uno de los medios para medir la energía dentro de un cuerpo. Tal energía se almacena en los movimientos moleculares y atómicos desordenados de un cuerpo y aumentan con un aumento simultáneo en la temperatura.

### 1.2.2 ESCALAS DE MEDICIÓN

Existen tres escalas usualmente para medir la temperatura:

- La escala Fahrenheit (°F), que es comúnmente usada en países de habla inglesa.
- La escala Celsius (°C), es más compatible con el formato basado en los decimales del Sistema Internacional (SI).
- La escala Kelvin, que está basada en la idea del cero absoluto, la temperatura teórica en la que todo el movimiento molecular se para y no se puede detectar ninguna energía.

A continuación se puede apreciar una comparación de las tres escalas de temperatura antes mencionadas (Ver Figura 1-2).



**Figura 1-2:** Comparación de las escalas de temperatura.

Una medida de la temperatura en cualquiera de estas escalas puede ser fácilmente convertida en base a la siguiente ecuación:

$$\frac{^{\circ}C}{5} = \frac{^{\circ}F - 32}{9} = \frac{K - 273,15}{5}$$

Para poder obtener una medición real es indispensable saber qué elemento o dispositivo utilizar como transductor de temperatura.

### **1.2.3 TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA**

Los transductores de temperatura son todos aquellos dispositivos que se pueden utilizar para realizar una medición de temperatura en cualquier aplicación. También son denominados como sensores de temperatura. Utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura, estos son:

- Variación de resistencia en un conductor (constituido por sondas de resistencia)
- Variación de resistencia de un semiconductor (constituido por termistores)
- Fem. creada en la unión de dos metales distintos (termopares)
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación)
- Otros fenómenos utilizados en laboratorio (como por ejemplo: velocidad de los sonidos en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal, etc.).

A continuación se enumeran cinco tipos de transductores de temperatura que son los más corrientes y los que más se usan en los sistemas de adquisición de datos de temperatura a nivel de la industria:

1. Termómetros de Resistencia.
2. Detectores de temperatura de resistencia (RTD).
3. Termistores.
4. Sensores de Circuitos Integrados (IC).
5. Los termopares, que son los que se consideran para este proyecto.

#### **1.2.3.1 Termómetros de Resistencia**

Normalmente el elemento de detección es un arrollamiento de hilo que es muy fino y que está bobinado entre capas de material aislante y cubierto con un revestimiento de vidrio o de cerámica para protegerlo. El hilo que forma el conductor es de un metal puro el cual contiene un coeficiente de resistencia de temperatura positivo constante. La relación entre el cambio de temperatura, y el cambio de resistencia puede verse en la expresión lineal siguiente:

$$R_t = R_o(1 + \alpha \Delta t)$$

Donde :

$R_o$  = Resistencia en ohmios a 0 °C

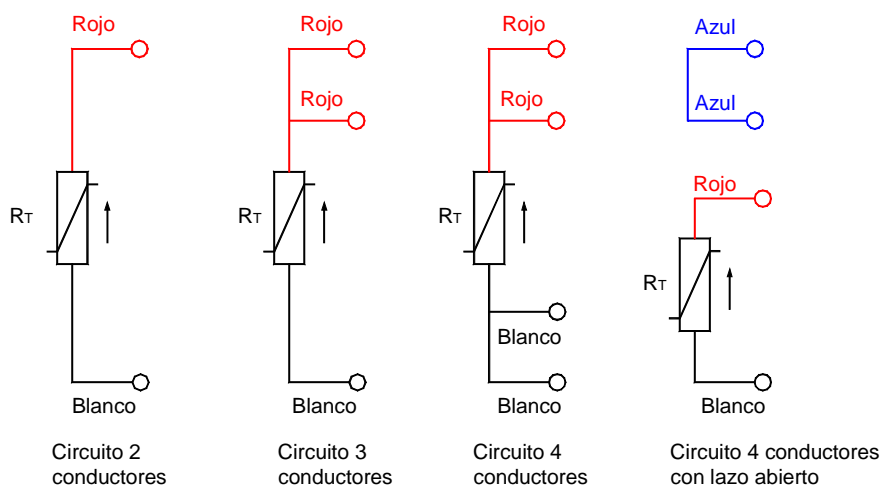
$R_t$  = Resistencia en ohmios a t °C

$\Delta t$  = Variación de Temperatura

$\alpha$  = coeficiente de resistencia de temperatura

Normalmente los sensores de resistencia están disponibles en tipo PTC (Coeficiente Positivo de Temperatura) y NTC (Coeficiente Negativo de temperatura).

Comercialmente existen de dos, tres y cuatro hilos, su conexión se puede hacer de la siguiente forma (Ver Figura 1-3):



**Figura 1-3:** Conexión de un termómetro de resistencia.

### 1.2.3.2 Termistores

Estos están hechos por semiconductores electrónicos que tienen un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado y que presentan una curva característica lineal tensión-corriente siempre que la temperatura se mantenga constante.

La relación entre la resistencia y la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_t = R_o e^{B \left( \frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_o} \right)}$$

$R_t$  = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta  $T_t$

$R_o$  = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia  $T_o$



$B$  = Constante dentro de un intervalo de temperatura

$T_t$  = Temperatura absoluta

$T_o$  = Temperatura de referencia

$e$  = Número exponencial

En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que las sondas de resistencias, y permiten incluso intervalos de medida de  $1^\circ\text{C}$ . Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de fracciones de segundo a minutos.

#### **1.2.3.4 Sensores de Circuitos Integrados (IC)**

Resuelven el problema de la linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento. Son, además, relativamente económicos y bastante precisos a temperatura ambiente.

Sin embargo, los sensores de IC no tienen tantas opciones de configuraciones del producto o de gama de temperaturas, y además son dispositivos activos, por lo que se requiere de una fuente de alimentación.

#### **1.2.4 TERMOCUPLAS**

Los termopares se utilizan extensamente, ya que ofrecen una gama de temperaturas mucho más amplia y una construcción más robusta que otros tipos. Es importante entender la naturaleza de estos dispositivos.

Las leyes de la termoelectricidad que rigen a las termocuplas se mencionan a continuación:

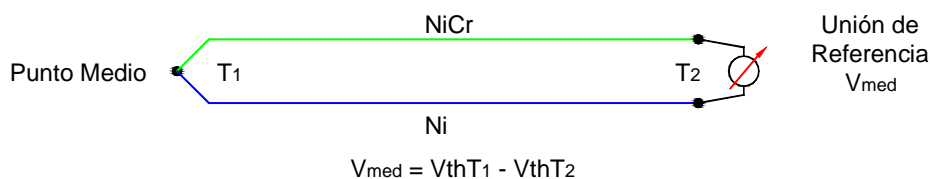
**PRIMERA LEY:** En un circuito formado por un solo metal la Fem. generada es cero.

**SEGUNDA LEY:** Si se interrumpe un circuito termoeléctrico en una de sus uniones intercalándose un nuevo metal, la Fem. generada por el circuito no cambia la condición de que los extremos del nuevo metal sean mantenidos a la misma temperatura que había en el punto de interrupción y de que la temperatura en la otra unión permanezca invariable.

**TERCERA LEY:** En un circuito formado por dos metales diferentes la Fem. generada es diferente de cero, siempre y cuando las temperaturas sean diferentes en la unión caliente con respecto de la unión fría.

La razón entre la variación de un valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancias que los separa es la base del comportamiento de un termopar. Si se unen dos alambres de distinto material por ambos extremos, y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno es conocido como efecto Seebeck, en honor al físico alemán Thomas Seebeck.

La Figura 1-4 muestra este efecto con un termopar que se compone sencillamente de dos hilos de diferentes metales unidos en un extremo y abiertos en el otro, entonces la tensión que pasa por el extremo abierto es una función tanto de la temperatura de la unión como de los metales utilizados en los dos hilos:



Donde :

$V_{med}$  = Voltaje de referencia

$V_{thT_1}$  = Voltaje en el punto de medición.

$V_{thT_2}$  = Voltaje en la unión de referencia.

**Figura 1-4:** Efecto termopar.

Los termopares son más utilizados a nivel de la industria porque miden solamente temperaturas relativas, mientras que los RTD, termistores y sensores de IC miden temperaturas absolutas.

Los alambres que han sido escogidos para la fabricación de los diferentes termopares, deben de considerar características como:

- Resistencia a la corrosión, oxidación y cristalización.

- Desarrollo de una Fem. relativamente alta, la más grande generada por su termopar comercial es cerca de 50 milivoltios.
- Una relación entre temperatura y Fem. de tal manera que el aumento de ésta sea aproximadamente uniforme al aumento de la temperatura
- Precio.

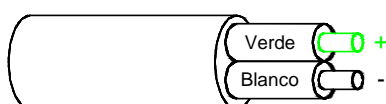
### 1.2.5 TIPOS DE TERMOCUPLAS

Debido a que en la industria se manejan varios tipos de temperaturas de acuerdo a las diferentes aplicaciones, existen diversos tipos de termocuplas y para identificarlas la Comisión Electrónica Internacional (IEC), establece un código internacional de colores, según la norma IEC 584.3:1989 estas son:

#### 1.2.5.1 Tipo K

La termocupla tipo K es una de las dos que más se utilizan en la industria. Está formada por una aleación de Chromel (Ni 64%, Fe 25% y Cr 11%), constituye la punta positiva (+) y Alumel (Ni 94%, Mn 3%, Al 2% y Si 1%), constituye la punta negativa (-).

La termocupla tipo K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300°C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos. La punta positiva es de color verde, y la punta negativa es blanca (Ver Figura 1-5).



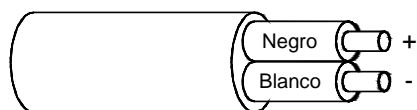
**Figura 1-5:** Termocupla tipo K

#### 1.2.5.2 Tipo J

La termocupla tipo J es otra de las más utilizadas en la industria. Su construcción está dada por la aleación de Fe (libre de impurezas), constituye la punta positiva (+) y Constantan (Cu 60% y Ni40%), constituye la punta negativa (-).

El uso de este tipo de termocupla radica principalmente en la industria del plástico, del hule en lo que respecta a extrusión e inyección, y fundición de metales a bajas temperaturas como el aluminio.

La temperatura de operación de este elemento es de 20°C a 700°C. La punta positiva es de color negro y la negativa es de color blanca (Ver Figura 1-6)



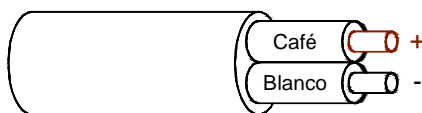
**Figura 1-6:** Termocupla tipo J.

### 1.2.5.3 Tipo T

Esta termocupla es una aleación de Cobre (exento de impurezas), constituye la punta (+) y Constantan (Cu 60% y Ni40%), constituye la punta negativa (-).

La respuesta de esta termocupla es similar a la tipo J, midiendo hasta un máximo de 300°C, por lo que es recomendable por su buena señal, teniendo alta resistencia a la oxidación.

Este tipo de termocupla es utilizada en la industria de alimentos, aunque algunas veces ha sido desplazada por las PT100. La punta positiva es de color café y la punta negativa es de color blanco (Ver Figura 1-7).



**Figura 1-7:** Termocupla tipo T.

### 1.2.5.4 Tipo PT100

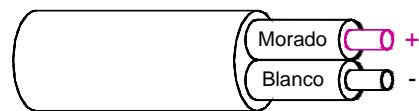
Este es un sensor de temperatura particular de los RTD, que consiste en un alambre de platino cuya resistencia eléctrica aumenta al elevarse la temperatura del ambiente.

Normalmente las PT100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material.

Estos elementos tienen un costo mayor y mecánicamente no son tan rígidos como los elementos mencionados anteriormente. Su temperatura de aplicación es de 100°C a 200°C.

### 1.2.5.6 Tipo E

Su temperatura máxima de operación es de 700°C. Es una aleación de Chromel (Ni 64%, Fe 25% y Cr 11%), constituye la punta positiva (+) y Constantan (Cu 60% y Ni40%), constituye la punta negativa (-). La punta positiva es de color morado y la punta negativa es de color blanco (Ver Figura 1-8)



**Figura 1-8:** Termocupla tipo E.

Descrito lo anterior, para este diseño, se considera utilizar una termocupla tipo K, ya que su rango máximo de temperatura es (menor de 1200°C).

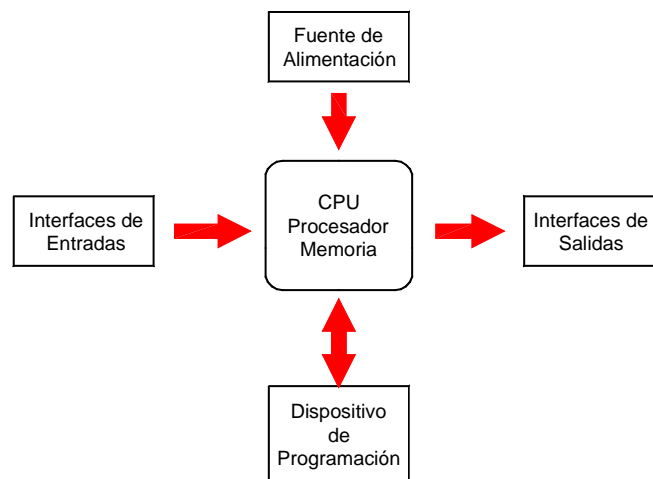
### 1.3 CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES (PLC's)

La definición más apropiada es: Sistema Industrial de Control Automático que trabaja bajo una secuencia almacenada en memoria, de instrucciones lógicas. Es un sistema porque contiene todo lo necesario para operar, e industrial por tener todos los registros necesarios para operar en los ambientes hostiles encontrados en la industria.

#### 1.3.1 PRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LOS PLC's

Se introdujeron por primera vez en la industria en 1960 aproximadamente por la necesidad de eliminar el gran costo que se producía al reemplazar el complejo sistema de control basado en relés y contactores.

#### 1.3.2 ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE



**Figura 1-9:** Esquema de la estructura de un PLC.

El PLC, es un hardware industrial, que se utiliza para la obtención de datos. Una vez obtenidos, los pasa a través del bus (por ejemplo por ethernet) en un servidor. Los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y

procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control.

Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido.

### **1.3.3 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**

Tradicionalmente los más utilizados son:

- El diagrama de escalera (Lenguaje Ladder), es una lista de instrucciones y programación por estados.
- El lenguaje más reciente, es el FBD (en inglés Function Block Diagram) que emplea compuertas lógicas y bloques con distintas funciones conectadas entre sí.

### **1.3.4 OPERANDOS DE PROGRAMACIÓN**

Se pueden incluir diferentes tipos de operandos, desde los más simples como lógica booleana, contadores, temporizadores, contactos, bobinas y operadores matemáticos, hasta operaciones complejas como manejo de tablas (recetas), apuntadores, algoritmos PID y funciones de comunicación multiprotocolo que le permitirían interconectarse con otros dispositivos.

### **1.3.5 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN PLC**

Un controlador lógico programable está constituido por un conjunto de tarjetas o circuitos impresos, sobre los cuales están ubicados componentes electrónicos.

La estructura básica del hardware está constituida por:

- Fuente de alimentación
- Unidad de procesamiento central (CPU)
- Módulos de interfases de entradas/salidas (E/S)
- Módulo de memorias
- Unidad de programación

En algunos casos cuando el trabajo que debe realizar el controlador es más exigente, se incluyen Módulos Inteligentes.

#### **1.3.5.1 Fuente de Alimentación**

La función de la fuente de alimentación en un controlador, es suministrar la energía al CPU y demás tarjetas según la configuración del PLC.

- + 5 V para alimentar a todas las tarjetas
- + 5.2 V para alimentar al programador
- + 24 V para los canales de lazo de corriente 20 mA.

#### **1.3.5.2 Unidad de Procesamiento Central (C.P.U.)**

Es la parte más compleja e imprescindible del controlador programable, la unidad central está diseñada a base de microprocesadores y memorias; contiene una unidad de control, la memoria interna del programador RAM, temporizadores, contadores, memorias internas tipo relé, imágenes del proceso entradas/salidas, etc. Su misión es leer los estados de las señales de las entradas, ejecutar el programa de control y gobernar las salidas, el procesamiento es permanente y a gran velocidad.

#### **1.3.5.3 Módulos o Interfases de Entrada y Salida (E/S)**

Son los que proporciona el vínculo entre el CPU del controlador y los dispositivos de campo del sistema. A través de ellos se origina el intercambio de información ya sea para la adquisición de datos o la del mando para el control de máquinas del proceso.

Debido a que existen gran variedad de dispositivos exteriores (captadores, actuadores), encontramos diferentes tipos de módulos de entrada y salidas, cada uno de los cuales sirve para manejar cierto tipo de señal (discreta o analógica) a determinado valor de tensión o de corriente en DC o AC.

- Módulos de entradas discretas.
- Módulos de salidas discretas.
- Módulos de entrada analógica.
- Módulos de salida analógica.

#### **1.3.5.4 Módulos de Memorias**

Son dispositivos destinados a guardar información de manera provisional o permanente

Se cuenta con dos tipos de memorias,

- Volátiles (RAM)
- No volátiles (EPROM y EEPROM)

### 1.3.5.5 Unidad de Programación

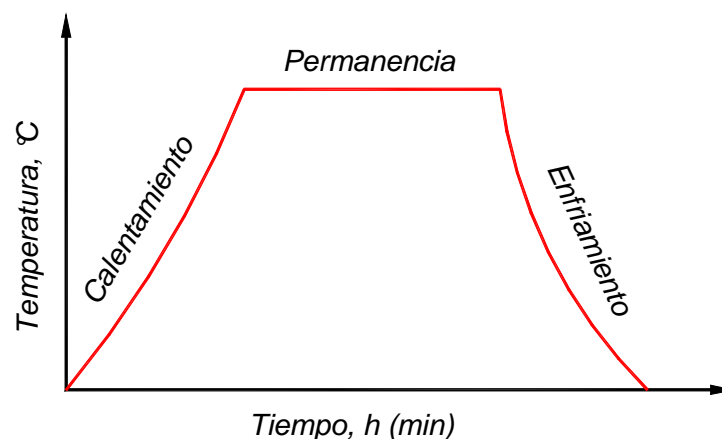
Los terminales de programación, son el medio de comunicación entre el hombre y la máquina; estos aparatos están constituidos por teclados y dispositivos de visualización.

## 1.4 TRATAMIENTO TÉRMICO

Es una combinación de operaciones de calentamiento, permanencia a la temperatura de calentamiento y enfriamiento, aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá las propiedades deseadas<sup>1</sup> (Ver Figura 1-10)

Un tratamiento térmico consiste en:

1. Calentamiento hasta una temperatura determinada.
2. La permanencia a dicha temperatura.
3. El enfriamiento hasta la temperatura ambiente en un medio determinado.



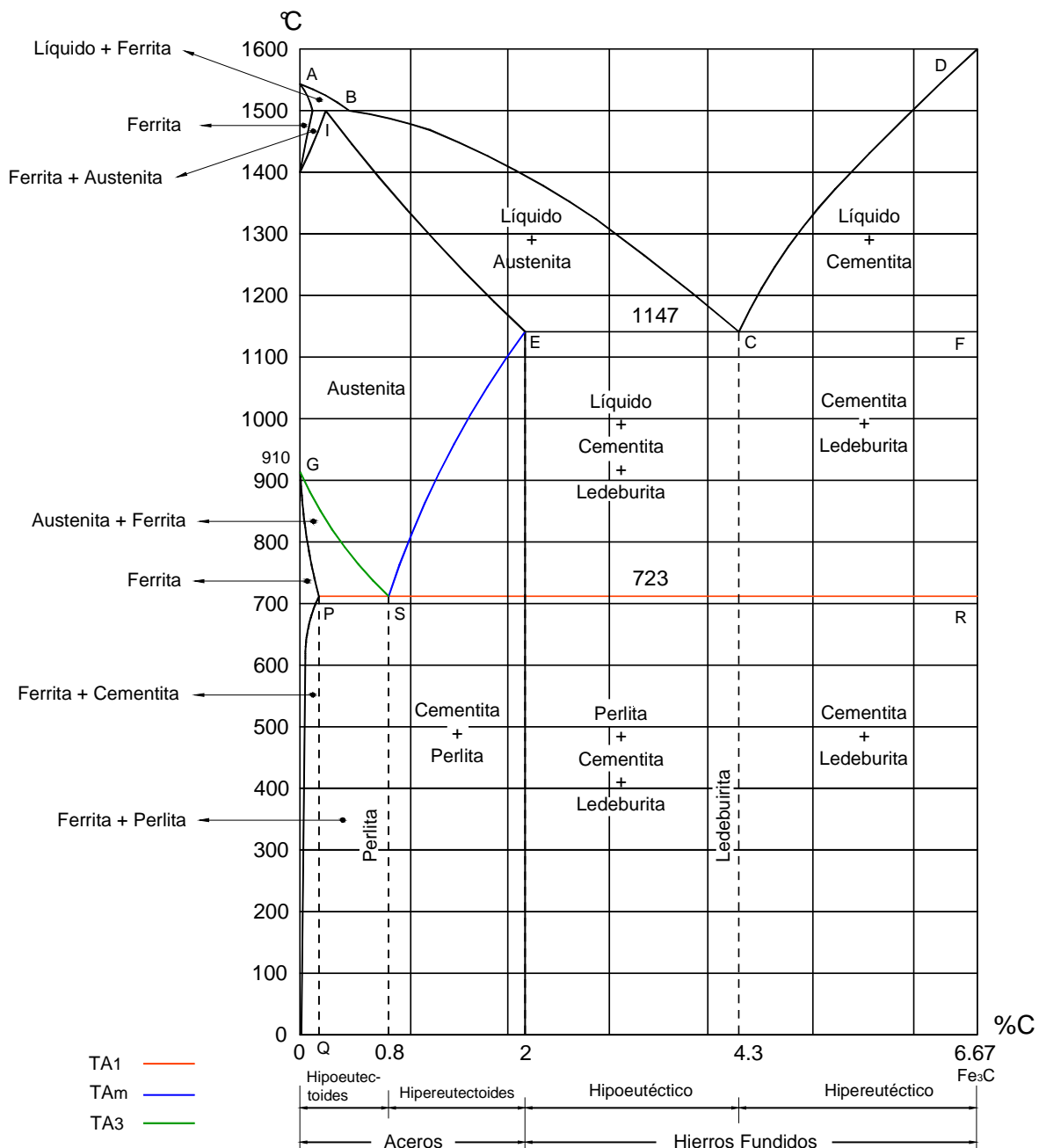
**Figura 1-10:** Representación de un Tratamiento Térmico.

### 1.4.1 RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Los parámetros que se deben controlar en todo tratamiento térmico del acero son: La velocidad de calentamiento, temperatura de calentamiento, tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento, para determinar estos parámetros se utiliza el diagrama Hierro-Carburo de Hierro (Ver Figura 1-11).

<sup>1</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1998





**Figura 1-11:** Diagrama Hierro – Carburo de Hierro.

### 1.4.1.1 Velocidad de Calentamiento

La rapidez de calentamiento hasta la temperatura deseada es tan importante como otros factores en el ciclo de tratamiento térmico. Los materiales producidos por trabajado en frío deben calentarse más lentamente que los trabajados en caliente para evitar distorsión. Se puede considerar la diferencia en temperatura que tiene lugar dentro de secciones gruesas y delgadas de piezas de sección

transversal variable y, siempre que sea posible, se debe tomar alguna medida para hacer más lento el calentamiento de las secciones más delgadas, de tal modo que sea posible minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión<sup>2</sup>.

#### **1.4.1.2 Temperatura de Calentamiento**

Se debe calentar el material a una temperatura por encima del intervalo crítico para formar austenita. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. De acuerdo al tipo de tratamiento térmico que se le va a realizar al acero y a su contenido de carbono se establecerán estas temperaturas de calentamiento con la ayuda del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C.

#### **1.4.1.3 Tiempo de Permanencia**

El calentamiento de una pieza no se realiza de manera uniforme, las superficies externas alcanzan mayores temperaturas, esto implica que se debe esperar un determinado tiempo para que la temperatura de calentamiento sea uniforme en toda pieza, y se produzca la transformación de la perlita en austenita tanto en el centro como en la superficie de la pieza. Largos tiempos de permanencia y sobre todo a altas temperaturas son muy peligrosos ya que el grano austenítico crece rápidamente dejando el acero con estructuras finales gruesas y frágiles.

#### **1.4.1.4 Velocidad de Enfriamiento**

La velocidad de enfriamiento depende del medio en el cual se realiza el mismo, de la forma y de las dimensiones de la pieza a enfriar, esta debe ser rigurosamente controlada en función del tipo de tratamiento que se realice.

La Tabla 1-1 muestra algunas velocidades de enfriamiento en diferentes medios.

---

<sup>2</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1998

**Tabla 1-1:** Velocidades de enfriamiento en el centro de una muestra de acero inoxidable de ½ pulg de diámetro por 2½ pulg de largo<sup>3</sup>.

Baño	Rapidez a 700 °C, [°C/s]		Rapidez a 650 °C, [°C/s]		Rapidez a 480 °C, [°C/s]	
	24°	52°	24°	52°	24°	52°
Salmuera (10%)	190	147	190	160	147	140
Agua de Grifo	100	8	106	47	104	80
Gulf super-quench	27	30	77	82	57	58
Aceite lento 10% de aceite soluble, 90% de agua	2	0	-1,1	-3,3	4	7
Aire inmóvil	-15		-16		-16	
Sal fundida (a 200 °C)	72	72	54	54	19	19

## 1.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos se subdividen en cuatro grupos:

- Recocido.
- Temple.
- Revenido.
- Normalizado.

### 1.4.2.1 Recocido

Consiste en calentar el acero a una temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación, preferentemente en el horno o cualquier material que sea buen aislante al calor.

El propósito del recocido de un acero puede ser refinar el grano, disminuir la dureza, reducir tensiones internas, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, y en algunos casos mejorar la maquinabilidad del material.

En la Tabla 1-2 se resumen los tipos de recocido existentes en la actualidad.

<sup>3</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1992

**Tabla 1-2:** Tipos de recocidos.

<b>Recocidos</b>				
$V_c$ [°C/h]	$T_c$ [°C]	$t_p$ [h]	$V_e$ [°C/h]	<b>Características</b>
<b>Difusivo</b>				
100-150	1000-1150	8-15	100-200	Reduce la heterogeneidad química de los lingotes de acero y elimina las segregaciones dendríticas y tensiones internas.
<b>Completo</b>				
100-150	$TA_3+30^\circ$ o $50^\circ$	$\frac{1}{4} t_c$	100-200	Se utiliza solo para aceros hipoeutectoides trabajados en caliente para afinar el grano y quitar tensiones internas.
<b>Incompleto</b>				
100-150	$TA_1+30^\circ$ o $50^\circ < T_m$	$\frac{1}{4} t_c$	100-200	Se utiliza solo para aceros hipereutectoides, para reducir la dureza, elevar la plasticidad y mejorar la maquinabilidad.
<b>Isotérmico</b>				
100-150	Hipoeutectoides $TA_3+30^\circ$ o $50^\circ$ Hipereutectoides $TA_1+30^\circ$ o $50^\circ < T_m$	$\frac{1}{4} t_c$		Se enfría lentamente, en un baño de sales hasta $T < TA_1$ y se lo mantiene a esta temperatura hasta que la $Fe_\gamma(C) \rightarrow$ Perlita, luego se enfría al aire. La desintegración de la austenita se produce a temperatura constante. Reduce la dureza y mejora la maquinabilidad.
<b>Esferoidizante</b>				
100-150	$T_c > TA_1$	$\frac{1}{4} t_c$		Se enfría inicialmente hasta $780^\circ C$ , luego hasta $550^\circ C - 600^\circ C$ y en adelante en aire. Se produce la transformación a perlita granular esferoidizada a partir de perlita laminar, mejorando la maquinabilidad. Se emplea en aceros con %C mayor a 0,65 aceros para cojinetes de bolas.
<b>Recristalización</b>				
100-150	$T_c < TA_1$ ( $650 - 700^\circ C$ ) $T_{recrist} = \alpha \cdot T_{fusión}$	$\frac{1}{4} t_c$	100-200	Elimina el endurecimiento por deformación en frío, debido a la deformación plástica, laminado en frío, estampado, embutido, etc. Es una operación intermedia a los procesos tecnológicos de laminación en frío, estampación, embutición profunda, trefilado. Para metales y aleaciones técnicamente finas: $\alpha = 0,3$ a $0,4$ Para soluciones sólidas: $\alpha = 0,5$ a $0,6$
<b>Relajación</b>				
100-150	550 - 600	1-2	100-200	Elimina tensiones internas aparecidas por operaciones como fundición, forja, soldadura, mecanizados.

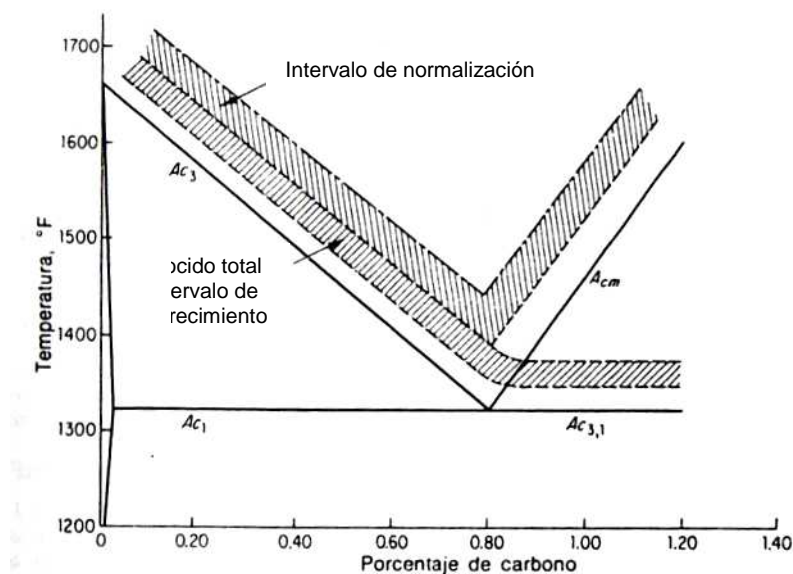
$V_c$  = Velocidad de calentamiento.  
 $T_c$  = Temperatura de calentamiento.

$t_c$  = Tiempo de calentamiento.  
 $V_e$  = Velocidad de enfriamiento.

$t_p$  = Tiempo de permanencia.

### 1.4.2.2 Normalizado

La normalización del acero se lleva a cabo al calentar aproximadamente 30° a 50° por encima de la línea de temperatura crítica superior  $T_{Ac_3}$  o  $T_{Ac_m}$  seguida por un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente. En la Figura 1-12 se muestra el intervalo de temperatura para normalización. El propósito de la normalización es producir un acero más duro y más fuerte que el obtenido por recocido, de manera que para algunas aplicaciones la normalización puede ser un tratamiento térmico final.



**Figura 1-12:** Intervalo de normalización, recocido y endurecimiento para aceros al carbono<sup>4</sup>.

Al elevarse el contenido de carbono en el acero, aumenta la diferencia de las propiedades entre el acero recocido y el normalizado. Para los aceros con hasta 0,2% de C, es preferible la normalización. Para aceros con hasta 0,4% C, el normalizado aumenta la dureza, lo que se debe tener en cuenta. Por ello no siempre el normalizado puede sustituir al recocido.

### 1.4.2.3 Temple

Consiste en el calentamiento del acero hasta una temperatura óptima, mantenimiento a esta un cierto tiempo y el subsiguiente enfriamiento rápido a una velocidad mayor que la crítica.

<sup>4</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1992.

Como resultado del temple aumenta la resistencia mecánica y la dureza y disminuye la ductilidad del acero debido al cambio en la estructura cristalina del acero.

Con un aumento de la rapidez de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para que el carbono se difunda de la solución y, aunque tiene lugar algún movimiento de los átomos de hierro la estructura no puede llegar a ser b.c.c., ya que el carbono está atrapado en la solución.

La estructura resultante de este enfriamiento rápido se llama *martensita*, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

#### – **Temperatura de Calentamiento en el Temple**

En el temple completo el acero hipoeutectoide se debe calentar hasta temperaturas de 30° a 50°C por encima de  $T_{A_3}$ , con esto la estructura Ferrita + Perlita se transforma en Austenita, y al enfriarlo a una velocidad mayor que la crítica se obtiene la martensita.

Los aceros hipereutectoides se someten a temple incompleto, se calientan a temperaturas superiores en 30° a 50°C a  $T_{A_1}$ , la estructura Perlita + Cementita se transforma en Austenita + Cementita y al enfriarlo a una velocidad mayor que la crítica se obtiene Martensita + Cementita, y una pequeña cantidad de Austenita retenida, aumentando la dureza y resistencia al desgaste del acero.<sup>5</sup>

#### – **Tiempo de Calentamiento**

Depende de la estructura de la instalación de calentamiento, en hornos eléctricos soplados con aire este es de 0,8 – 1 min. por cada milímetro de sección.

Alcanzada esta temperatura, la pieza se deja reposar hasta que se uniformice la temperatura en toda la sección y se homogenice la composición de austenita en toda la pieza. Frecuentemente el tiempo de permanencia se toma igual a 1/5 del tiempo de calentamiento.

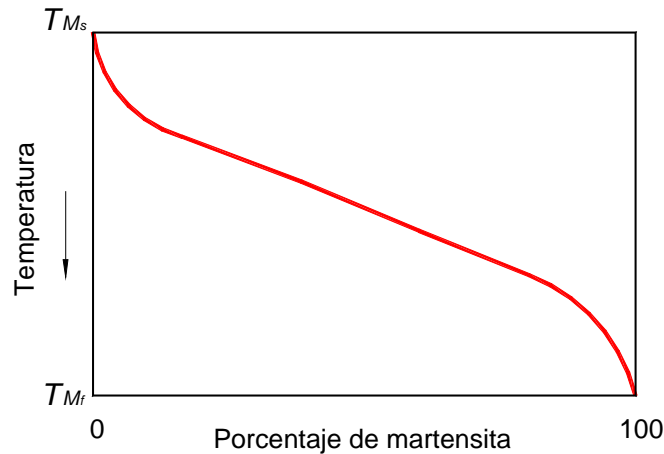
#### – **Transformación de la Martensita**

Esta se verifica solo durante el enfriamiento y cesa si este se interrumpe; por tanto, la transformación depende solo de la disminución en temperatura y es

---

<sup>5</sup> RUIZ Rodrigo, Folleto de Tratamientos Térmicos, EPN, 2007.

independiente del tiempo. La cantidad de martensita formada con la disminución de temperatura es no lineal. El número de agujas de martensita producidas al principio es pequeño, después aumenta y finalmente disminuye (Ver Figura 1.13)



**Figura 1-13:** Representación esquemática del porcentaje de martensita formada como función de la temperatura.

La temperatura de inicio de formación de la martensita se conoce como temperatura  $T_{Ms}$  y la del final de formación de la martensita como temperatura  $T_{Mf}$ . Si el acero se mantiene a cualquier temperatura por debajo de la  $T_{Ms}$ , la transformación de la martensita se detendrá y no avanzará nuevamente, a menos que la temperatura disminuya.

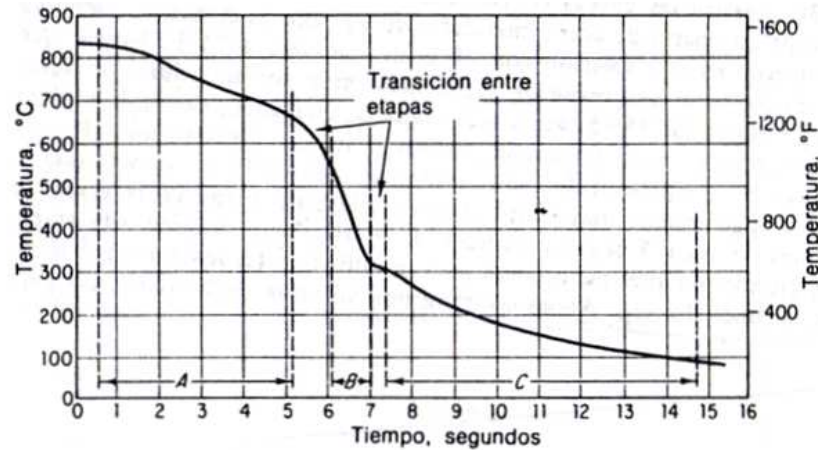
La propiedad más significativa de la martensita es su alta dureza. Aunque la martensita es siempre más dura que la austenita de la cual se forma sólo son posibles durezas extremas en aceros que contienen suficiente carbono. La dureza de la martensita fluctúa entre los 60 - 65 RHC.

#### – Velocidad de Enfriamiento

La estructura, dureza y resistencia resultante de una operación de tratamiento térmico se determina por la rapidez de enfriamiento real obtenida del proceso de temple. Si la rapidez de enfriamiento real excede a la rapidez crítica de enfriamiento, solo se obtendrá martensita; si la rapidez de enfriamiento es menor que la rapidez crítica de enfriamiento, la pieza no endurecerá completamente.

En el rango de temperatura  $T_{Ms}$  hasta  $T_{Mf}$  es conveniente un enfriamiento lento para disminuir las tensiones internas.

Se distinguen tres etapas durante el enfriamiento:



**Figura 1-14:** Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero templado en agua fría<sup>6</sup>.

### **Etapa A: Enfriamiento por medio de una capa de vapor**

En esta etapa, la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza en la superficie del metal y una delgada y estable película de vapor rodea al metal caliente. El enfriamiento se efectúa por conducción y radiación a través de la película gaseosa y, como las películas de vapor son pobres conductoras del calor, la rapidez de enfriamiento es relativamente lenta a través de esta etapa.

### **Etapa B: Enfriamiento por transporte de vapor**

El metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable. La parte humedecida de la superficie del metal produce una violenta ebullición. El calor se elimina del metal muy rápidamente como calor latente de vaporización. Esta etapa es la más rápida del enfriamiento.

### **Etapa C: Enfriamiento por medio del líquido**

La superficie del metal alcanza el punto de ebullición del medio de temple. Ya no se forma más vapor, de modo que el enfriamiento se efectúa por conducción y convección a través del líquido<sup>7</sup>.

### **– Medios de Temple**

El medio de temple ideal mostraría una alta rapidez de enfriamiento inicial para evitar la transformación en la región de la nariz del diagrama TTT (Temperatura-tiempo- transformación) y luego una lenta rapidez de enfriamiento para todo el

<sup>6</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1992.

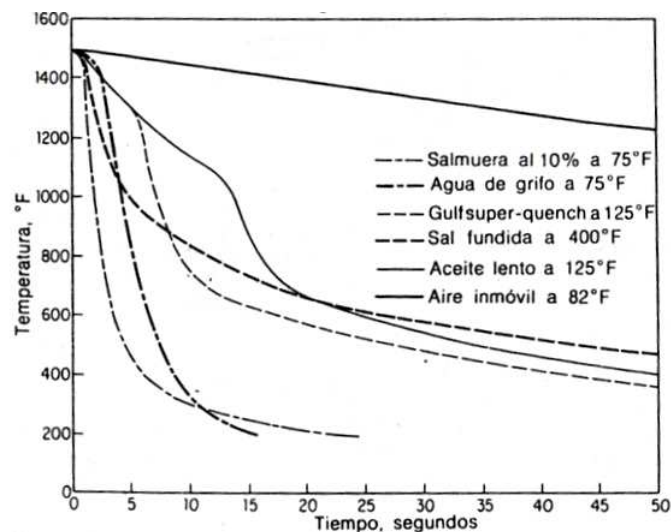
<sup>7</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1992.



intervalo inferior de temperatura a fin de minimizar la distorsión. El agua y las soluciones acuosas de sales inorgánicas tienen altas rapidezces de enfriamiento inicial a través de las etapas A y B, pero esta rapidez persiste a bajas temperaturas, donde la distorsión y el agrietamiento tienden a ocurrir. Los aceites de temple convencionales tienen una mayor etapa A, o capa de vapor, y una etapa B más corta con una de rapidez de enfriamiento menor<sup>8</sup>.

Los siguientes medios de temple industriales se enumeran en orden de disminución de la severidad del temple (Ver Figura 1.15).

1. Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (salmuera).
2. Agua del grifo
3. Sales fundidas o líquidas
4. Aceite soluble y soluciones acuosas
5. Aceite
6. Aire



**Figura 1-15:** Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de ½ pulg de diámetro por 2½ pulg de largo, sin agitación.

### – Tipos de Temple

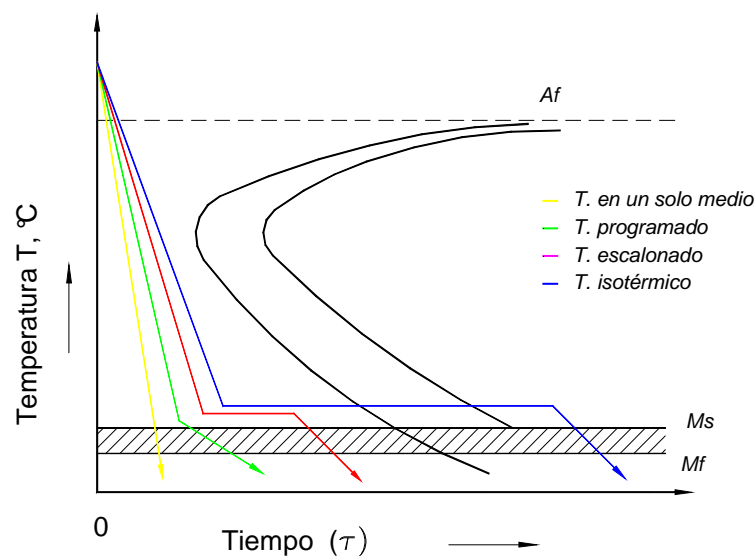
De acuerdo a la configuración de la pieza, del tipo de acero, de las propiedades requeridas, se deben aplicar los diferentes tipos de temple que se resumen en la siguiente Tabla 1-3.

<sup>8</sup> AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1998.

**Tabla 1-3:** Tipos de temple.

Tipo de Temple	Medio de temple	Características.
En un solo medio	Un solo refrigerante (agua, aceite, aire), con agitación.	Aparecimiento de considerables tensiones internas y grietas.
Programado	En agua hasta una $T > M_s$ , luego en aceite hasta $20^\circ\text{C}$	Se disminuyen las tensiones internas de la transformación austenita a martensita.
Escalonado	En agua hasta una $T > M_s$ , se mantiene hasta que la temperatura se uniformice, luego se enfría en aire.	Se reduce las variaciones volumétricas, las deformaciones y el peligro de que se formen grietas.
Isotérmico	En agua hasta una $T > M_s$ , se mantiene en sales de agua hasta que la austenita se transforme en vainita isotérmicamente, luego se enfría en aire.	Se someten a los aceros aleados

La Figura 1-16 representa gráficamente las curvas de enfriamiento aproximadas de los diferentes tipos de temple.

**Figura 1-16:** Representación gráfica de los tipos de temple.

Existen otros tipos especiales de temple no muy comunes pero no menos importantes a los anteriormente descritos, los cuales tienen ciertas particularidades que se detallan a continuación.

– **Temple a Temperaturas Bajo Cero**

Consiste en la continuación del enfriamiento del acero templado hasta una temperatura inferior a +20 °C pero no menor que  $T_{Mf}$ . La finalidad del método es la transformación más completa de la austenita retenida en martensita.

Este tratamiento solo se realiza en aceros cuyo punto  $T_{Mf}$  está situado a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente, para aceros al carbono es racional si su contenido de carbono supera el 0,6%.

Se debe realizar inmediatamente después del temple ya que la pausa en el enfriamiento estabiliza la austenita y disminuye el efecto de este tratamiento.

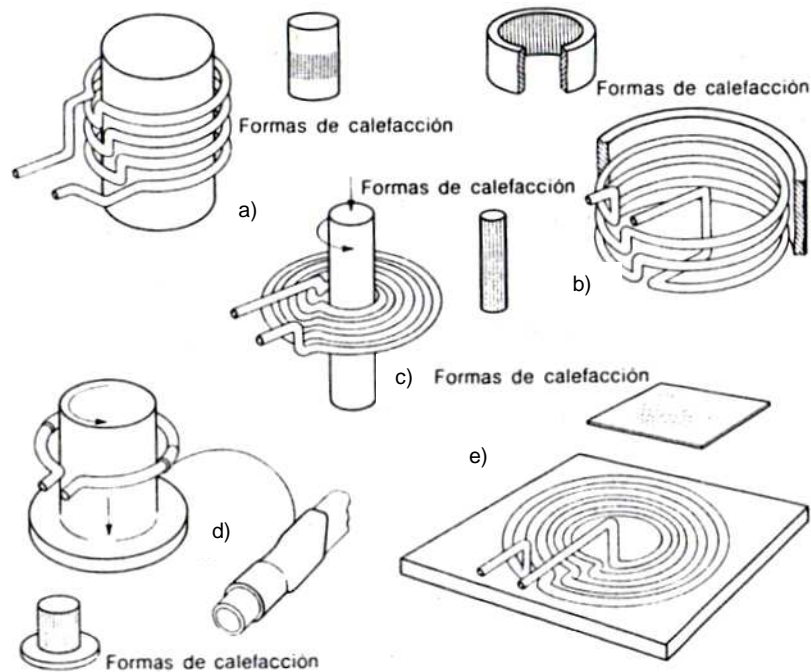
– **Temple Superficial**

Se aplica a gran escala el temple superficial, con el fin de conseguir una estructura martensítica en la capa superficial, conservando el núcleo blando (árboles, ejes, ruedas dentadas).

– **Temple superficial por corriente de alta frecuencia**

Depende del calentamiento localizado que producen las corrientes inducidas en un metal bajo la acción de un campo magnético rápidamente cambiante. La operación es semejante a la de un transformador en el cual el primario o bobina de trabajo está constituido por varias vueltas de tubería de cobre enfriadas por agua, y la pieza que va a endurecerse desempeña el papel del secundario de un aparato de inducción de alta frecuencia. Las Figuras 1-17a a 1-17e muestran los cinco diseños básicos de bobinas de trabajo para emplearlos con unidades de alta frecuencia.

Cuando la corriente alterna de alta frecuencia pasa por la bobina de trabajo, se forma un campo magnético de alta frecuencia, el cual induce corrientes parásitas de alta frecuencia en el metal. El calentamiento se produce por la resistencia del metal al paso de estas corrientes.



**Figura 1-17:** Arrollamientos para unidades de alta frecuencia y los modelos caloríficos obtenidos por cada una<sup>9</sup>.

La capa superficial se calienta prácticamente al instante, a una profundidad que se puede calcular con la siguiente expresión.

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

f = Frecuencia de la corriente, Hz.

$\delta$  = profundidad a la que penetra, cm.

$\rho$  = resistividad eléctrica  $\Omega \cdot \text{Mm} / \text{m}$

$\mu$  = permeabilidad magnética Tm / A

El intervalo de frecuencias comúnmente utilizado está entre 10000 y 500000 Hz. La Tabla 1-4 muestra el efecto de la frecuencia en la profundidad de la superficie endurecida.

<sup>9</sup> METAL HANDBOOK, Vol. 2, American Society for Metals, Ohio.

**Tabla 1-4:** Efecto de la frecuencia en la profundidad de la dureza de la porción externa.

<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Profundidad teórica de penetración de energía eléctrica [pulg]</b>	<b>Profundidad práctica de la dureza de la porción externa [pulg]</b>
1000	0,059	0,18 a 0,35
3000	0,035	0,15 a 0,2
10000	0,02	0,1 a 0,15
120000	0,006	0,06 a 0,1
500000	0,003	0,04 a 0,08
1000000	0,002	0,01 a 0,03

#### **1.4.2.4 Revenido del Acero**

En la condición martensítica sin tratamiento térmico ulterior, el acero es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones. La formación de martensita origina grandes tensiones residuales en el acero; por tanto, el endurecimiento casi siempre sigue de un tratamiento de revenido.

En el revenido se calienta el acero hasta una temperatura inferior a  $T_{A_1}$ , se mantiene a esta temperatura prefijada y después se enfría a una velocidad determinada (normalmente al aire).

El propósito del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero.

- Las tensiones en las piezas templadas pueden eliminarse tanto más completamente cuanto más alta sea la temperatura de revenido.
- Por otra parte al bajar la velocidad de enfriamiento, disminuye la magnitud de las tensiones residuales.
- Las tensiones que se producen después del revenido en aire son 7 o 2,5 veces menores respectivamente que las tensiones que aparecen después de efectuar el revenido en el agua.

## – Tipos de Revenido

Los diferentes tipos de revenido se resumen en la Tabla 1-5.

**Tabla 1-5:** Tipos de revenido.

Revenido	Temperatura [°C]	Características
Bajas temperaturas	80 – 200	Disminuyen las tensiones internas quedando invariable la dureza. Dura de 1 – 2,5 horas. Se someten las herramientas cortantes y de medida, fabricadas con acero de baja aleación.
Temperaturas medianas	350 - 500	Se forma la troostita de revenido (mezcla ferrito - cementítica dispersa). Se someten los resortes, muelles, estampas y se realiza en sales fundidas en hornos eléctricos.
Altas temperaturas	500 - 600	Se forma la sorbita de revenido (Masa ferrítica con inclusiones de partículas de cementita). Se utiliza para piezas que en su funcionamiento experimentan grandes tensiones resistencias al choque.

El tratamiento térmico que consiste primero en el temple luego en el revenido a alta temperatura recibe el nombre de bonificado.

A temperaturas entre 250 a 350 °C se produce la transformación de la austenita residual en martensita revenida, lo que produce la fragilidad de revenido.

## 1.5 HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Se pueden clasificar a partir del proceso de calentamiento, por la atmósfera o por la solera del horno.

### 1.5.1 SEGÚN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO

#### 1.5.1.1 Calentamiento por gas

Los hornos de gas pueden ser del tipo de fuego directo, en el cual los productos de la combustión entran a la cámara de calentamiento. Alternativamente, pueden ser de combustión indirecta, de manera que la cámara del horno quede aislada de

los productos de la combustión. Un tercer tipo de horno calentado por gas, es el de tubos radiantes, en el cual un gas en combustión dentro de tubos metálicos, lo que constituye la fuente de calor radiante. El calentamiento por gas tiene como ventaja la economía y como inconveniente la dificultad del control de la temperatura (Ver Figura 1-18).



**Figura 1-18:** Horno Batch a gas para temple integral.

#### **1.5.1.2 Calentamiento por Resistencia Eléctrica.**

Es el más usado para los hornos de tratamiento térmico, aprovecha el calor generado según la ley de joule. La disposición de la resistencia da nombre a los hornos, que son de tipo mufla o caja, la resistencia está instalada a lo largo de las paredes interiores y por lo tanto en contacto con las paredes del horno (Ver Figura 1-19).



**Figura 1-19:** Horno eléctrico de tambor rotativo.

El material de la resistencia suele ser nicrom (Níquel 70%, Cromo 30%), que alcanza temperaturas de 1100 °C y de aleación de carburo de silicio que alcanza temperaturas de 1300 °C. Para lograr temperaturas superiores se utilizan resistencias de molibdeno (1800 °C), de tungsteno (2500 °C), y de

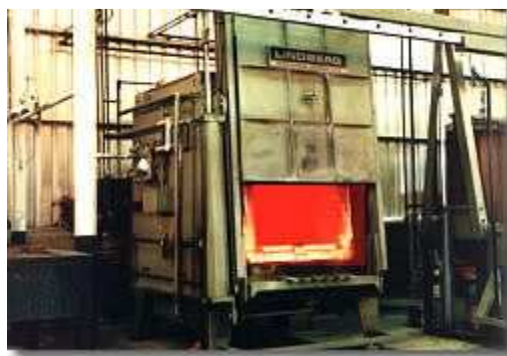
grafito (2700 °C). Para temperaturas aun mayores se utilizan los hornos de inducción (3000 °C).

### **1.5.2 SEGÚN SU ATMÓSFERA**

En tratamientos térmicos se entiende por atmósfera la masa gaseosa encerrada dentro del horno que está en contacto con la pieza a tratar, la atmósfera puede tener carácter neutro, oxidante o reductor, el papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble, por una parte evita que se produzcan reacciones perjudiciales como la oxidación y la descarbonización de las piezas y por otra parte permite realizar la reducción de óxidos superficiales y que la eliminación de gas sea absorbida.

#### **1.5.2.1 En vacío.**

Se utiliza para sintetizar carbonos cementados y para el tratamiento térmico especial de aceros aleados, se consigue mediante bombas mecánicas y de difusión de aceite o mercurio. Las atmósferas neutras de argón helio y nitrógeno apenas se emplean debido al precio de estos gases y a las trazas de oxígeno que suelen contener. Las atmósferas carburantes o descarburantes obtenidas por combustión o disociación de mezclas de hidrocarburos (metano, propano, butano, gas natural), con aire estas suelen contener N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, y pequeñas cantidades de vapor de agua (Ver Figura 1-20).



**Figura 1-20:** Horno de cámara con atmósfera controlada.

#### **1.5.2.2 Hornos de atmósfera del tipo de generador exotérmico o endotérmico.**

En el generador exotérmico se introducen hidrocarburos y aire seco limpio convenientemente dosificado, se queman en la cámara de combustión, se filtran y se separa el agua. El gas seco resultante se introduce al horno de tratamiento



térmico. La mezcla que se introduce al generador endotérmico es parecida a la inyectada en el exotérmico pero el generador endotérmico no tiene quemador sino los gases reaccionan entre sí en un catalizador calentado exageradamente (Ver Figura 1-21).



**Figura 1-21:** Hornos generadores de Atmósferas, Endotérmicas y Exotérmicas.

## CAPÍTULO 2

### DESCRIPCIÓN Y ESTUDIO DE LOS SISTEMAS

#### 2.1 ESTUDIO DEL SISTEMA DEL HORNO

##### 2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

###### 2.1.1.1 Función principal.

La función de este horno será realizar distintos tipos de tratamientos térmicos, mediante la ejecución de curvas de calentamiento, enfriamiento y mantenimiento de temperatura en un rango de trabajo de 20 a 1200°C (Ver Figura 2-1).

El horno es de tipo mufla, calentando mediante resistencias eléctricas. Las paredes del mismo se encuentran aisladas con material refractario permitiendo así que la puerta, que es el lugar más caliente, no pase de 50°C cuando el horno está trabajando a su capacidad máxima (1200 °C).



**Figura 2-1:** Horno eléctrico de tratamientos térmicos LINDBERG.

**NOTA:** La estructura interna del horno, el material refractario de la cámara de calentamiento, las resistencias eléctricas, la ubicación de la termocupla y la termocupla tipo K vienen construidas y suministradas de fábrica por la marca LINDBERG.

## 2.1.2 ESTRUCTURA

### 2.1.2.1 Estructura externa

Este horno está compuesto por una estructura externa construida de perfil angular 1\*1/16 pulg que corresponde al armazón del mismo (Ver Figura 2-2, a) y su cubierta es de plancha metálica de acero laminado de 1/16 pulg (Ver Figura 2-2, b), la cual tiene por objeto soportar la estructura interna del horno y proteger el material refractario.



a)

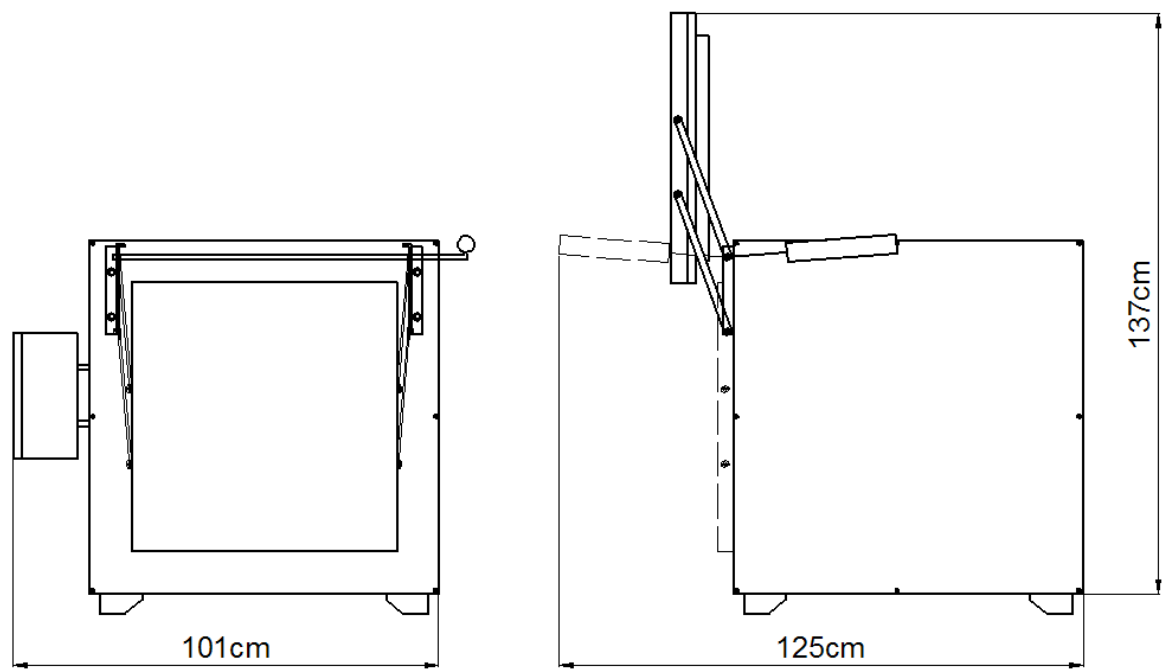
b)

**Figura 2-2:** a) Armazón del Horno, b) Cubierta del Horno.

La puerta fue diseñada y construida con el mecanismo de apertura hacia arriba como se muestra en la Figura 2-3, esta se refuerza con manta refractaria KAOWOOL HP 1260 de densidad  $128\text{kg/m}^3$  pegada entre sí con cemento refractario (Ver Figura 2-4).

Los perfiles se encuentran recubiertos con pintura antioxidante color plomo, mientras que la puerta y las planchas están recubiertas con pintura resistente a altas temperaturas de hasta  $450^\circ\text{C}$  SHERWIN WILLIANS de color aluminio.

Las dimensiones máximas del horno se indican en la Figura 2-3



**Figura 2-3:** Dimensiones máximas del horno de tratamientos térmicos y sistema de apertura de la puerta.



**Figura 2-4:** Puerta del Horno reforzada con manta refractaria.

### Volumen de la cámara de calentamiento.

Es el espacio que será calentado por las resistencias eléctricas (Ver Figura 2-5).

De acuerdo a las dimensiones medias se tiene que este espacio es de:

$$v = \text{Ancho} * \text{Altura} * \text{profundidad}$$

$$v = 0,32 * 0,32 * 0,44$$

$$v = 0,0451m^3$$



**Figura 2-5:** Cámara de Calentamiento.

#### 2.1.2.2 Material Refractario

El material refractario tiene como función el aislamiento para la reducción de pérdidas de energía calórica.

Un material refractario es aquel capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas. Para el caso de la puerta del horno se tiene un refractario de densidad  $128\text{kg/m}^3$  con una temperatura máxima de  $1260^\circ\text{C}$ , presenta las siguientes propiedades físicas y químicas<sup>10</sup>

- Apariencia y olor: material fibroso blanco e inodoro parecido a la lana

<sup>10</sup><http://www.carbosanluis.com.ar>. Empresa Carbo San Luis proveedor de material refractario.

- Grupo químico: fibras vítreas de aluminio-silicato
- Rango densidad específica: 2.50 – 2.70
- Punto de fusión:> 1768°C (3200°F)
- Solubilidad en agua (%): no soluble en agua

Se presenta la Hoja de información de seguridad de producto refractario en el **ANEXO 1**.

## **2.2 ESTUDIO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO**

### **2.2.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA**

En el horno se encuentra dispuestas 3 resistencias, de valor 33 ohmios cada una, estas se encuentran ubicadas en las paredes de la cámara de calentamiento dentro del material refractario en forma de espirales. Para el control de temperatura se puede disponer de cualquier configuración eléctrica entre estas, y según el tipo de conexión se producen diferentes velocidades de calentamiento, ya que el valor de corriente que circulará en cada resistencia dependerá de la conexión (Ver Figura 2-6). Todo el sistema es alimentado por corriente alterna bifásica de 220 voltios.

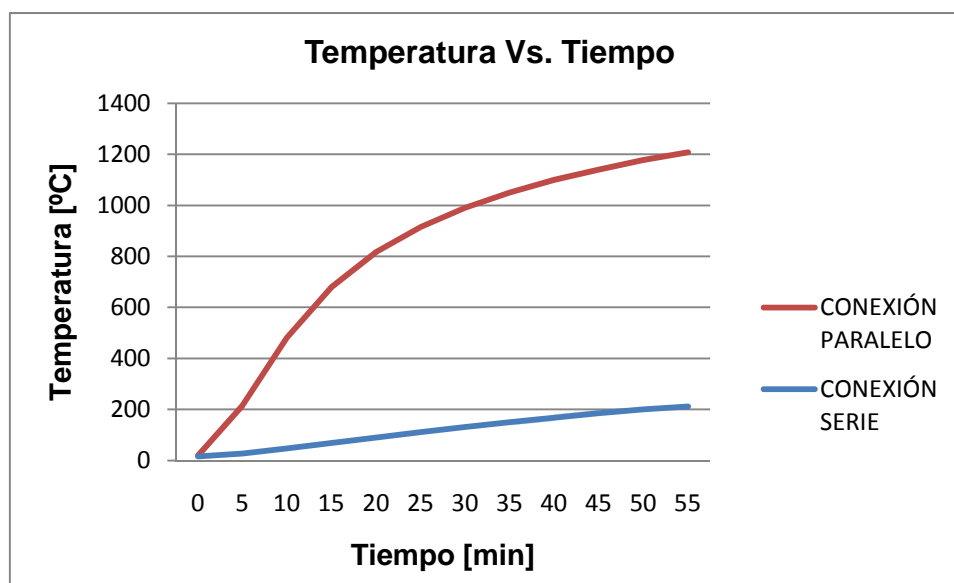


**Figura 2-6:** Espacio de conexión de las resistencias de calentamiento del horno.

En la Tabla 2-1 y Figura 2-7 se indican los datos adquiridos de temperatura y tiempo con conexiones en paralelo y serie.

**Tabla 2-1:** Datos de temperatura y tiempo de conexión paralela y en serie.

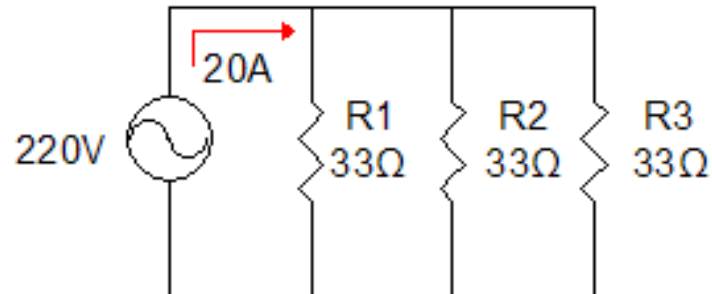
Tiempo [min]	CONEXIÓN PARALELO			CONEXIÓN SERIE		
	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]	Velocidad promedio [°C/min]	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]	Velocidad promedio [°C/min]
0	20		29,4	16		3,5
5	216	39,2		27	2,2	
10	482	53,2		47	4	
15	680	39,6		69	4,4	
20	817	27,4		90	4,2	
25	915	19,6		111	4,2	
30	990	15		131	4	
35	1050	12		150	3,8	
40	1100	10		168	3,6	
45	1140	8		185	3,4	
50	1177	7,4	201	3,2		
55	1207	6	212	2,2		



**Figura 2-7:** Temperatura Vs. Tiempo de conexión paralela y en serie.

De acuerdo a las pruebas realizadas se determina que la conexión en paralelo de las resistencias proporciona una velocidad alta de calentamiento promedio de 30°C/min en el rango de temperaturas de mayor funcionamiento del horno.

El esquema de conexión de las resistencias escogido para el horno se muestra en la Figura 2-8:



**Figura 2-8:** Esquema de conexión de resistencias.

Con lo que se determina la potencia consumida por este circuito mediante la ley de ohm:

$$RT = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$RT = 11\Omega$$

$$I = \frac{V}{RT}$$

$$I = 20A$$

$$P = I * V$$

$$P = 4400w$$

Donde:

$RT$  : Resistencia total [ $\Omega$ ]

$I$  : Intensidad de corriente [ $A$ ]

$V$  : Voltaje [ $v$ ]

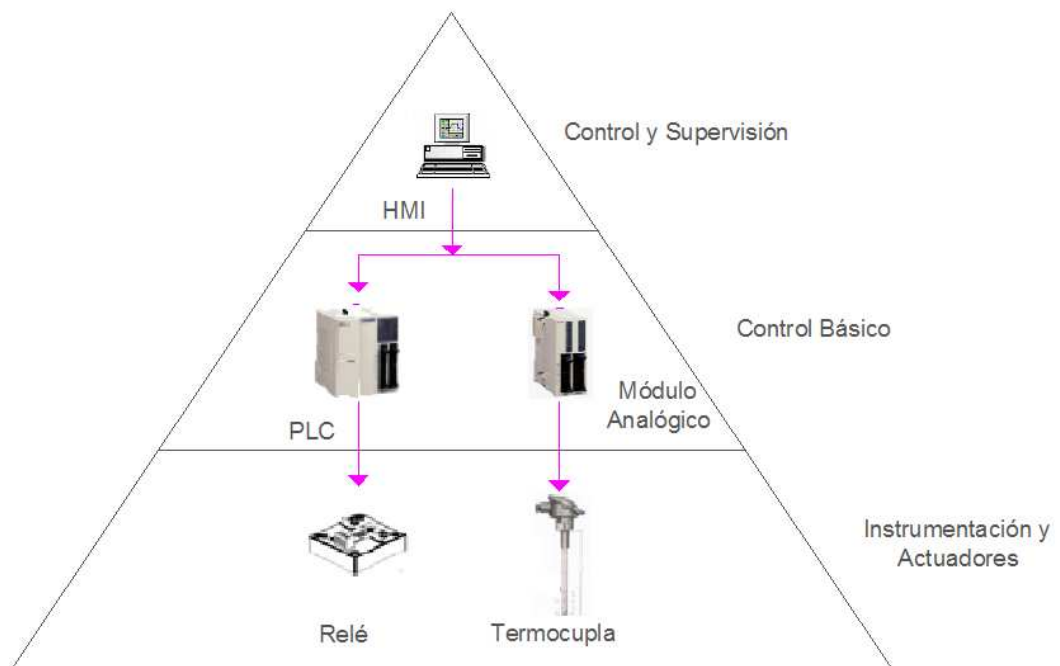
$P$  : Potencia [ $w$ ]



## 2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

### 2.3.1 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE CONTROL

El diseño de este sistema se sintetiza en la pirámide de automatización (Ver Figura 2-9), en cuya base se sitúan los dispositivos de control más elementales como sensores y actuadores hasta el vértice superior en el cual encontramos el nivel de control y supervisión.

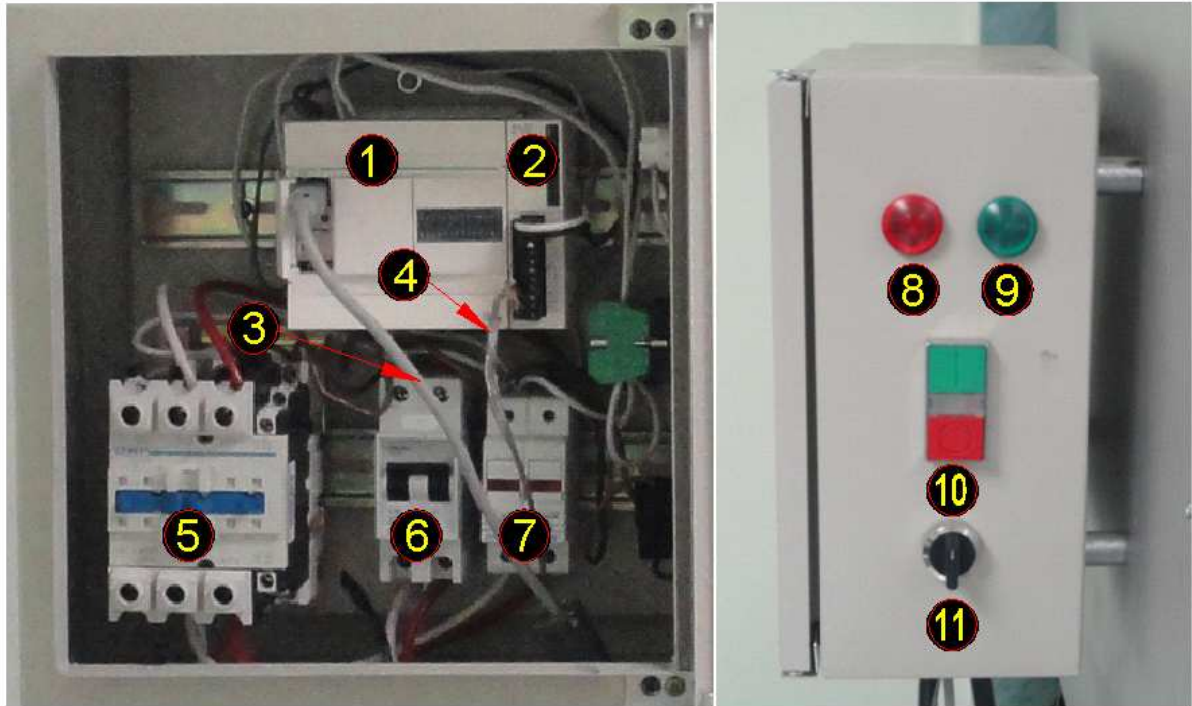


**Figura 2-9: Pirámide de Automatización.**

- **Instrumentación y Actuadores:** En esta etapa se ubican el transmisor necesario para la automatización (Termocupla tipo K). Además se encuentran los distintos actuadores entre los cuales se destacan el contactor para el control de las resistencias, el interruptor ON-OFF de 220 V, las luces piloto, y los elementos de protección como los fusibles.
- **Control Básico:** Aquí se encuentra el PLC, el cable de transferencia de datos y el módulo analógico que se emplea para el sistema.
- **Control y Supervisión:** La supervisión de este proyecto se realiza a través de la interface hombre-máquina. El sistema de control incorpora una estación para la visualización, monitoreo del proceso y de las variables

involucradas en el mismo (Temperatura, Velocidad de Calentamiento y Tiempo de permanencia).

En la Figura 2-10 y en la Tabla 2-2 se muestran los elementos de control utilizados en el sistema de control implantado.

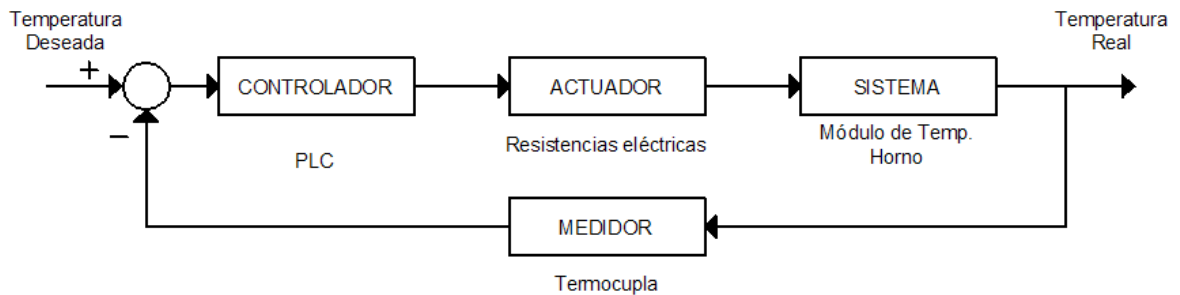


**Figura 2-10:** Elementos de control del sistema.

**Tabla 2-2:** Elementos de control del sistema.

NÚMERO	ELEMENTOS DE CONTROL
<b>CONTROL BÁSICO</b>	
1	PLC
2	Módulo Analógico
3	Cable de transferencia de Datos
<b>INSTRUMENTACIÓN Y ACTUADORES</b>	
4	Termocupla tipo K
5	Contactador AC3-220v
6	Breaker 220 V
7	Fusibles de 40 A
8	Luz piloto roja
9	Luz piloto verde
10	Botonera Marcha-Paro
11	Switch ON-OFF

El PLC enviará la señal a la bobina de un contactor que permitirá o no el paso de corriente a las resistencias. En la Figura 2-11 se ilustra el esquema general del nuevo sistema de control de la variable en lazo cerrado.



**Figura 2-11:** Esquema del sistema de control.

### 2.3.2 CONSIDERACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL PLC Y SOFTWARE DE CONTROL

Para el dimensionamiento del PLC se toma en consideración lo siguiente:

- Las condiciones de operación preestablecidas: Funcionamiento con corriente alterna bifásica de 220 V en condiciones industriales.
- La instrumentación: El sistema tiene un medidor fiable de temperatura como es la Termocupa, por lo que se necesita un PLC con por lo menos una entrada analógica.
- El número de entradas y salidas requeridas: Se necesitan 2 entradas digitales y una analógica, para las salidas se necesitan por lo menos 2 digitales.
- Los requerimientos del sistema de control: El PLC debe poder comunicarse con protocolos estándar al software del HMI instalado en la computadora.
- Reservas para posibles incorporaciones o modificaciones futuras

En lo que respecta a los requerimientos del software de control, se ha establecido lo siguiente:

- Tener un sistema de control centralizado, fiable, y con menor consumo de energía.
- Facilitar el ajuste y manipulación de las variables involucradas como son: Temperatura, Velocidad de Calentamiento y Tiempo de permanencia.
- Proporcionar un sistema de alarmas que alerte a los operadores en caso de fallas o de valores fuera de los niveles permisibles y de fin de programa.
- Tener la posibilidad de generar gráficas de tendencia de la Temperatura Vs Tiempo real y teórica.

### **2.3.3 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL**

De acuerdo a los parámetros que se solicitan se describen los elementos que constituyen el sistema de control que va a ser instalado al horno para la automatización, los cuales se clasifican en:

- Transductores que censan la temperatura: termocupla tipo K, rango de temperatura 0°C a 1250°C, rango de tolerancia +/- 2 .2°C, de aleación cromo-aluminio.
- Controlador: PLC Twido TWDLCAA24DRF, Módulo Analógico TWDALM3LT.
- Actuadores y Elementos de Protección: Contactor para las resistencias eléctricas, luces piloto, interruptores y fusibles.
- Software del HMI: Labview de National Instruments

#### **2.3.3.1 Termocupla tipo K**

Es el sensor de temperatura en el interior del horno. La norma ASTM (American Section of the International Association for Testing Material) E-608 recomienda los termopares tipo K para valores de temperatura inferiores a 1150 °C con una exactitud de 2.2 °C ó 0.75%. Como referencia el voltaje que genera el termopar tipo K es de aproximadamente 40.44µV/°C, por lo tanto a 25°C (temperatura ambiente), el voltaje que proporciona es de aproximadamente 1mV. A la máxima temperatura del horno de 1200 °C, proporcionaría un voltaje de 48.828 mV.

### 2.3.3.2 PLC TWIDO TWDLCAA24DRF

Las características del PLC TWDLCAA24DRF de Schneider Electric son:

- 14 entradas digitales.
- 10 salidas digitales tipo relé.
- 2 puertos seriales.
- Comunicación Modbus Tipo RS-485 no aislado; longitud máxima: 200 m.

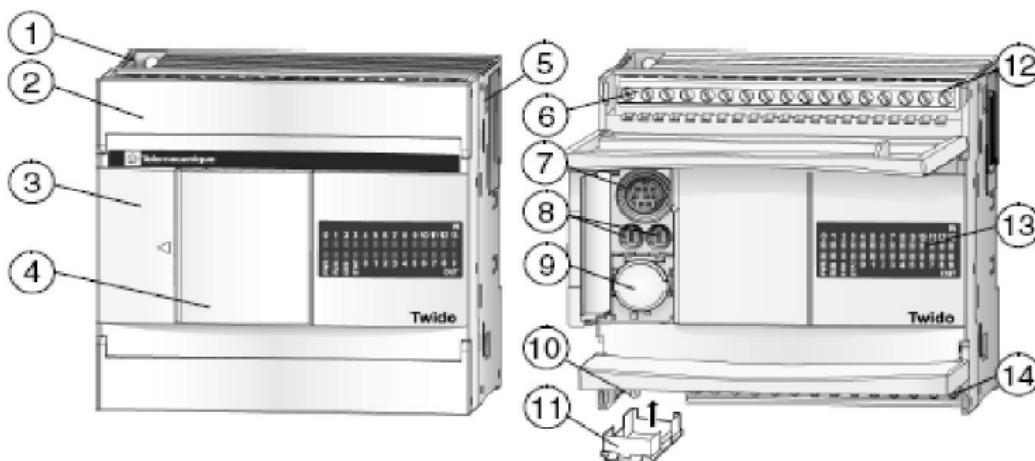
Modo ASCII o RTU.

- Comunicación ASCII Protocolo Half-duplex hacia un dispositivo.
- Alimentación general del PLC 100/240 VAC.
- Alimentación de las entradas digitales 24 VCC.
- Software para programación: Twido Soft.

En el **ANEXO 2** se indican las características ampliadas del PLC

#### 2.3.3.2.1 Partes constitutivas del TWDLCAA24DRF

En la Figura 2-12 se muestran las partes constitutivas del PLC TWDLCAA24DRF y en Tabla 2-3 se describen cada una de ellas:



**Figura 2-12:** PLC Twido TWDLCAA24DRF.<sup>11</sup>

<sup>11</sup>Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware

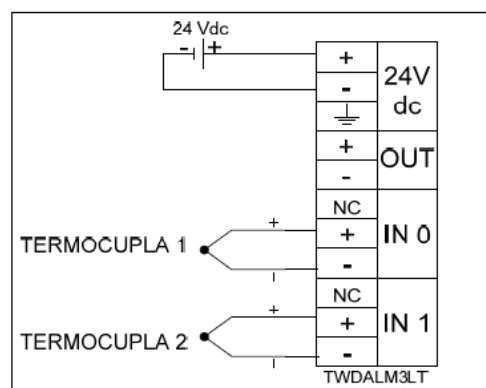
**Tabla 2-3:** PLC Twido TWDA A24DRF.<sup>12</sup>

Número	Descripción
1	Orificio de montaje
2	Cubierta de terminales
3	Tapa de bisagra
4	Cubierta extraíble del conector de visualización del operador
5	Conector de ampliación
6	Terminales de alimentación de sensores
7	Puerto serie 1
8	Potenciómetros analógicos
9	Conector de puerto serie 2
10	Terminales de fuente de alimentación de 100 a 240 VCA
11	Conector de cartuchos
12	Terminales de entrada
13	LED
14	Terminales de Salida

### 2.3.3.3 Módulo de expansión TWDALM3LT

La termocupla tipo K será conectada al PLC a través de un modulo de extensión especial que trabaja con Termocuplas tipo K, J y T, RTD y PT100.

En la Figura 2-13 se muestra la conexión de la termocupla en el módulo.

**Figura 2-13:** Conexión de Termocupla en el Módulo TWDALM3LT.<sup>13</sup>

<sup>12</sup>Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware

<sup>13</sup>Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware

Este módulo se ha configurado para poder trabajar en grados Celsius; en la Tabla 2-4 se muestran las características de la señal digital generada a través del conversor Análogo/Digital.

**Tabla 2-4:** Configuración del Módulo Analógico TWDALM3LT<sup>14</sup>

<b>Características de entrada analógica</b>	<b>Módulo TWDALM3LT (Termocupla tipo K)</b>
Rango de entrada	0 a 1300° C
Periodo de muestreo	50 ms
Tipo de Entrada	Entrada Diferencial
Modo de conversión	$\Sigma\Delta$ tipo A/D
Resolución digital	4096 incrementos ( 12 bits )
Monotonicidad	Sí
Valor de entrada del LSB	0.1° C

#### 2.3.3.4 HMI (Interfaz de usuario)

La interfaz de usuario es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina o un equipo, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo, normalmente suelen ser fáciles de entender y fáciles de accionar.

##### **Funciones principales;**

- Puesta en marcha y apagado.
- Control de las funciones manipulables del equipo.
- Manipulación de archivos y directorios.
- Herramientas de desarrollo de aplicaciones.
- Comunicación con otros sistemas.
- Información de estado.
- Configuración de la propia interfaz y entorno.
- Intercambio de datos entre aplicaciones.
- Control de acceso.
- Sistema de ayuda interactivo.

<sup>14</sup> Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware

El software utilizado es LABVIEW, este es un lenguaje de programación gráfica, rápido y amigable. Algunas aplicaciones de este paquete son: diseñar interfaces hombre máquina, diseñar sistemas SCADA, etc. Puede reconocer directamente varios dispositivos como: PLC's, PIC's, etc.

### 2.3.4 NÚMERO DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA DE CONTROL

Según el diseño las entradas y salidas se observan en la Tabla 2-5:

**Tabla 2-5:** Entradas y Salidas Digitales y Analógicas del sistema de control.

<b>ENTRADAS DIGITALES</b>		
<b>NÚMERO</b>	<b>ZONA</b>	<b>ELEMENTO</b>
1	Marcha	Botonera ON
2	Paro	Botonera OFF
<b>SALIDAS DIGITALES</b>		
<b>NÚMERO</b>	<b>ZONA</b>	<b>ELEMENTO</b>
1	Marcha (Funcionamiento del proceso)	Luz Verde
2	Funcionamiento de resistencias	Luz Roja
<b>ENTRADAS ANALÓGICAS</b>		
<b>NÚMERO</b>	<b>ZONA</b>	<b>ELEMENTO</b>
1	Temperatura del Horno	Termocupla Tipo K

## 2.4 SISTEMAS SCADA

### 2.4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano.<sup>15</sup>

En los últimos años, se ha desarrollado un sistema, denominado SCADA, el cual permite supervisar y controlar, las distintas variables que se encuentran en un proceso o planta determinada. Para ello se deben utilizar distintos periféricos, programas de aplicación, unidades remotas, sistemas de comunicación, etc., los cuales permiten al operador mediante la visualización en una pantalla de computador tener el completo acceso al proceso.

<sup>15</sup>Boyer, S.A. (2003).SCADA: Supervisory Control and Data Adquisition. Paperback.



Ahora no sólo se puede supervisar el proceso, sino además tener acceso al historial de las variables de control con mayor claridad, con lo que se crean bases de datos.

#### **2.4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN SCADA**

El nombre SCADA significa: (Supervisory Control And Data Acquisition, Control Supervisor y Adquisición de datos).

Un sistema SCADA es una aplicación o conjunto de aplicaciones software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con los instrumentos y actuadores, e interfaz gráfica de alto nivel con el usuario (pantallas táctiles, ratones o cursores, lápices ópticos, etc.).

El sistema permite comunicarse con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, sistemas de dosificación, etc.) para controlar el proceso en forma automática desde la pantalla del ordenador, que es configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad.

#### **2.4.3 FUNCIONES PRINCIPALES DEL SISTEMA**

- Supervisión remota de instalaciones y equipos: Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.
- Control remoto de instalaciones y equipos: Mediante el sistema se puede activar desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvulas, activar interruptores, prender motores, etc.), de manera automática y también manual.
- Además es posible ajustar parámetros, valores de referencia, algoritmos de control, etc.
- Procesamiento de datos: El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta el sistema, esta información es procesada, analizada, y comparada con datos anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.

- Visualización gráfica dinámica: El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representen el comportamiento del proceso, dándole al operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo.
- Generación de reportes: El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado por el operador.
- Representación de señales de alarma: A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser tanto visuales como sonoras.
- Almacenamiento de información histórica: Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.
- Programación de eventos: Esta referido a la posibilidad de programar subprogramas que brinden automáticamente reportes, estadísticas, gráfica de curvas, activación de tareas automáticas, etc.

## CAPÍTULO 3

### DESARROLLO DEL SOFTWARE

Para la automatización del horno se utilizaron dos programas:

#### **TWIDO SOFT:**

Se desarrolló un programa para el PLC TWIDO TWDLCAA24DRF que tiene como objetivo realizar el control de temperatura para los diferentes tratamientos térmicos, en lenguaje ladder.

#### **LABVIEW:**

Se desarrolló un software en la PC que sirve como interfaz gráfica para el control automático desde la misma.

### **3.1 TWIDO SOFT**

#### **3.1.1 GENERALIDADES**

TwidoSoft, es un entorno de desarrollo gráfico que permite crear, configurar y gestionar aplicaciones para los autómatas programables Twido. TwidoSoft es un programa basado en Windows para un ordenador (PC) que se ejecuta con los sistemas operativos Microsoft Windows.

##### **3.1.1.1 Ventana Principal**

La ventana principal de TwidoSoft proporciona fácil acceso a los menús, comandos, ventanas, barras de herramientas, y vistas de una aplicación. En ella podemos encontrar: barra de título, barra de menús, barra de herramientas principal, navegador de aplicación, editores, visualizadores y barra de estado.

##### **3.1.1.2 Navegador TwidoSoft**

Es una ventana adicional que proporciona una vista en árbol de una aplicación. Las ventanas y las barras de herramientas flotantes pueden trasladarse y colocarse en los bordes de una ventana principal. Los elementos de una aplicación aparecen en orden lógico dependiendo su relación dentro de la aplicación. Estos elementos son: nombre de la aplicación, modelo de autómata,

configuración de hardware, configuración de software, programa, símbolos, animación, documentación, barra del navegador y cuadro de cierre.

### 3.1.1.3 Visualizador de LadderLogic

Proporciona una visualización gráfica de un programa Ladder y los escalones que lo componen. Para editar o modificar escalones, se debe emplear el editor de LadderLogic.

### 3.1.1.4 Editor de LadderLogic

Es un editor de programas basado en gráficos y es utilizado para crear diagramas ladder, mediante los siguientes elementos: barra de título, barra de herramientas, escalón, cabecera de escalón, comentario, reticulado de programación, elementos LadderLogic, barra de herramientas de la paleta de LadderLogic (Ver Figura 3-1).

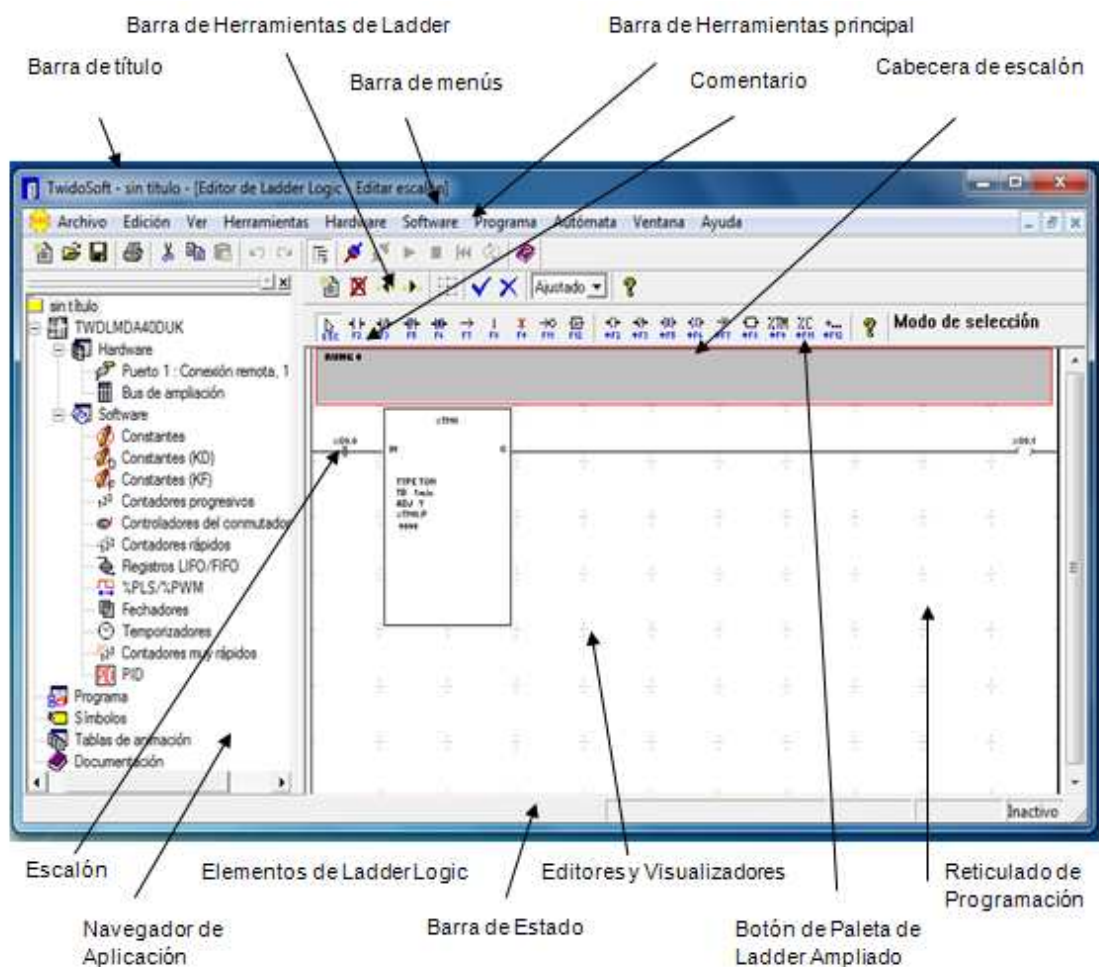


Figura 3-1: Entorno de TwidoSoft.

### 3.1.2 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.

Para crear programas de control usando TwidoSoft se pueden utilizar tres lenguajes de programación diferentes:

#### 3.1.2.1 Lenguaje de lista de instrucciones

Un programa de lista de instrucciones se compone de una serie de expresiones lógicas escritas como una secuencia de instrucciones booleanas ejecutadas de forma secuencial por el autómata.

#### 3.1.2.2 Diagramas LadderLogic

Un diagrama LadderLogic es una forma gráfica de mostrar una expresión lógica. Los diagramas LadderLogic emplean la misma representación gráfica que la de los circuitos en lógica de relé.

#### 3.1.2.3 Lenguaje Grafcet

El lenguaje grafcet está compuesto por una sucesión de pasos y transiciones. El método analítico Grafcet divide cualquier sistema de control secuencial en una serie de pasos a los que se asocian acciones, transiciones y condiciones.

### 3.1.3 OBJETOS DEL LENGUAJE TWIDO SOFT

En la Tabla 3-1 se muestra los objetos que maneja el software:

**Tabla 3-1:** Objetos del lenguaje TwidoSoft.

<b>Apartado</b>
Validación de objetos de lenguaje
Objetos de bit
Objetos de palabras
Objetos flotantes y palabras dobles
Direccionamiento de objetos de bit
Direccionamiento de objetos de palabra
Direccionamiento de objetos flotantes
Direccionamiento de objetos de palabras dobles
Direccionamiento de las entradas y salidas
Direccionamiento de red
Objetos de bloques de función
Objetos de estructurales
Simbolización de objetos

### 3.1.3.1 Objetos de bit

Los objetos de bit son variables de software de tipo bit que se pueden utilizar como operandos y verificar mediante instrucciones booleanas. A continuación se ofrece una lista de objetos de bit.

- Bits de E/S
- Bits internos (bits de memoria)
- Bits de sistema
- Bits extraídos de palabras

### 3.1.3.2 Objetos de palabra

Los objetos de palabras son registros de 16 bits, almacenados en la memoria de datos y pueden contener un valor entero de entre  $-32.768$  y  $32.767$ .

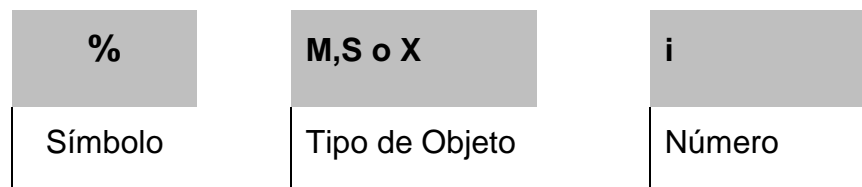
Ejemplos de objetos de palabras:

- Valores inmediatos
- Palabras internas (%MWi) (palabras de memoria)
- Palabras constantes (%KWi)
- Palabras de intercambios de E/S (%IWi, %QWi)
- Palabras de sistema (%SWi)
- Bloques de función (datos de ejecución o configuración)

## 3.1.4 DIRECCIONAMIENTOS DE OBJETOS EN TWIDO SOFT

### 3.1.4.1 Direccionamiento de objetos de bits

En la Figura 3-2 se muestra el formato para direccionar objetos de bit de sistemas internos y la Tabla 3-2 describe los elementos del formato de direccionamiento.



**Figura 3-2:** Formato de direccionamiento de objetos de bits.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Manual de programación Twido Soft

**Tabla 3-2:** Elementos de direccionamiento de bits.

Grupo	Elemento	Descripción
Símbolo	%	El símbolo de porcentaje siempre precede a una variable de software
Tipo de Objeto	M	Los bits internos almacenan valores intermedios mientras se está ejecutando un programa
	S	Los bits de sistema proporcionan información de control y de estado del controlador
	X	Los bits de pasos proporcionan información de estado de las actividades de pasos.
Numero	i	El valor numérico máximo depende del número de objetos configurados

### 3.1.4.2 Direccionamiento de objetos de palabras

En la Figura 3-3 indica el formato para direccionar objetos de palabras y la Tabla 3-3 describe los elementos del formato de direccionamiento.

**Figura 3-3:** Formato de direccionamiento de objetos de palabras.<sup>17</sup>**Tabla 3-3:** Elementos de direccionamiento de objetos de palabras.

Grupo	Elemento	Descripción
Símbolo	%	El símbolo de porcentaje siempre precede a una dirección interna.
Tipo de Objeto	M	Las palabras internas almacenan valores intermedios mientras se está ejecutando un programa
	S	Las palabras de sistema proporcionan información de control y de estado del controlador
	K	Las palabras constantes almacenan valores constantes o mensajes alfanuméricos. Su contenido solo puede sobrescribirse o modificarse utilizando TwidoSoft.
Sintaxis	W	Palabra de 16 bits.
Numero	i	El valor numérico máximo depende del número de objetos configurados

<sup>17</sup>Manual de programación TwidoSoft

### 3.1.4.3 Direccionamientos de las entradas/salidas

Cada punto de entrada/salida (E/S) de una configuración Twido tiene una única dirección (Ver Figura 3-4). Por ejemplo, la dirección "%I0.0.4" sólo representa la entrada 4 de un autómata.

%	I,Q	x	.	y	.	z
Símbolo	Tipo de Objeto	Posición del controlador	Punto	Tipo E/S	Punto	Número de canal

**Figura 3-4:** Formato de direccionamiento de entradas y salidas.<sup>18</sup>

### 3.1.5 COMUNICACIONES DEL PLC TWIDO

Twido ofrece uno o dos puertos serie para las comunicaciones con controladores de E/S remotas o dispositivos generales. Cualquier puerto, si hay más de uno, se puede utilizar para cualquiera de los servicios, con excepción de la comunicación con Twido Soft, que sólo se puede establecer mediante el primer puerto. Los controladores Twido admiten tres protocolos básicos distintos: Conexión Remota, ASCII y Modbus (master de Modbus o slave de Modbus).

**Conexión remota:** El protocolo de conexión remota es un bus master/slave de alta velocidad diseñado para transferir una pequeña cantidad de datos entre el controlador master y hasta siete controladores remotos (slave). Se transfieren datos de E/S o de aplicación dependiendo de la configuración de los autómatas remotos.

**ASCII:** El protocolo ASCII es un protocolo simple de modo de caracteres de dúplex completo que se utiliza para transmitir o recibir una cadena de caracteres hacia o desde un dispositivo simple (impresora o terminal).

**Modbus RTU:** El protocolo Modbus es un protocolo master/slave que permite a un master, y sólo a uno, pedir respuestas de los slaves o realizar acciones dependiendo de las peticiones. El master puede dirigirse a los slaves individuales

<sup>18</sup>Manual de programación TwidoSoft



o iniciar una difusión de mensajes para todos los slaves. Los slaves devuelven un mensaje (respuesta) a las peticiones que se les envían individualmente.

### 3.1.5.1 Configuración del esclavo TWIDO.

Los autómatas TWIDO tienen un puerto integrado de comunicación RS-485 a RS-232 configurable para operar con los protocolos ya mencionados.

#### Direccionamiento Modbus para el PLC TWIDO

Estos autómatas atienden a las peticiones de un maestro Modbus mediante el manejo de espacios de memoria denominados marcas, las que pueden ser de tipo digital M (dato con formato booleano) o de tipo de registro MW (dato con formato de palabra). Así se tiene que cada marca digital o de tipo palabra posee una dirección particular para el master Modbus (Ver Tabla 3-4).

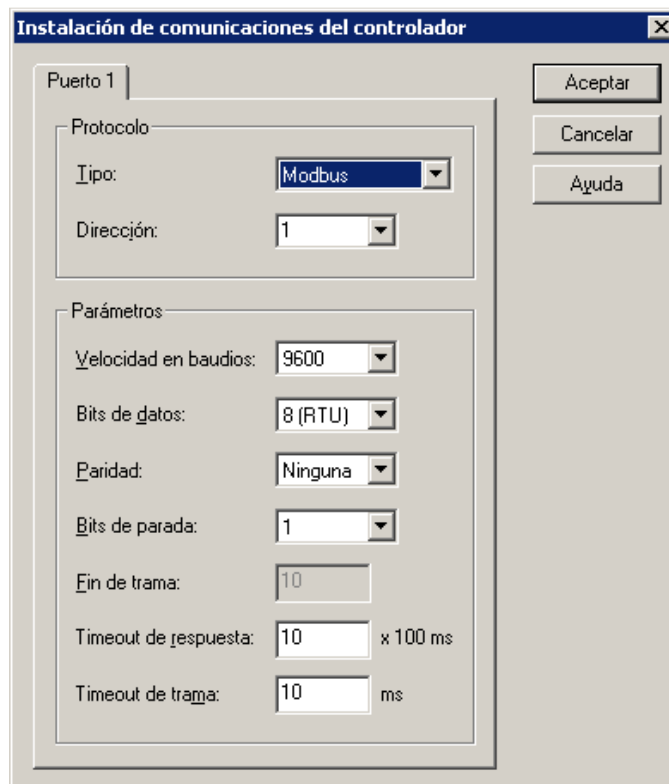
**Tabla 3-4:** Direccionamiento Modbus para PLC TWIDO.

DIRECCION MODBUS	R	W	DIRECCION TWIDO
.00001	√	√	M0
.00002	√	√	M1
.00003	√	√	M2
.0....	√	√	...
.00256	√	√	M255
.10001	√	-	M0
.10002	√	-	M1
.10003	√	-	M2
.1....	√	-	...
.10256	√	-	M255
.30001	√	-	MW0
.30002	√	-	MW1
.30003	√	-	MW2
.3....	√	-	....
.33000	√	-	MW2999
.40001	√	√	MW0
.40002	√	√	MW1
.40003	√	√	MW2
.4....	√	√	....
.43000	√	√	MW2999

### Pasos a seguir para la configuración del PLC

Para configurar al PLC TWIDO y utilizar el enlace serial para enviar y recibir caracteres utilizando el protocolo Modbus, se procede como se explica a continuación:

1. Definir la comunicación en el puerto 1 en el hardware mediante TwidoSoft.
2. Configurar los parámetros de comunicación del puerto utilizado para el protocolo Modbus RTU, siguiendo las condiciones de dirección, velocidad y paridad planteadas en el diseño (Ver Figura 3-5).



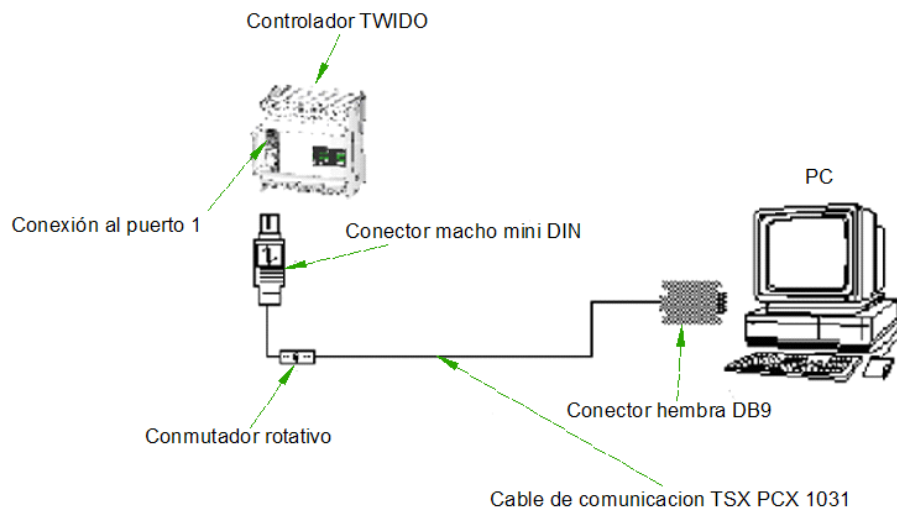
**Figura 3-5:** Configuración de parámetros de comunicación TWIDO.

**NOTA:** Para el proyecto la dirección es 1, el campo de velocidad se define en 19200 bps, el número de bits de datos es 8, es decir Modbus RTU, y no se utiliza paridad.

#### 3.1.6 DESCARGA DEL PROGRAMA AL PLC


Para descargar el programa al controlador TWIDO es necesario contar con el software TwidoSoft y el cable de comunicación TSX PCX 1031 conectado entre el puerto 1 RS485 del PLC al puerto COM serial del computador RS232 (DB9). Se

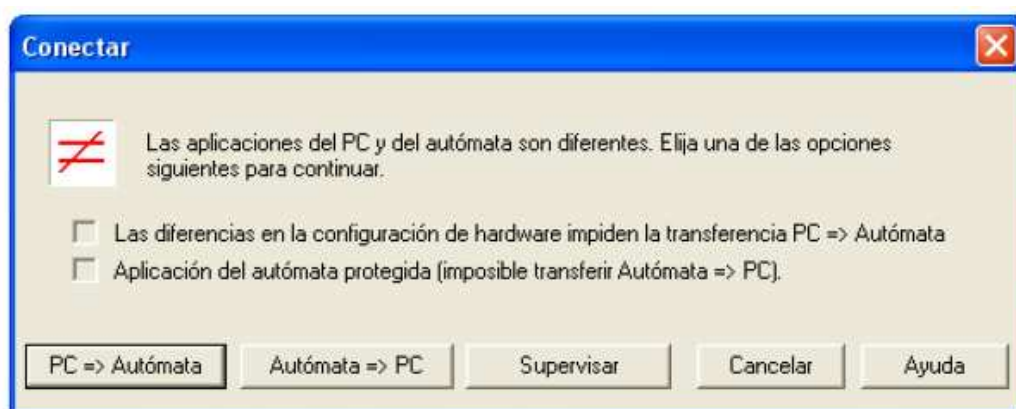
debe asegurar que el conmutador rotativo del cable está en la posición 2 (Ver Figura 3-6).



**Figura 3-6:** Conexión PLC TWIDO con PC.

Después de abrir el archivo contenedor del programa, la secuencia a seguir para la descarga es:

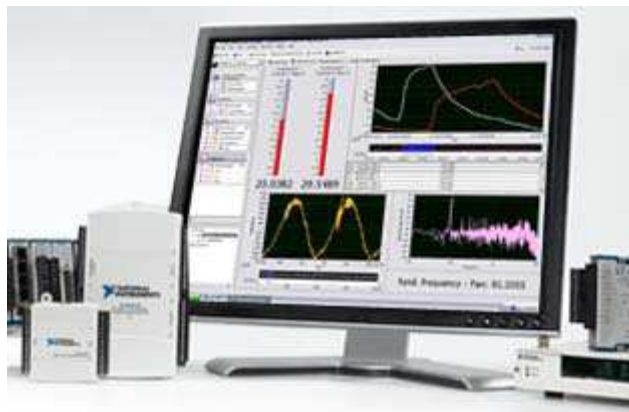
- Seleccionar una conexión en la opción **Autómata** en la barra de herramientas.
- Seleccionar **Conectar** en el icono  o en la opción **Autómata – Conectar**.
- Seleccionar **Transferir PC-Controlador** en la ventana desplegada (Ver Figura 3-7).



**Figura 3-7:** Transferencia del programa en el controlador.

## 3.2 LABVIEW

LABVIEW es una plataforma estándar en la industria de pruebas y medidas, para el desarrollo de sistemas de prueba y control de instrumentación. En el campo de la automatización industrial se usa para la adquisición de datos, análisis, monitorización y registro, así como para el control y monitorización de procesos. Este software se eligió debido a que el proceso de creación de un Instrumento Virtual (VI), (Ver Figura 3-8), se ha simplificado notablemente, minimizándose el tiempo de desarrollo de las aplicaciones, en comparación con otros lenguajes de programación como C, C++, java.



**Figura 3-8:** Imagen de un Instrumento Virtual (VI) en LABVIEW

### 3.2.1 INSTRUMENTOS VIRTUALES

Un programa creado en LABVIEW es llamado como Instrumento Virtual y consta de tres partes a crear.

#### 3.2.1.1 El panel frontal.

Donde estarán ubicados todos los indicadores y controles que el usuario podrá ver cuando el programa este en funcionamiento. Por ejemplo botones, perillas, gráficas, etc. (Ver Figura 3-9).

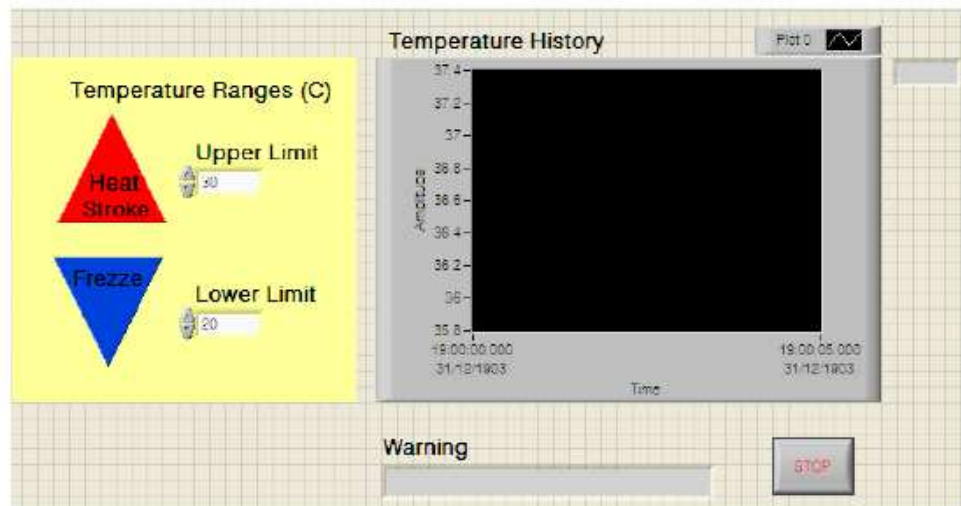


Figura 3-9: Panel Frontal.

### 3.2.1.2 El diagrama de bloques

Muestra el programa en código gráfico G, el cual es el objetivo de aprendizaje en un nivel básico. Se usan en este diagrama estructuras de programación, y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas, a través de líneas. En este las subrutinas son mostradas como iconos de cajas negras, con unas entradas y unas salidas determinadas, donde en el interior se cumple una función específica. El flujo se aprecia, como se dibujaría en un bosquejo de sistemas, cuando se habla de teoría de sistemas, donde cada subsistema se representa como un cuadro con entradas y salidas (Ver Figura 3-10).

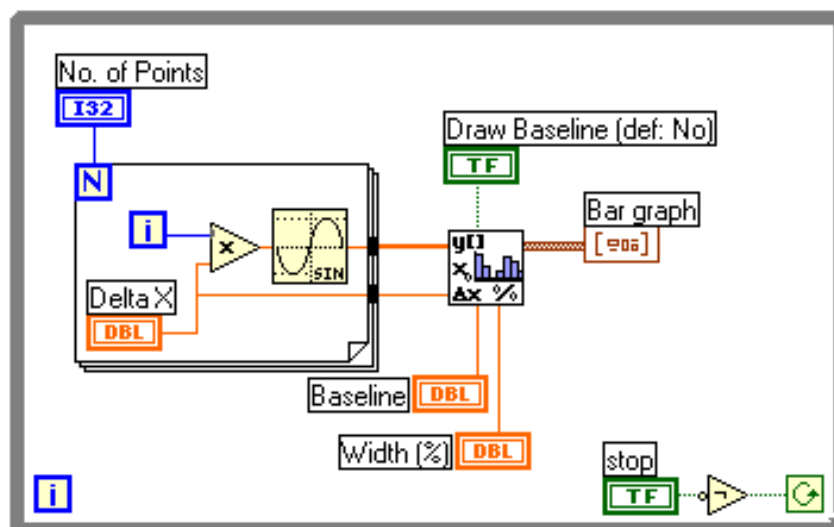


Figura 3-10: Diagrama de bloques.

### 3.2.1.3 El ícono de conexión

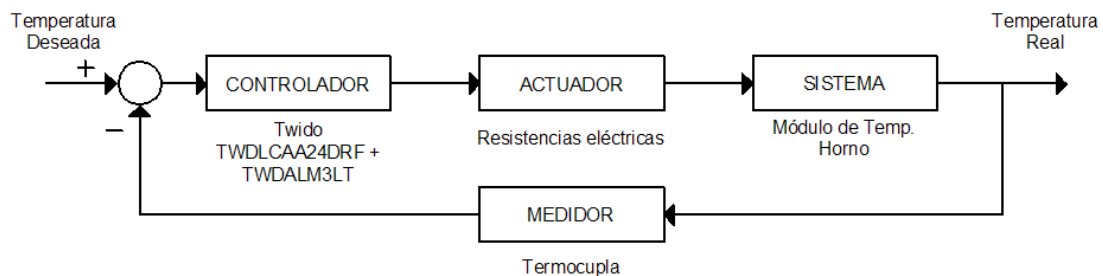
Se usa para utilizar el programa creado como subrutina en otro programa, donde el ícono será la caja negra, y las entradas son las conexiones a los controles del programa subrutina, y las salidas son las conexiones a los indicadores del mismo subprograma. Al crear el ícono, se conecta a través del alambre de soldadura a los indicadores y controles en la forma que se desee que se distribuyan las entradas y salidas en la caja negra, tal como en un circuito integrado algunos pines corresponden a alguna función en él. La idea es crear un sistema de programación modular, donde cada rutina creada llame otras rutinas, y estas a su vez otras de menor nivel, en una cadena jerárquica con cualquier límite deseado. Así cuando se use un módulo, no se requiere saber cómo funciona interiormente, simplemente solo basta conocer sus entradas y salidas para ser así usado.

Todos los indicadores y controles ubicados en el panel frontal están respaldados por un terminal de conexión en el diagrama de bloques tal como si se tuviera un tablero de control de una máquina, donde por el frente se ven los indicadores y por el lado posterior se aprecian todos los cables y terminales de conexión.

## 3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PARA EL PLC

### 3.3.1 INTRODUCCIÓN

Se realiza el control de temperatura de un horno en un rango de trabajo de 15 a 1200 °C aproximadamente, para lo que se emplea un PLC TWIDO que en complemento con el software Labview posibilita la visualización y comando del proceso. Para realizar el control de la variable se implementa un lazo cerrado (Ver Figura 3-11).



**Figura 3-11:** Esquema del sistema de control en lazo cerrado para el horno.

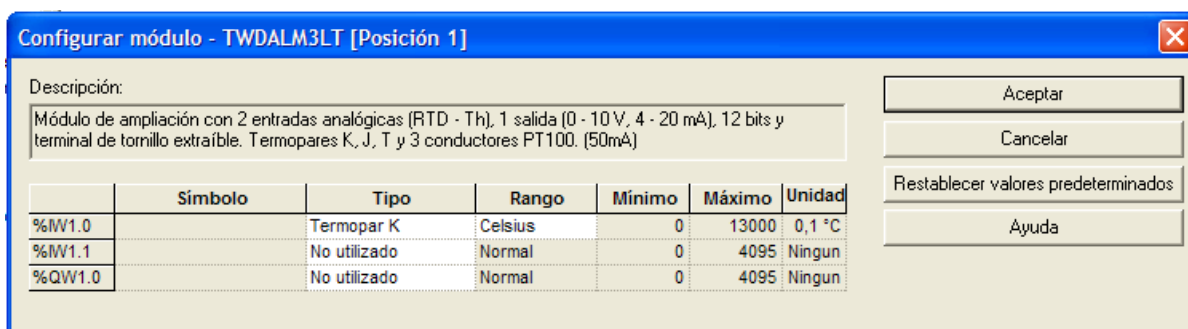
Un sistema de control en lazo cerrado es aquel que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.

Para realizar el control en lazo cerrado se utiliza un VI en el software Labview que implementa el tipo de control ON/OFF (encendido/apagado), el cual enciende la carga si la temperatura no alcanza la referencia (temperatura deseada) y la apaga si ha llegado a ella con cierto valor de histéresis.

Para el control de temperatura del horno se dispone de una termocupla tipo K, respecto a los actuadores el sistema utiliza al máximo la energía de las resistencias eléctricas para calentar mientras que para enfriar solo se interrumpe el paso de corriente a estas.

### 3.3.2 PROGRAMA PRINCIPAL

El valor de temperatura en el interior del horno se mide con la termocupla la cual genera una señal de corriente entre 4-20mA, esta ingresa al modulo analógico TWDALM3LT del PLC configurado para termocupla K en el software TwidoSoft entrega un valor digital de 0 a 1300°C a la entrada analógica (%IW0.1) (Ver Figura 3-12).



**Figura 3-12:** Configuración del modulo TWDALM3LT.

En la Tabla 3-5 se indica las entradas y salidas digitales y analógicas del programa con su direccionamiento:

**Tabla 3-5:** Entradas y salidas digitales y analógicas direccionadas del programa.

<b>ENTRADAS/SALIDAS</b>	
<b>Entradas Digitales</b>	
%I0.0	Pulsante de Marcha
%I0.1	Pulsante de Paro
<b>Salidas Digitales</b>	
%Q0.1	Resistencias
%Q0.2	Luz de funcionamiento del proceso
<b>Entradas Analógicas</b>	
%IW0.1	Señal de la Termocupla

Para la comunicación del programa cargado al PLC con el software Labview se deben direccionar entradas y salidas digitales y analógicas a través de marcas digitales o de registro (lectura y escritura) para la comunicación Modbus.

En Tablas 3-6 y 3-7 se muestran las marcas digitales y analógicas del programa completo para el direccionamiento Modbus.

**Tabla 3-6:** Marcas digitales del programa.

<b>MARCAS DIGITALES</b>	
<b>MARCAS DE REGISTRO</b>	<b>NOMBRE</b>
%M0	MARCHA
%M1	FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO
%M2	PARO
%M3	OFF RAMPA 1
%M4	OFF PERMANENCIA 1
%M5	OFF RAMPA 2
%M6	OFF PERMANENCIA 2
%M7	OFF RAMPA 3
%M8	OFF PERMANENCIA 3
%M9	OFF RAMPA 4
%M10	OFF PERMANENCIA 4
%M11	OFF RAMPA 5
%M12	OFF PERMANENCIA 5
%M13	RESISTENCIAS
%M16	RESTRICCIÓN 1200°C
%M19	HISTERESIS



**Tabla 3-7:** Marcas analógicas del programa.

<b>MARCAS ANALÓGICAS</b>	
<b>MARCAS DE REGISTRO</b>	<b>NOMBRE</b>
%MW1	TEMPORIZADOR 0
%MW2	TEMPORIZADOR 1
%MW3	TEMPORIZADOR 2
%MW4	TEMPORIZADOR 3
%MW5	TEMPORIZADOR 4
%MW6	TEMPORIZADOR 5
%MW7	TEMPORIZADOR 6
%MW8	TEMPORIZADOR 7
%MW9	TEMPORIZADOR 8
%MW10	TEMPORIZADOR 9
%MW11	HISTÉRESIS EN BAJA
%MW12	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO *TIEMPO
%MW13	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 1
%MW14	CURVA TOTAL
%MW15	TEMPERATURA INICIAL
%MW16	TEMPERATURA 1
%MW17	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 2
%MW18	TEMPERATURA 2
%MW19	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 3
%MW20	TEMPERATURA 3
%MW21	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 4
%MW22	TEMPERATURA 4
%MW23	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 5
%MW24	TEMPERATURA DE CORTE
%MW25	ECUACIÓN PUNTO MÁXIMO
%MW26	TEMPERATURA 5
%MW27	HISTÉRESIS EN ALTA
%MW28	TIEMPO TRANSCURRIDO DEL PROCESO

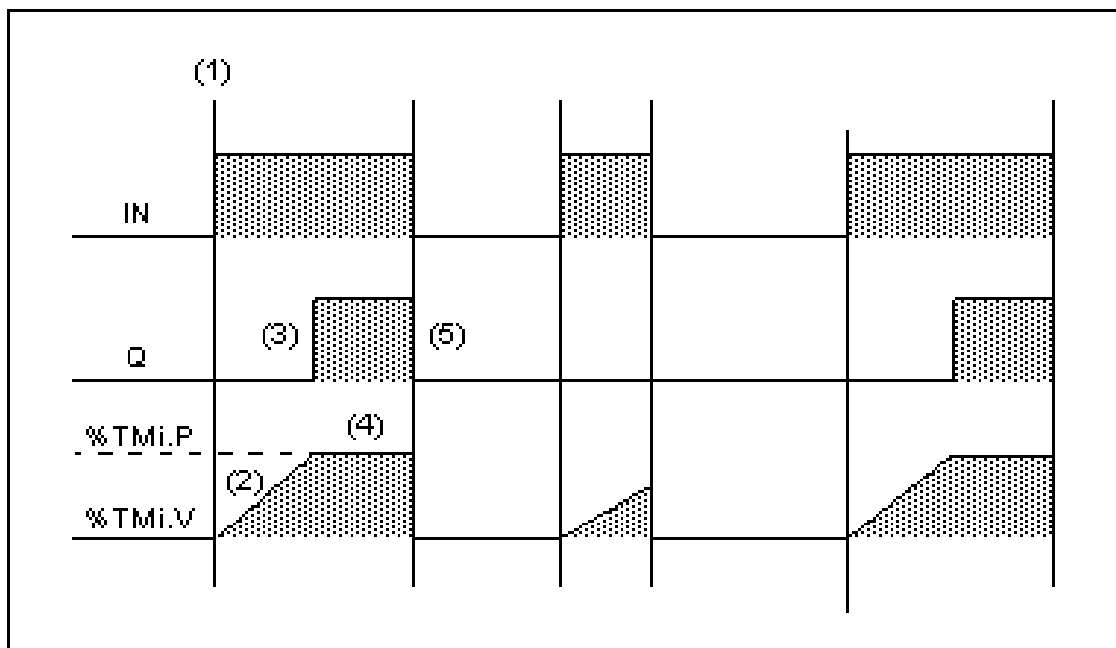
Con la información anterior se describe el programa paso por paso. El programa en TwidoSoft se presenta en el **ANEXO 3**.

En el paso 0 del programa todo el proceso inicia cuando se oprime el botón MARCHA (%I0.0) direccionamiento (%M0), se puede detener el proceso con el botón de PARO (%I0.1) direccionamiento (%M2), lo cual restablece los valores del

programa y apaga las resistencias. La marcha activa una memoria o marca digital (%M1) que activa los temporizadores.

El paso 1 y 3 se dedican al direccionamiento de la variable analógica enviada por la termocupla a una marca de palabra (%MW0) y diez temporizadores de retardo a la conexión tipo TON (%TM0.P a %TM9.P) con base de tiempo en minutos para realizar los 5 escalones a marcas de registro (%MW1 a %MW10).

Los temporizadores tipo TON funcionan como se muestra en la Figura 3-13.



**Figura 3-13:** Funcionamiento de los temporizadores TON.<sup>19</sup>

El bloque de función de los temporizadores dispone de los parámetros enumerados en la Tabla 3-8.

<sup>19</sup>Manual de programación TwidoSoft.

**Tabla 3-8:** Parámetros de los temporizadores. <sup>20</sup>

Parámetro	Etiqueta	Valor
Número de temporizador	%Tmi	0 a 63: TWDLCAA10DRF y TWDLCAA16DRF. 0 a 127 para los demás controladores.
Tipo	TON	• retraso durante el ajuste (predeterminado)
	TOF	• retraso durante el restablecimiento
	TP	• pulso (monoestable)
Base de tiempo	TB	1 min (predeterminado), 1 s, 100 ms, 10 ms, 1 ms
Valor actual	%Tmi.V	Palabra que aumenta de 0 a %Tmi.P cuando el temporizador está en funcionamiento. Se puede leer y comprobar, pero no se puede escribir desde el programa. %Tmi.V se puede modificar utilizando el editor de tablas de animación.
Valor preestablecido	%Tmi.P	0 - 9999. Palabra que se puede leer, comprobar y escribir desde el programa. El valor predeterminado es 9999. El período o retardo generado es igual a %Tmi.P x TB.

Los parámetros que se toman en cuenta para la programación son:

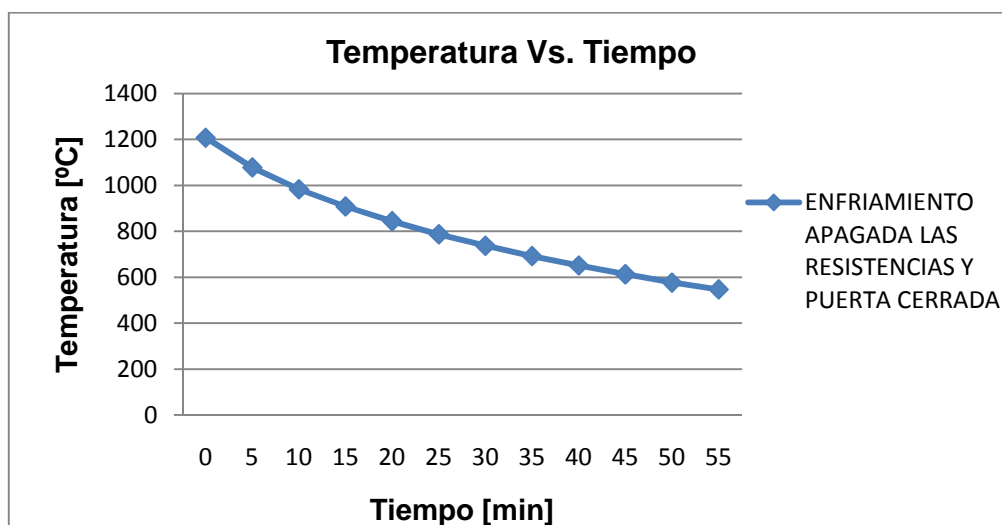
- El programa admite pendientes positivas y negativas en todos sus escalones.
- Las velocidades positivas pueden tener un valor desde 2°C/min hasta un máximo de 30°C/min establecido por la conexión en paralelo explicada en el capítulo anterior.
- La temperatura máxima por seguridad que se puede programar es de 1200°C.
- La pendiente negativa es única en su valor y no se puede modificar ya que depende del enfriamiento natural del horno, esto ocurre cuando las resistencias están apagadas y la puerta está cerrada, esta pendiente puede ser programada en cualquier escalón.

En la Tabla 3-9 y Figura 3-14 se indican los datos de enfriamiento del horno.

<sup>20</sup>Manual de programación TwidoSoft.

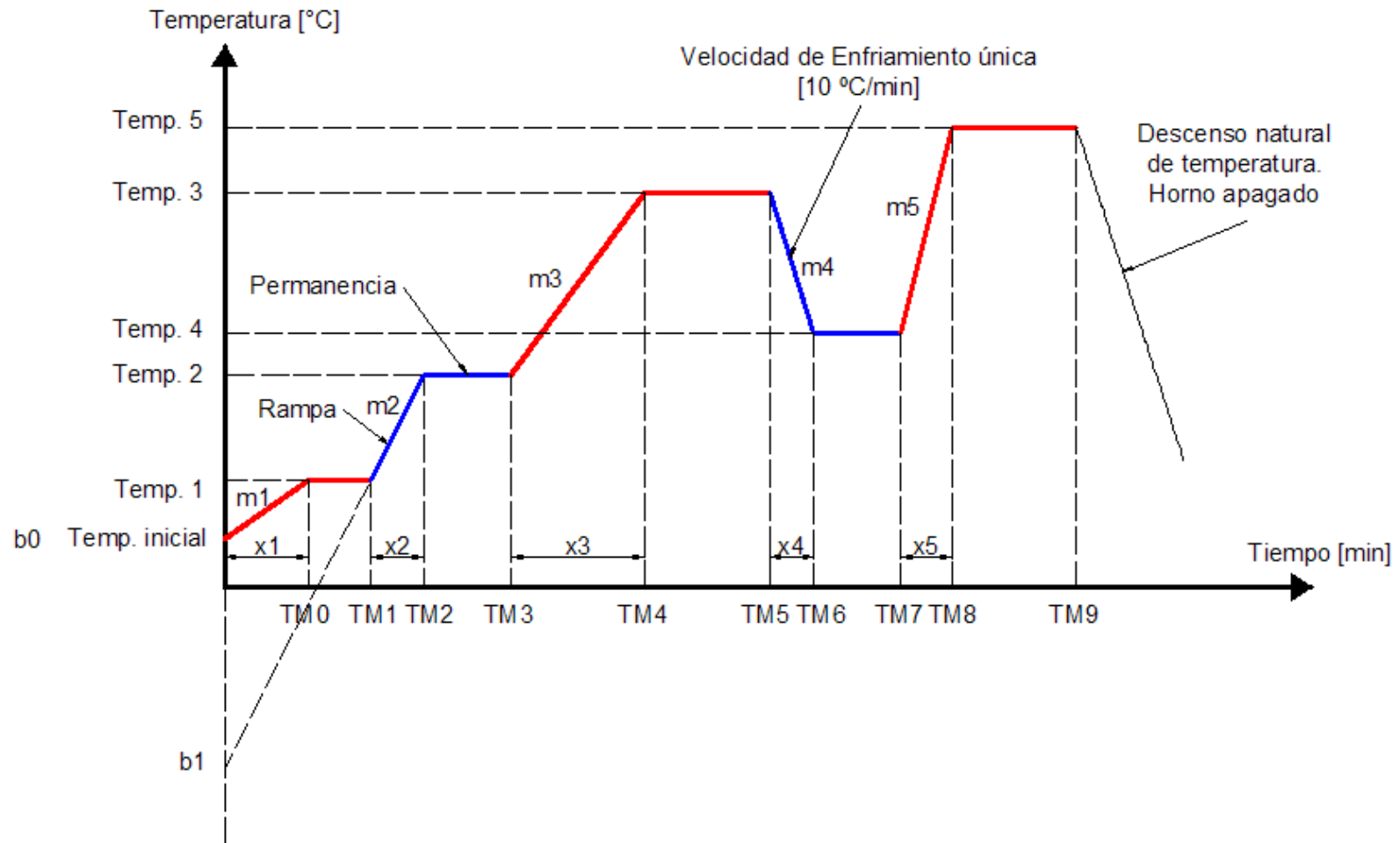
**Tabla 3-9:** Datos de Temperatura Vs. Tiempo de enfriamiento natural del horno.

<b>ENFRIAMIENTO NATURAL DEL HORNO</b>			
Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Velocidad de enfriamiento [°C/min]	Velocidad promedio [°C/min]
0	1207		
5	1078	25,8	
10	983	19	11,6
15	908	15	
20	844	12,8	
25	787	11,4	
30	737	10	
35	692	9	
40	651	8,2	
45	613	7,6	
50	577	7,2	
55	547	6	

**Figura 3-14:** Temperatura Vs. Tiempo de enfriamiento natural del horno.

Como se observa el enfriamiento escogido único será de 10°C/min en un rango 950 a 600°C en donde el horno trabajara la mayor parte del tiempo.

En la Figura 3-15 se muestra las diferentes curvas que realiza el horno. La gráfica cuenta con 5 rampas positivas y/o negativas ( $m_1$  a  $m_5$ ), 5 permanencias de temperatura, y 5 Tiempos de permanencia en minutos. Al momento de la programación del proceso se pueden o no programar los 5 escalones completos si se desea.



**Figura 3-15:** Funcionamento do forno.

Como se observa en la figura se tiene que cada escalón tiene como formula una ecuación lineal, el mismo que cuando es una rampa es igual a:

$$Y_n = \pm m_n * x_n + b_{n-1}$$

Y cuando es una permanencia:

$$Y_n = Temp_n$$

Por lo que las siguientes marcas de registro representan la curva:

$$\% MW12 = \pm m_n * x_n$$

$$\% MW14 = \% MW12 + b_{n-1}$$

Entonces se tiene para cada rampa:

$$Rampa.1 = \pm m_1 * x_1 + b_0 \quad Permanencia.1 = Temp.1$$

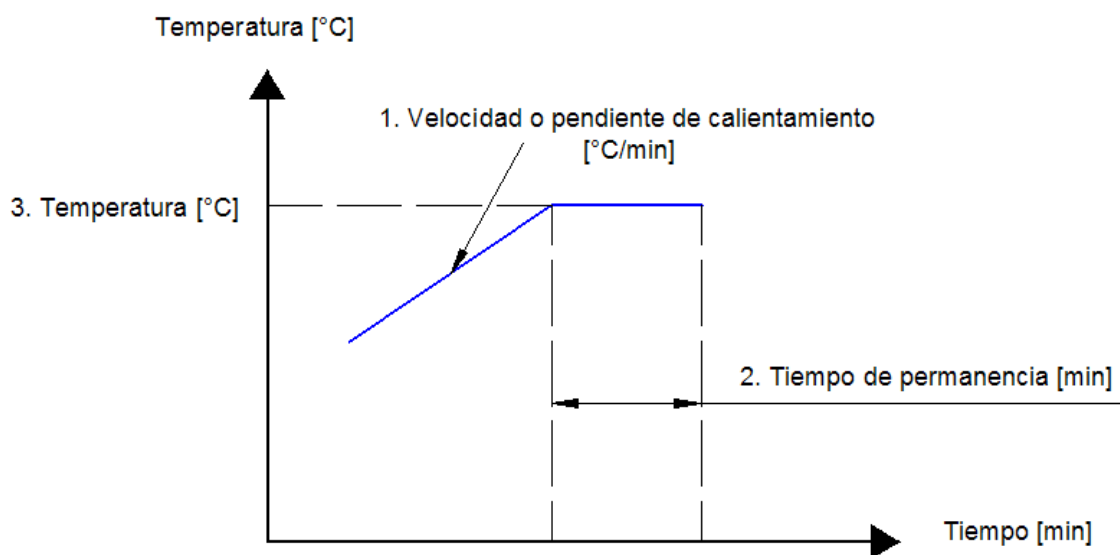
$$Rampa.2 = \pm m_2 * x_2 + b_1 \quad Permanencia.2 = Temp.2$$

$$Rampa.3 = \pm m_3 * x_3 + b_2 \quad Permanencia.3 = Temp.3$$

$$Rampa.4 = \pm m_4 * x_4 + b_3 \quad Permanencia.4 = Temp.4$$

$$Rampa.5 = \pm m_5 * x_5 + b_4 \quad Permanencia.5 = Temp.5$$

En el HMI se programan tres variables para un escalón (Ver Figura 3-16)



**Figura 3-16.** Variables del proceso.

Por lo que el direccionamiento de las tres variables que se programan en el HMI del proceso en marcas de registro se muestra en la Tabla 3-10:

**Tabla 3-10:** Variables que se programan en el HMI y sus respectivas marcas internas.

VARIABLES DEL PROCESO		MARCAS DE REGISTRO
Velocidad de calentamiento	m <sub>1</sub>	%MW13
	m <sub>2</sub>	%MW17
	m <sub>3</sub>	%MW19
	m <sub>4</sub>	%MW21
	m <sub>5</sub>	%MW23
Temperaturas	Temp. 1	%MW16
	Temp. 2	%MW18
	Temp. 3	%MW20
	Temp. 4	%MW22
	Temp. 5	%MW24
Tiempos	Temporizador 0	%MW1
	Temporizador 1	%MW2
	Temporizador 2	%MW3
	Temporizador 3	%MW4
	Temporizador 4	%MW5
	Temporizador 5	%MW6
	Temporizador 6	%MW7
	Temporizador 7	%MW8
	Temporizador 8	%MW9
	Temporizador 9	%MW10

La variable tiempo de permanencia resulta de restar los valores de los temporizadores.

Con lo antes mencionado en el programa se procede a realizar el primer escalón (rampa y permanencia) en los pasos del 4 al 7 donde la temperatura inicial ( $b_0$ ) se registra en %MW15.

Al activar la marcha los 10 temporizadores empiezan a contar y la rampa 1 con la ecuación lineal antes mencionada empieza:

$$\%MW12 = \%MW13 * \%TM0.V$$

$$\%MW14 = \%MW12 + \%MW15$$

Después que el TM0 acabe de contar, es decir, la rampa 1 se complete, empieza la etapa de permanencia es decir que la curva (%MW14) se iguala a la temperatura programada:

$$\%MW14 = \%MW16$$

Después de que el TM1 acabe con la etapa de permanencia permite el paso al siguiente escalón realizado en los pasos del 8 al 11.

Empieza la segunda rampa con las siguientes ecuaciones:

$$\%MW12 = \%MW17 * \%TM 2.V$$

$$\%MW14 = \%MW17 + \%MW 24$$

Donde %MW24 es  $b_1$ , la temperatura de corte de la segunda rampa, y esta se obtiene con las siguientes ecuaciones (Ver figura 3-17):

$$\%MW 25 = \%MW17 * \%MW 2$$

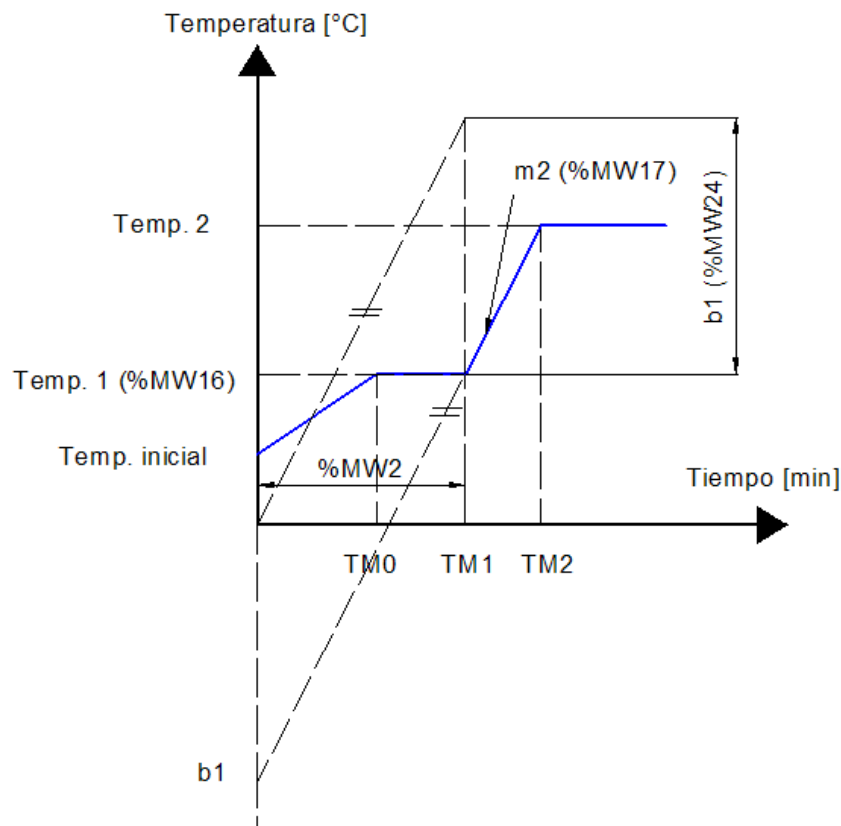
$$\%MW 24 = \%MW16 - \%MW 25$$

Después que el TM2 acabe de contar, es decir, la rampa 2 se complete, empieza la etapa de permanencia es decir que la curva (%MW14) se iguala a la temperatura programada:

$$\%MW14 = \%MW18$$

Después de que el TM3 acabe con la etapa de permanencia permite el paso al siguiente escalón y empieza un ciclo parecido a la segunda rampa hasta completar los cinco escalones, todo este proceso se realiza en los pasos 11 al 24 del programa, al terminar el quinto escalón se restablecen los valores de las variables.





**Figura 3-17:** Proceso de la segunda rampa en el programa.

El control ON-OFF es uno de los mandos más sencillos y económicos de utilizar, el cual no requiere de un sistema complejo para su funcionamiento.

El control ON-OFF cuenta con una ventana de histéresis encerrada por dos valores según los cuales el controlador enciende o apaga el horno. Los valores de los puntos extremos de la ventana han sido determinados de acuerdo a los factores de funcionamiento de horno.

En el paso 2 y 26 se establecen ecuaciones de las marcas de registro interno (%MW11 y MW27) que se igualan con la marca de registro de la curva (%MW14) en mas tres grados y menos tres grados, que se necesitan para que la curva real del horno siga a la curva teórica programada con  $\pm 3$  grados centígrados de histéresis.

$$\%MW11 = \%MW14 - 3$$

$$\%MW27 = \%MW14 + 3$$

Cuando:

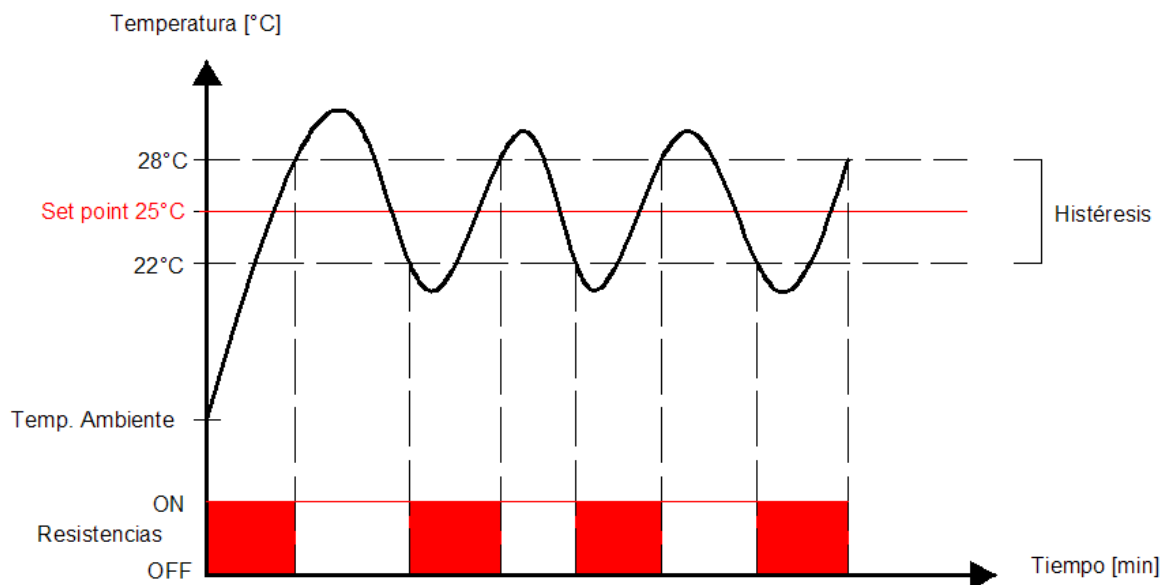
$$%MW0 \leq \%MW11$$

El valor de la termocupla (%MW0) sea menor o igual a %MW11 se encenderán las resistencias (%Q0.1), y cuando:

$$%MW0 \geq \%MW27$$

El valor de la termocupla (%MW0) sea mayor o igual a %MW27 se apagaran las resistencias (%Q0.1).

En la Figura 3-18 se muestra el comportamiento de la temperatura frente al control ON-OFF con histéresis implementado.

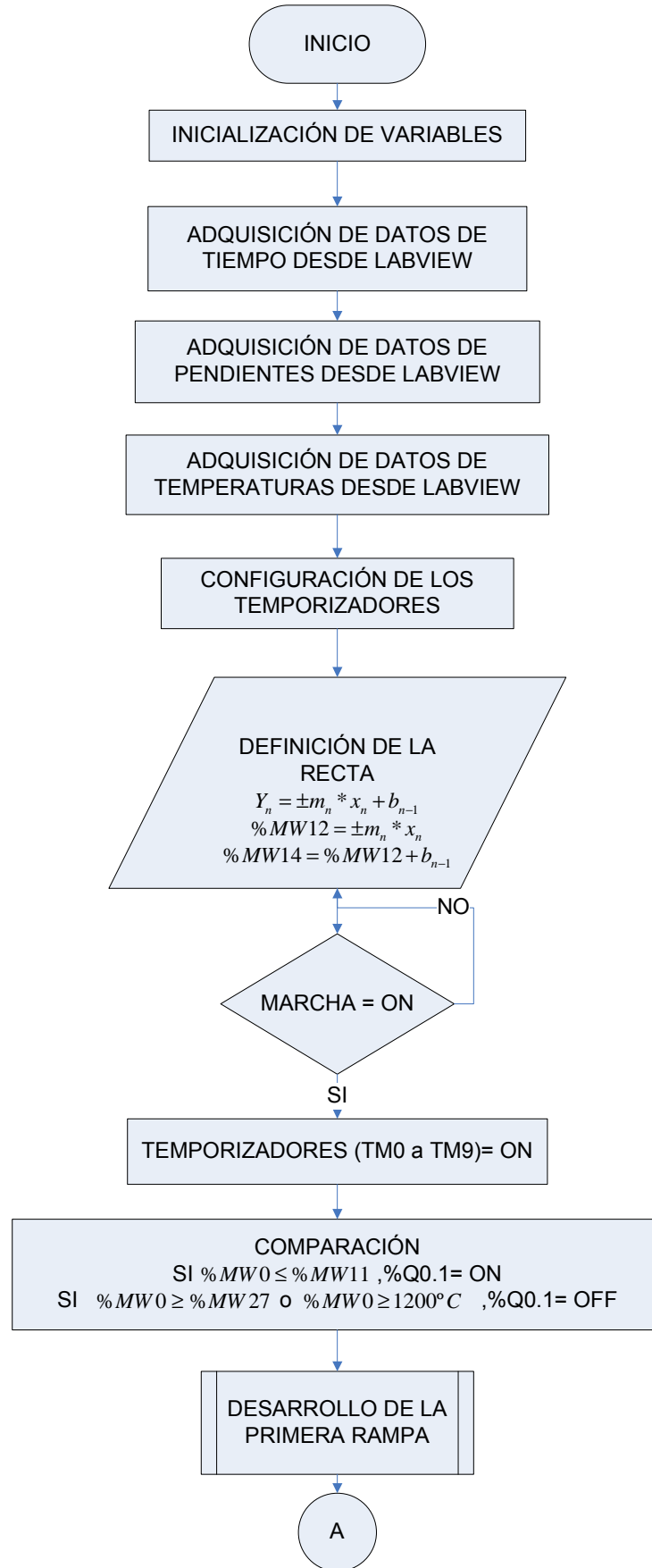


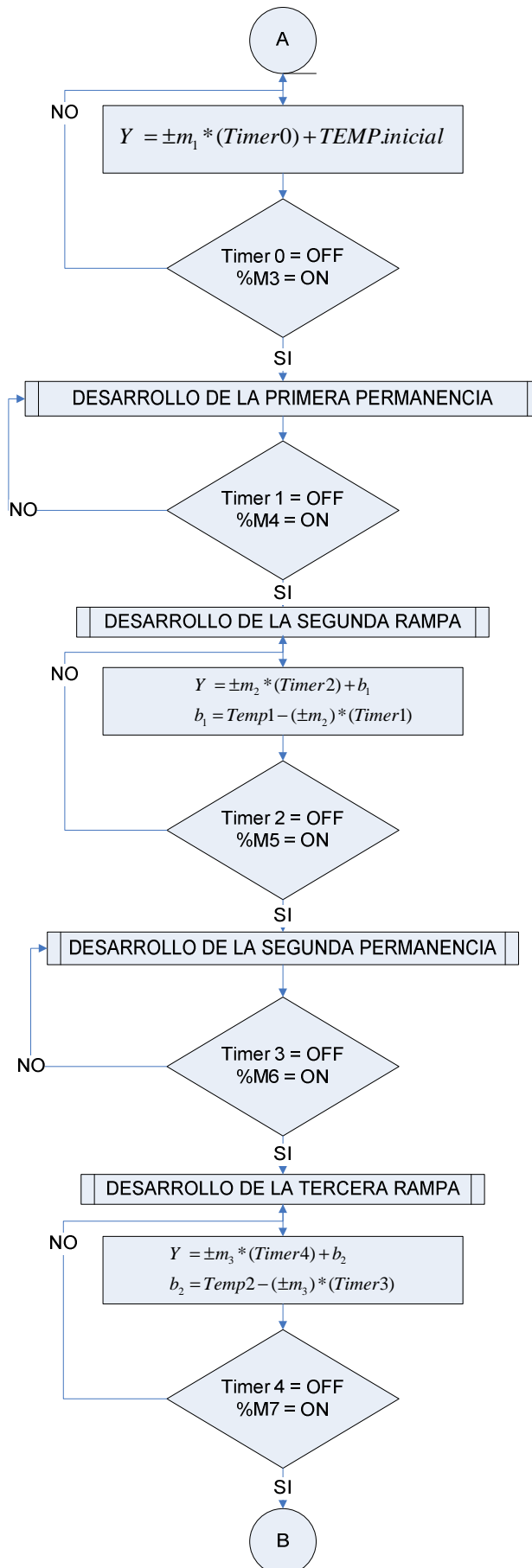
**Figura 3-18:** Gráfica del control ON-OFF para el horno.

En el paso 27 se realiza la restricción de funcionamiento hasta 1200°C, en el paso 28 el direccionamiento de las resistencias (%M13), y por el último el direccionamiento del tiempo transcurrido del proceso (%MW28).

### 3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DEL PLC

En la Figura 3-19 se muestra el diagrama de flujo del programa.





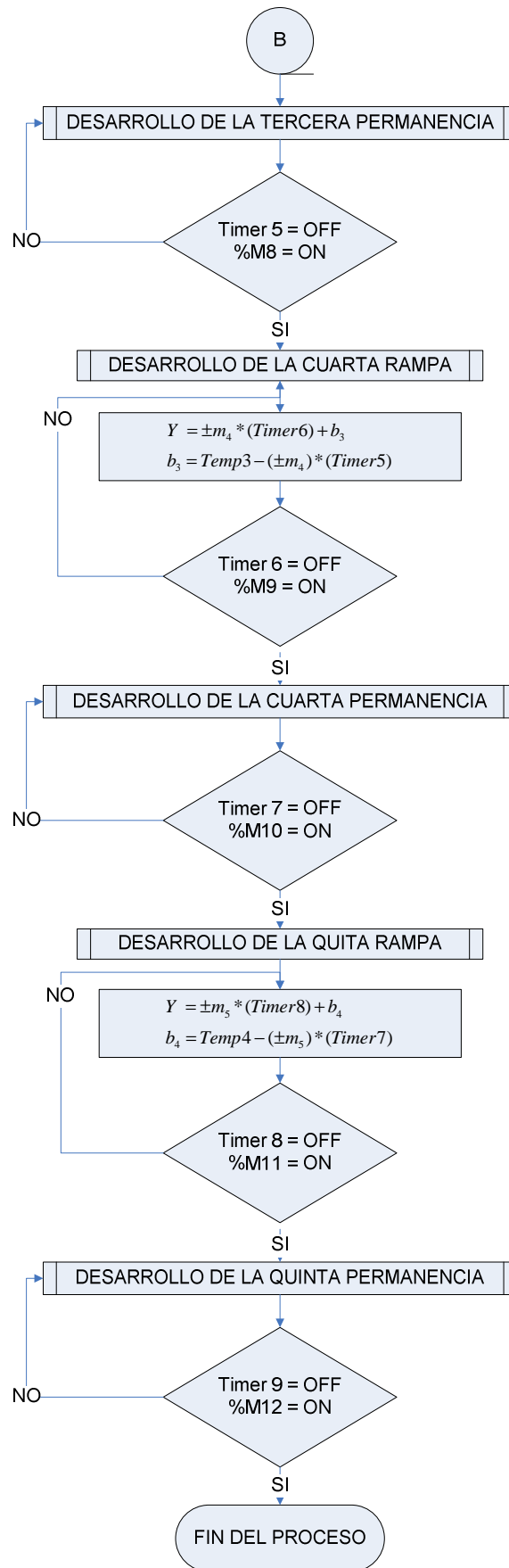


Figura 3-19: Diagrama de flujo del Programa.

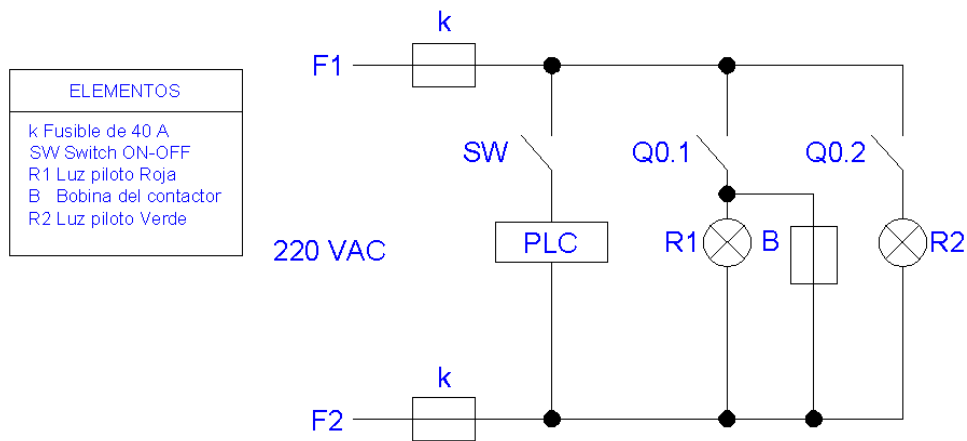
### 3.4 DIAGRAMAS DE CONEXIONES

#### 3.4.1 DIAGRAMA DE CONEXIONES AL PLC

En el diagrama de conexiones de las entradas y salidas de la Figura 3-22 se muestra los elementos de control asignados a cada una de las direcciones del PLC.

#### 3.4.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL CIRCUITO DE CONTROL Y PROTECCIÓN

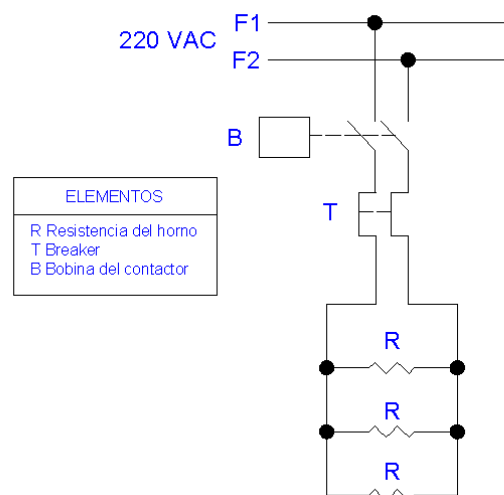
En la Figura 3-20 se indica el diagrama del circuito de control y protección



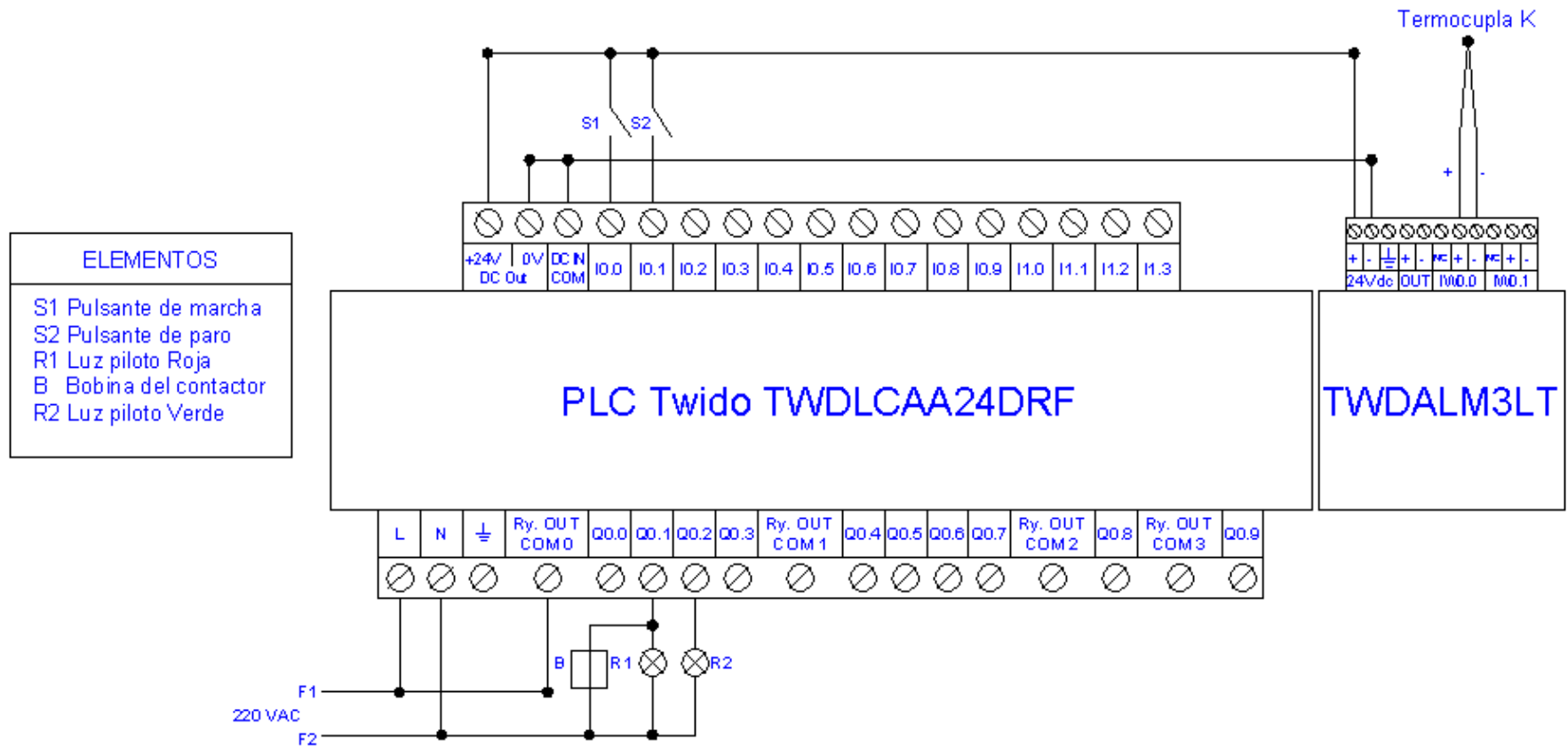
**Figura 3-20:** Diagrama del circuito de control y protección.

#### 3.4.3 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL CIRCUITO DE POTENCIA

La Figura 3-21 indica el diagrama del circuito de potencia.



**Figura 3-21:** Diagrama del circuito de potencia.



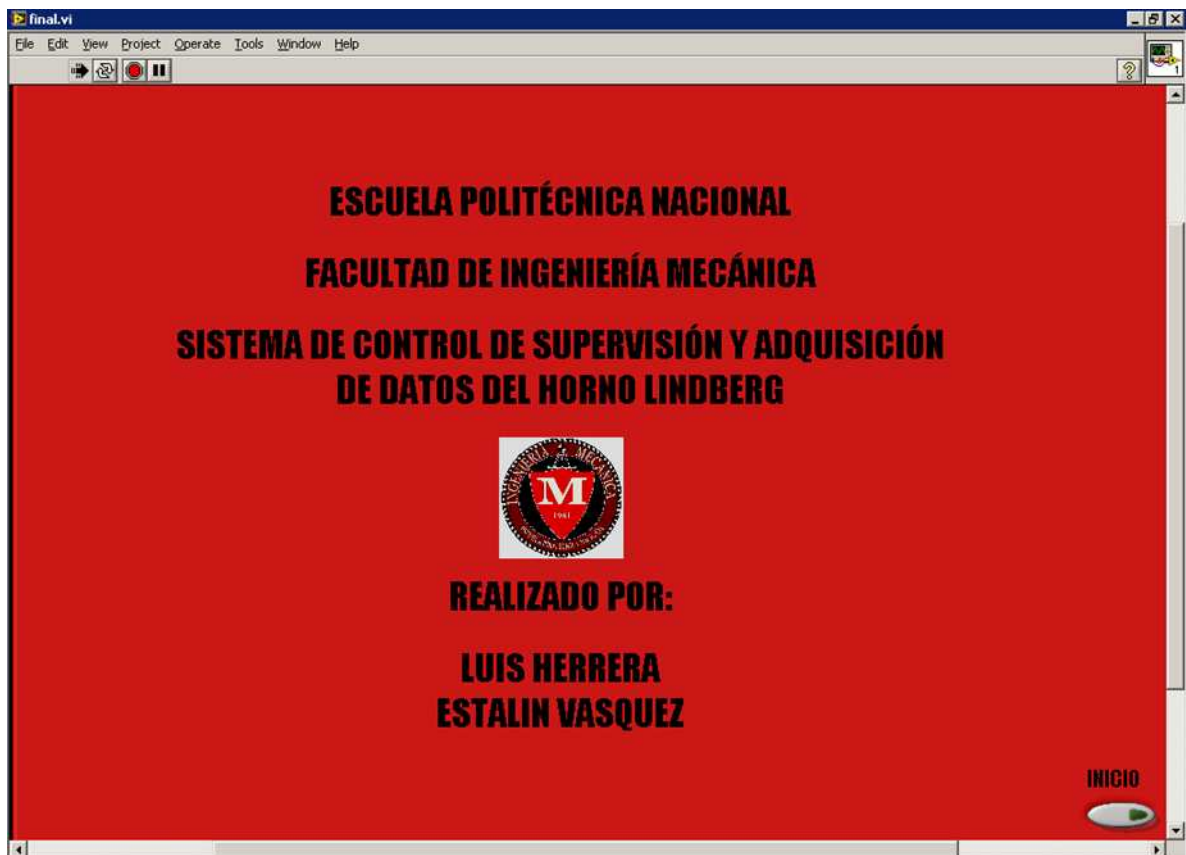
**Figura 3-22:** Diagrama de conexiones del PLC.

### 3.5 INTERFAZ DESARROLLADA EN LABVIEW

Mediante Labview se desarrolló la interfaz para el control remoto del horno desde la PC, la misma que consta de las siguientes pantallas:

#### 3.5.1 PANTALLA FRONTAL

La Figura 3-23 muestra la pantalla frontal de la interfaz que es la de presentación al usuario. Esta pantalla permite ingresar al modo de operación. Una vez que se pulsa la opción INICIO se pasa a la pantalla de modo de operación.



**Figura 3-23:** Pantalla Frontal del programa.

#### 3.5.2 PANTALLA MODO DE OPERACIÓN

En la Figura 3-24 se indica la pantalla de modo de operación para el control de temperatura del horno, esta se compone de botones, luces indicadoras, registros de lectura, de escritura, entre otros dispositivos que permiten el manejo del horno, además permite visualizar el comportamiento del valor de consigna programado de temperatura y la variable de temperatura medida por la termocupla en el



interior del horno en función del tiempo. En la Tabla 3-11 se describen cada componente.

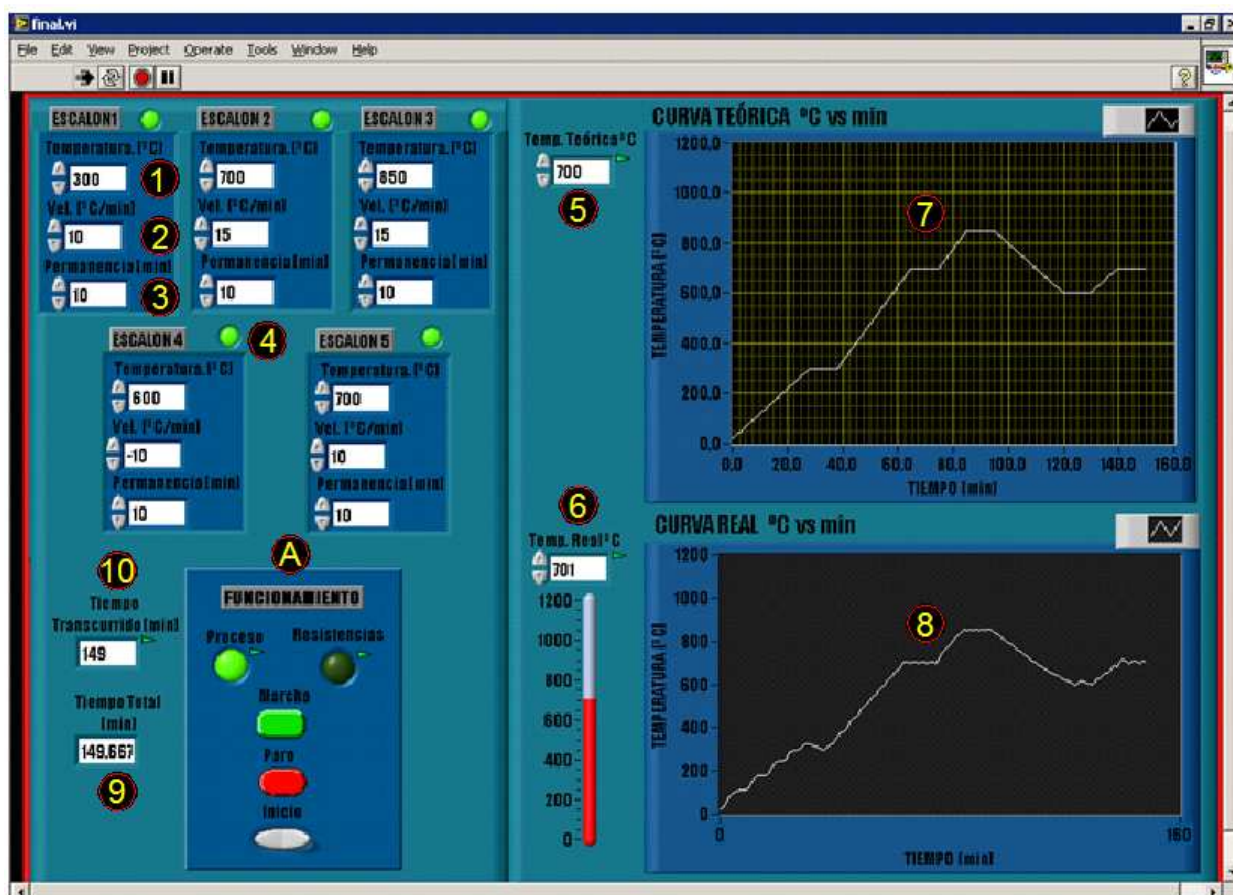
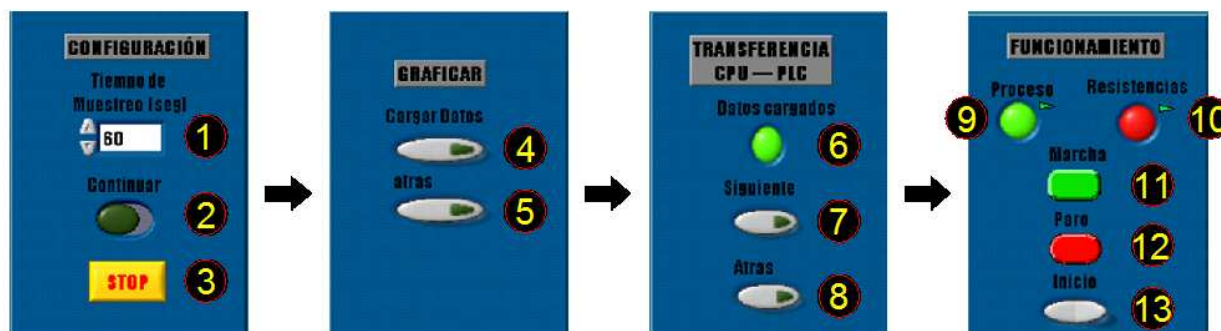


Figura 3-24: Pantalla de proceso para el control del horno.

Tabla 3-11: Componentes para la pantalla de proceso.

NÚMERO/ LETRA	DESCRIPCIÓN
1	Indica el valor de temperatura [°C] a programarse
2	Indica el valor de velocidad de calentamiento o enfriamiento [°C/min] a programarse
3	Indica el valor de tiempo de permanencia [min] a programarse
4	Luz que permite visualizar en que escalón se encuentra el programa.
5	Indica la temperatura teórica o de consigna al instante
6	Indica la temperatura real al interior del horno al instante
7	Indica la curva teórica Temperatura Vs. Tiempo del programa
8	Indica la curva real Temperatura Vs. Tiempo del programa
9	Indica el tiempo total que toma en ejecutarse el programa
10	Indica el tiempo transcurrido mientras se ejecuta el programa
A	Menú que consta de cuatro pasos para la programación

En la Figura 3-25 se observa el menú completo del componente A, los cuatro pasos son: Configuración, Graficar; Transferencia CPU-PLC y Funcionamiento, cada uno de ellos se activan en orden secuencial cuando se cargan datos validos. En la Tabla 3-12 se describen cada elemento de este componente



**Figura 3-25:** Menú de Programación.

**Tabla 3-12:** Elementos del Menú de Programación.

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Indica el Tiempo [seg] en que los datos van a ser tomados
2	Botón que permite ir al paso siguiente GRAFICAR
3	Botón que permite desvincular el PLC del HMI
4	Botón que permite cargar los datos al PLC
5	Botón que permite ir al paso anterior CONFIGURACIÓN
6	Indica que los datos han sido cargados con éxito
7	Botón que permite ir al paso siguiente FUNCIONAMIENTO
8	Botón que permite ir al paso anterior GRAFICAR
9	Indica que el programa se está ejecutando
10	Indica que las resistencias están encendidas
11	Botón que permite correr el proceso de tratamientos térmicos
12	Botón que permite parar el programa
13	Botón que permite ir al paso CONFIGURACIÓN

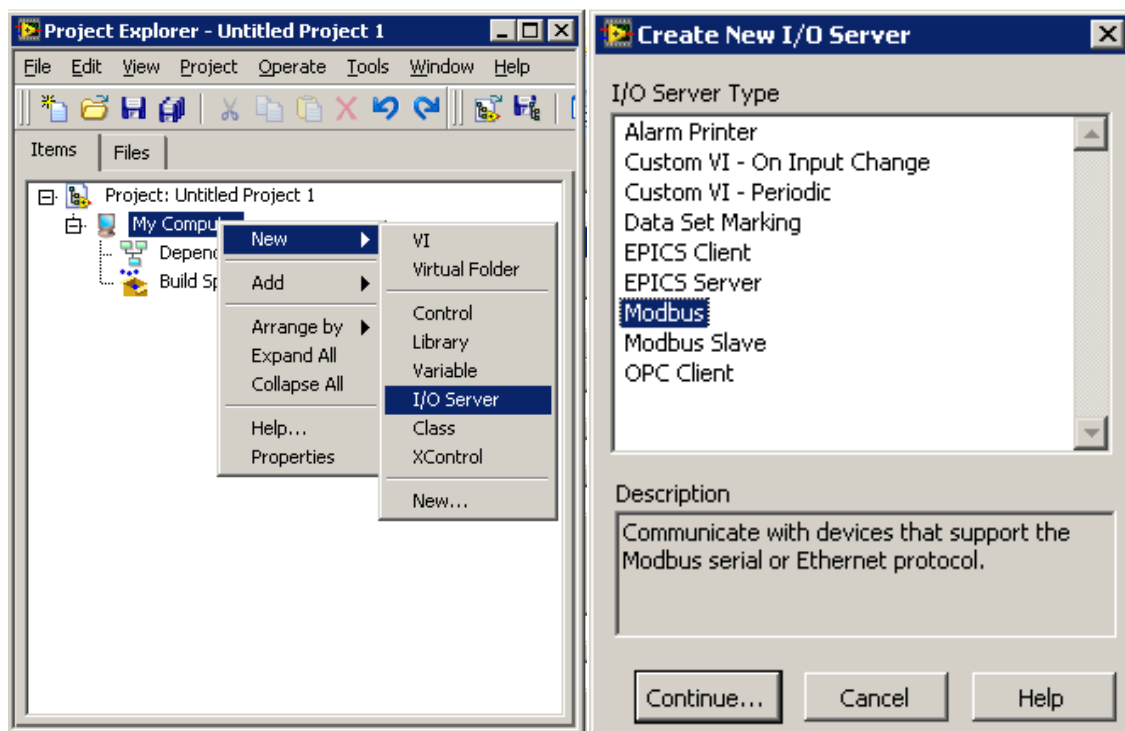
### 3.5.3 DIRECCIONAMIENTO MODBUS

Modbus es un protocolo basado en la arquitectura Maestro/esclavo, es estándar por su simplicidad y disponibilidad abierta.

El protocolo utilizado es Modbus RTU, el cual, es una representación binaria compacta de los datos, cada byte es un mensaje, este contiene dos caracteres hexadecimales de 4 bits, permitiendo un mayor desarrollo de datos. Este envía cuatro campos: Dirección del dispositivo esclavo, Campo de función, Campo de datos y Chequeo de errores.

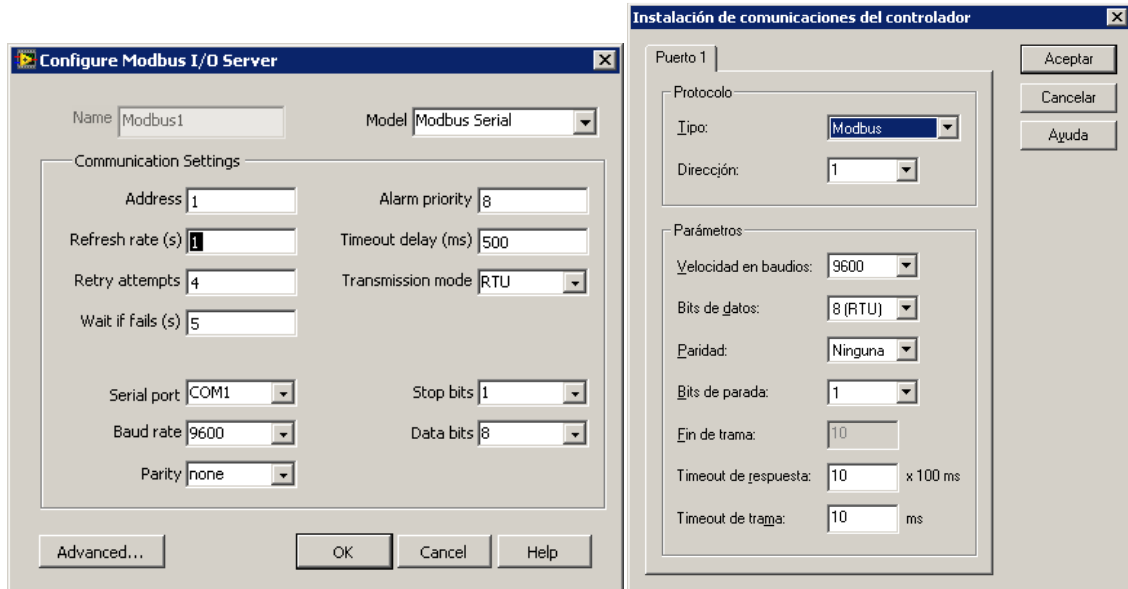
El puerto serial del PLC al PC es RS485 a RS232.

Para configurar el protocolo Modbus en Labview se procede a crear una librería nueva con ayuda del I/O Server, escijiendo el protocolo Modbus como se indica en la Figura 3-26.



**Figura 3-26:** Creando la librería Modbus.

Se procede a escribir los datos pedidos por la ventana desplegada exactamente igual como se programó la configuración del esclavo PLC Twido en el punto 3.1.5.1 de este capítulo (Ver Figura 3-27).

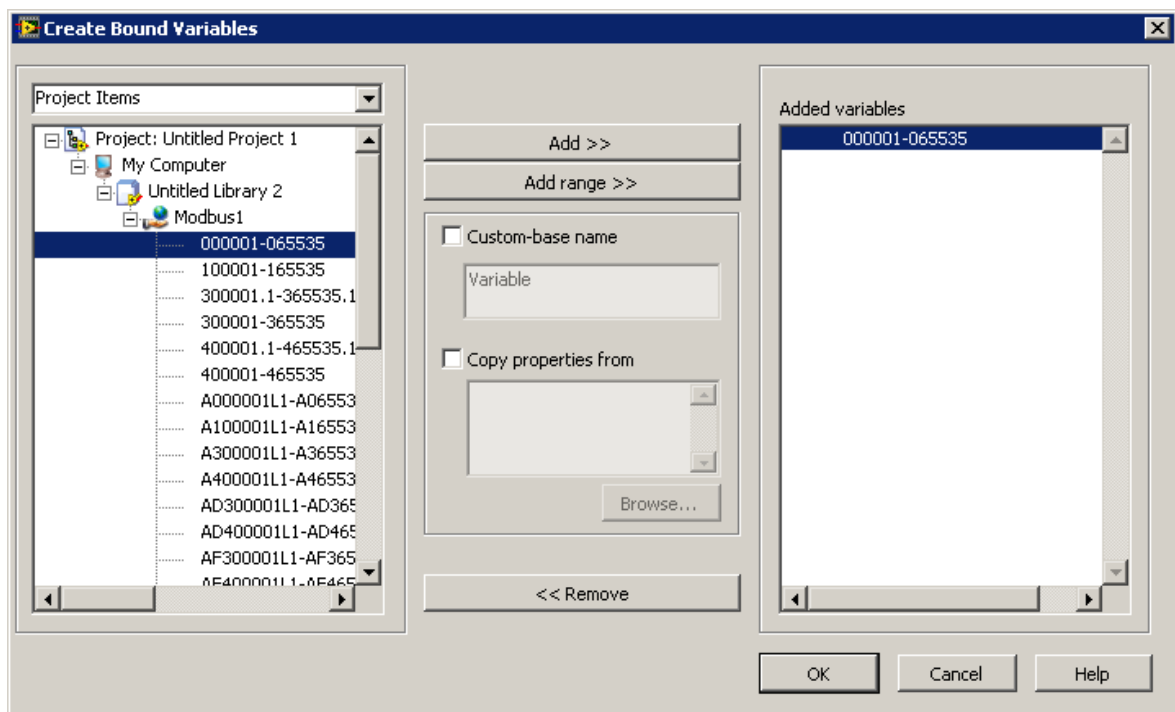


a)

b)

**Figura 3-27:** a) Configuración Modbus Labview. b) Configuración Modbus Twido.

Creada la Librería Modbus en Labview se procede a introducir las variables de Lectura y Escritura analógicas y/o digitales requeridas según la Tabla 3-4 de este capítulo (Ver Figura 3-28).



**Figura 3-28:** Creando variables del protocolo Modbus.

En las Tablas 3-13 y 3-14 se muestran el direccionamiento Modbus de las variables digitales y analógicas creadas para el HMI. El diagrama de bloques del programa en Labview se presenta en el **ANEXO 4**.

**Tabla 3-13:** Direccionamiento Modbus de las variables digitales.

<b>VARIABLE</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DIRECCIÓN</b>
<b>MARCAS DIGITALES DE ESCRITURA Y LECTURA</b>		
%M0	MARCHA	Modbus. 000001
%M1	FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO	Modbus. 000002
%M2	PARO	Modbus. 000003
%M3	OFF RAMPA 1	Modbus. 000004
%M4	OFF PERMANENCIA 1	Modbus. 000005
%M5	OFF RAMPA 2	Modbus. 000006
%M6	OFF PERMANENCIA 2	Modbus. 000007
%M7	OFF RAMPA 3	Modbus. 000008
%M8	OFF PERMANENCIA 3	Modbus. 000009
%M9	OFF RAMPA 4	Modbus. 000010
%M10	OFF PERMANENCIA 4	Modbus. 000011
%M11	OFF RAMPA 5	Modbus. 000012
%M12	OFF PERMANENCIA 5	Modbus. 000013
%M13	RESISTENCIAS	Modbus. 000014
%M16	RESTRICCIÓN 1200°C	Modbus. 000015
%M19	HISTERESIS	Modbus. 000016

**Tabla 3-14:** Direccionamiento Modbus de las variables analógicas.

<b>VARIABLE</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>DIRECCIÓN</b>
<b>MARCAS ANALÓGICAS DE ESCRITURA Y LECTURA</b>		
%MW0	TERMOCUPLA	Modbus. 400001
%MW1	TEMPORIZADOR 0	Modbus. 400002
%MW2	TEMPORIZADOR 1	Modbus. 400003
%MW3	TEMPORIZADOR 2	Modbus. 400004
%MW4	TEMPORIZADOR 3	Modbus. 400005
%MW5	TEMPORIZADOR 4	Modbus. 400006
%MW6	TEMPORIZADOR 5	Modbus. 400007
%MW7	TEMPORIZADOR 6	Modbus. 400008
%MW8	TEMPORIZADOR 7	Modbus. 400009
%MW9	TEMPORIZADOR 8	Modbus. 400010
%MW10	TEMPORIZADOR 9	Modbus. 400011
%MW11	HISTÉRESIS EN BAJA	Modbus. 400012
%MW12	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO *TIEMPO	Modbus. 400013
%MW13	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 1	Modbus. 400014
%MW14	CURVA TOTAL	Modbus. 400015
%MW15	TEMPERATURA INICIAL	Modbus. 400016
%MW16	TEMPERATURA 1	Modbus. 400017
%MW17	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 2	Modbus. 400018
%MW18	TEMPERATURA 2	Modbus. 400019
%MW19	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 3	Modbus. 400020
%MW20	TEMPERATURA 3	Modbus. 400021
%MW21	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 4	Modbus. 400022
%MW22	TEMPERATURA 4	Modbus. 400023
%MW23	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO 5	Modbus. 400024
%MW24	TEMPERATURA DE CORTE	Modbus. 400025
%MW25	ECUACIÓN PUNTO MÁXIMO	Modbus. 400026
%MW26	TEMPERATURA 5	Modbus. 400027
%MW27	HISTÉRESIS EN ALTA	Modbus. 400028
%MW28	TIEMPO TRANSCURRIDO DEL PROCESO	Modbus. 400029

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS.

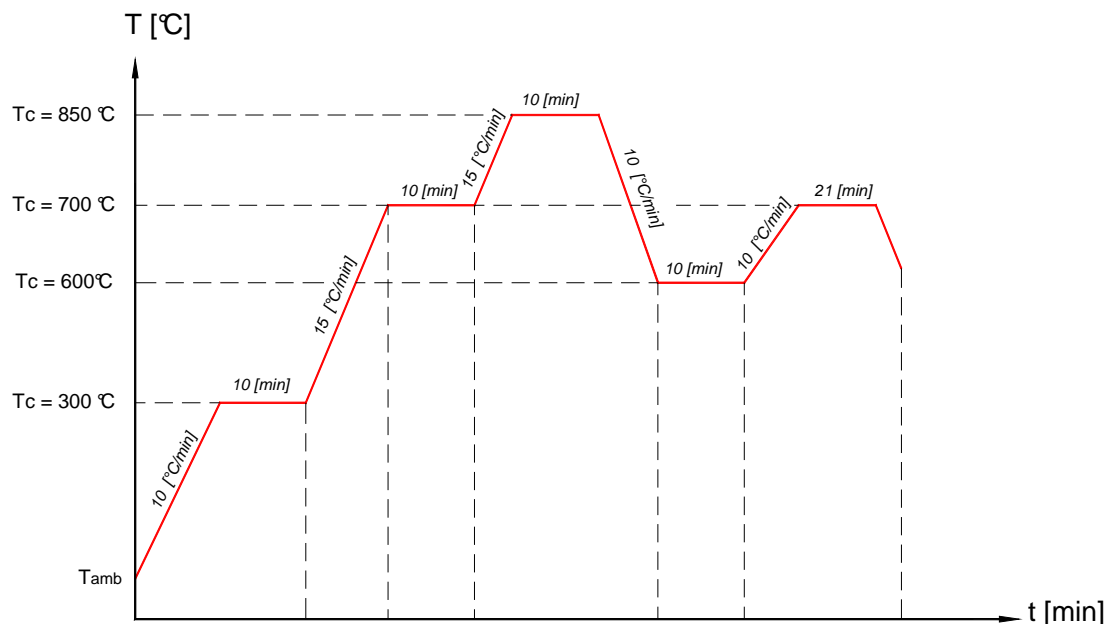
#### 4.1 INTRODUCCIÓN.

Una vez culminada la construcción e instalación del equipo de control del Horno de Tratamientos Térmicos, se ejecutaron pruebas para calibrar el mismo.

En primer lugar se efectuaron pruebas en vacío para verificar la programación y realizar los ajustes necesarios a las cinco rampas diseñadas.

##### 4.1.1 PRUEBAS EN VACÍO PARA CINCO ESCALONES PROGRAMADOS.

Una vez construida la estructura del horno, programado el PLC utilizando el Twido Soft, diseñada la interfaz gráfica HMI mediante LABVIEW y montada la caja de control se efectuaron varias pruebas al sistema de control del horno, en las cuales se programaron cinco escalones utilizando diferentes temperaturas de calentamiento y velocidades de calentamiento, de igual forma se obtuvieron tablas con valores de temperatura para cada minuto. Una de las rampas programadas se muestra en la Figura 4-1.



**Figura 4-1:** Rampa programada para la prueba en vacío

Los valores de temperatura real tomados cada minuto durante esta prueba se muestran en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el la prueba de cinco escalones.

<b>PRUEBA CINCO ESCALONES</b>			
<b>Temperatura Real [°C]</b>	<b>Temperatura Teórica [°C]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>% Error</b>
21	30	1	30.0
28	40	2	30.0
51	50	3	2.0
79	60	4	31.7
96	70	5	37.1
103	80	6	28.8
107	90	7	18.9
110	100	8	10.0
110	110	9	0.0
110	120	10	8.3
123	130	11	5.4
150	140	12	7.1
168	150	13	12.0
176	160	14	10.0
179	170	15	5.3
180	180	16	0.0
179	190	17	5.8
192	200	18	4.0
220	210	19	4.8
237	220	20	7.7
244	230	21	6.1
245	240	22	2.1
244	250	23	2.4
259	260	24	0.4
283	270	25	4.8
293	280	26	4.6
296	290	27	2.1
296	300	28	1.3
309	300	29	3.0
320	300	30	6.7
322	300	31	7.3
321	300	32	7.0
317	300	33	5.7
312	300	34	4.0
308	300	35	2.7
302	300	36	0.7
297	300	37	1.0
305	300	38	1.7

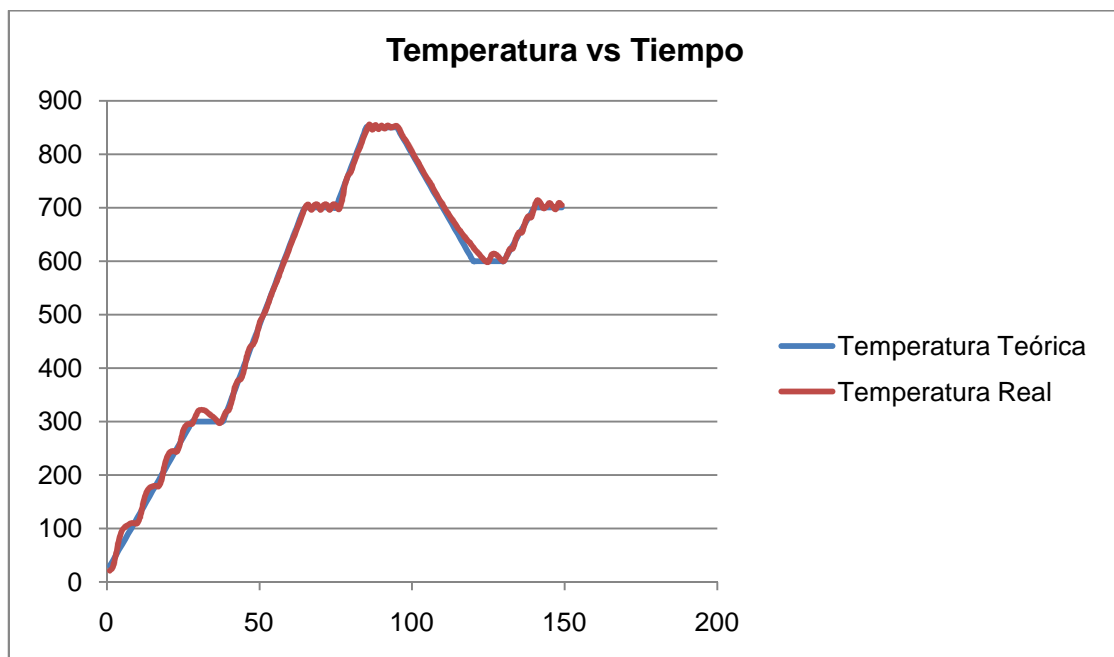


318	315	39	1.0
322	330	40	2.4
340	345	41	1.4
365	360	42	1.4
377	375	43	0.5
380	390	44	2.6
397	405	45	2.0
425	420	46	1.2
440	435	47	1.1
445	450	48	1.1
460	465	49	1.1
484	480	50	0.8
496	495	51	0.2
507	510	52	0.6
523	525	53	0.4
539	540	54	0.2
553	555	55	0.4
567	570	56	0.5
583	585	57	0.3
598	600	58	0.3
612	615	59	0.5
686	690	64	0.6
701	700	65	0.1
706	700	66	0.9
696	700	67	0.6
705	700	68	0.7
706	700	69	0.9
696	700	70	0.6
705	700	71	0.7
706	700	72	0.9
696	700	73	0.6
706	700	74	0.9
705	700	75	0.7
697	715	76	2.5
713	730	77	2.3
743	745	78	0.3
760	760	79	0.0
768	775	80	0.9
785	790	81	0.6
801	805	82	0.5
814	820	83	0.7
830	835	84	0.6
844	850	85	0.7
856	850	86	0.7

846	850	87	0.5
855	850	88	0.6
847	850	89	0.4
854	850	90	0.5
848	850	91	0.2
854	850	92	0.5
850	850	93	0.0
852	850	94	0.2
853	850	95	0.4
845	840	96	0.6
833	830	97	0.4
825	820	98	0.6
815	810	99	0.6
804	800	100	0.5
794	790	101	0.5
785	780	102	0.6
774	770	103	0.5
764	760	104	0.5
754	750	105	0.5
746	740	106	0.8
735	730	107	0.7
725	720	108	0.7
715	710	109	0.7
706	700	110	0.9
696	690	111	0.9
688	680	112	1.2
679	670	113	1.3
671	660	114	1.7
662	650	115	1.8
655	640	116	2.3
647	630	117	2.7
640	620	118	3.2
634	610	119	3.9
626	600	120	4.3
619	600	121	3.2
613	600	122	2.2
606	600	123	1.0
600	600	124	0.0
599	600	125	0.2
612	600	126	2.0
614	600	127	2.3
610	600	128	1.7
604	600	129	0.7
600	600	130	0.0

610	610	131	0.0
623	620	132	0.5
624	630	133	1.0
642	640	134	0.3
654	650	135	0.6
654	660	136	0.9
672	670	137	0.3
684	680	138	0.6
682	690	139	1.2
701	700	140	0.1
714	700	141	2.0
709	700	142	1.3
699	700	143	0.1
703	700	144	0.4
709	700	145	1.3
703	700	146	0.4
697	700	147	0.4
709	700	148	1.3
705	700	149	0.7
<b>%Error Promedio</b>			2.9

La Figura 4-2 muestra las curvas real y teórica obtenidas en esta prueba.



**Figura 4-2:** Temperatura real y teórica vs tiempo para la prueba de cinco escalones.

La Tabla 4-1 y Figura 4-2 muestran que a bajas temperaturas el error obtenido es mayor, sin embargo para valores desde 350 [°C] hacia arriba, estos errores disminuyen considerando además que se estableció un valor de histéresis de  $\pm 3$  [°C]. La velocidad de enfriamiento determinada en el Capítulo 3, es un valor constante establecido mediante pruebas, razón por la cual se justifica una leve desviación a medida que la temperatura del horno disminuye, ya que este valor fue tomado para rangos entre 550 - 1200 [°C] que es donde se requiere este tipo de enfriamientos.

El error promedio obtenido después de realizar los ajustes requeridos al sistema de control es aproximadamente 3%, este es un valor relativamente bajo y aceptable.

Posteriormente se realizaron tratamientos térmicos a probetas de diferentes tipos de aceros y un análisis metalográfico de las mismas para constatar que se hayan obtenido las estructuras cristalinas deseadas. Los metales utilizados fueron:

#### **ACERO AISI 1045.**

Su composición química es: 0.45 %C, 0.25%Si y 0.65%Mn

#### **Tratamiento Térmico.**

En la Tabla 4-2 se muestra las temperaturas de calentamiento para los diferentes tipos de tratamientos térmicos que son posibles de realizarle a este acero y las durezas obtenibles en el temple.

**Tabla 4-2:** Tratamientos Térmicos para el acero AISI 1045<sup>21</sup>.

<b>Forjado:</b>	1100 – 850 [°C]
<b>Recocido:</b> Enfriamiento en el horno	650 – 700 [°C]
<b>Normalizado:</b>	840 - 870 [°C]
<b>Distensionado:</b>	500 [°C]
<b>Temple:</b> Enfriamiento en : agua, aceite (piezas pequeñas)	820 – 850 [°C]
<b>Dureza obtenible:</b>	54 – 56 [HRC]
<b>Nitruración:</b> en baño de sales	580 [°C]

<sup>21</sup> Manual Bohler de aceros especiales

### Empleo.

Se utiliza para la fabricación de partes de maquinaria sometida a esfuerzos normales como: árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas y portamatrices.

### ACERO BOHLER V320 (AISI - 4140).

Es un acero bonificado con aleación cromo-molibdeno de alta resistencia a la tracción y torsión en medianas y pequeñas secciones. La adición de molibdeno previene la fragilidad de revenido en el acero.

Su composición química es: 0.41%C, 0.30%Si, 0.70%Mn, 1.10%Cr y 0.20%Mo

### Tratamiento Térmico.

En la Tabla 4-3 se muestra las temperaturas de calentamiento para los diferentes tipos de tratamientos térmicos que son posibles de realizarle a este acero y las durezas obtenibles en el temple.

**Tabla 4-3:** Tratamientos Térmicos para el acero V320<sup>22</sup>.

<b>Forjado:</b>	1050 – 850 [°C]
<b>Recocido:</b> Enfriamiento en el horno (217 HB máx.)	680 – 720 [°C]
<b>Normalizado:</b>	840 - 880 [°C]
<b>Distensionado:</b>	500 [°C]
<b>Temple:</b> al agua	820 – 850 [°C]
al aceite, baño de sal (180 – 220 °C)	830 – 860 [°C]
<b>Dureza obtenible:</b>	54 – 56 [HRC]
<b>Nitruración:</b> en baño de sales (tenifer)	580 [°C]

### Empleo.

Se utiliza para la fabricación de partes y piezas de automotores, motoreductores, árboles de transmisión, ejes, bielas, pernos grado 6, tuercas, pines, émbolos, ejes de bombas, cañones para armas de cacería.

<sup>22</sup> Manual Bohler de aceros especiales

### ACERO BOHLER K100 (AISI – D3).

Es un acero ledeburítico de alto porcentaje de carbono y cromo, de alta estabilidad dimensional en el tratamiento térmico y gran resistencia al desgaste.

Su composición química es: 2%C, 0.25%Si, 0.35%Mn y 11.5%Cr

#### Tratamiento Térmico.

En la Tabla 4-4 se muestra las temperaturas de calentamiento para los diferentes tipos de tratamientos térmicos que son posibles de realizarle a este acero y las durezas obtenibles en el temple.

**Tabla 4-4:** Tratamientos Térmicos para el acero K100<sup>23</sup>.

<b>Forjado:</b>	1050 – 850 [°C]
<b>Recocido:</b> Enfriamiento lento en el horno	800 – 850 [°C]
<b>Distensionado:</b>	aprox. 650 [°C]
<b>Temple:</b> Enfriamiento en: aceite, baño de sales (220 – 250 °C/500 – 550 °C ) Aire y aire comprimido (espesores menores a 25 mm)	940 – 970 [°C]
<b>Dureza obtenible:</b>	63 – 65 [HRC]

#### Empleo.

En la fabricación de herramientas para trabajo en frío como punzones y matrices para corte de lámina de hasta 4 [mm] de espesor, herramientas para trabajo en madera, rodillos de conformado en frío, herramientas para el prensado de materiales cerámicos y farmacéuticos.

### ACERO BOHLER K110 (AISI – D2).

Es un acero ledeburítico de alta estabilidad dimensional, de alto porcentaje de carbono, particularmente susceptible de ser templado al aire, tiene buena tenacidad.

<sup>23</sup> Manual Bohler de aceros especiales

Su composición química es: 1.55%C, 0.30%Si, 0.30%Mn, 11%Cr, 0.75%Mo y 0.75%V.

### Tratamiento Térmico.

En la Tabla 4-5 se muestra las temperaturas de calentamiento para los diferentes tipos de tratamientos térmicos que son posibles de realizarle a este acero y las durezas obtenibles en el temple.

**Tabla 4-5:** Tratamientos Térmicos para el acero K110<sup>24</sup>.

<b>Forjado:</b>	1050 – 850 [°C]
<b>Recocido:</b> Enfriamiento lento en el horno	800 – 850 [°C]
<b>Distensionado:</b>	650 – 700 [°C]
<b>Temple:</b> Enfriamiento en: aceite, baño de sales (220 – 250 °C/500 – 550 °C ) Aire y aire comprimido (espesores menores a 25 mm)	1020 – 1040 [°C]
<b>Dureza obtenible:</b>	63 – 65 [HRC]
<b>Nitruración:</b> Si se requiere una nitruración en baño de sales (tenifer), se recomienda una temperatura de temple más elevada, seguida por dos procesos de revenido (520 °C y 480 °C), para luego realizar la nitruración.	

### Empleo.

Se utiliza para la fabricación de matrices y punzones para corte de lámina de hasta 5 [mm], herramientas para trabajar en madera, cuchillas para corte de madera, metal, plástico, papel y cartón. Rodillos para conformado en frío, herramientas para prensado de cerámicos y farmacéuticos, instrumentos de medición, pequeños moldes plásticos donde alta resistencia al desgaste es requerida.

En el **Anexo 5** se muestra el catálogo BOHLER para los aceros utilizados en estas pruebas.

<sup>24</sup> Manual Bohler de aceros especiales.

#### 4.1.2 REALIZACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

Basados en las descripciones anteriores de cada acero y recomendaciones de los fabricantes se procedió a establecer los regímenes de tratamiento térmico para cada una de las probetas construidas y a programar estos datos en la interfaz gráfica.

Se estableció además un código para cada probeta de acuerdo a su material y al tratamiento térmico que se le realizó. Las probetas elaboradas se muestran en la Figura 4-3 y los códigos asignados a estas se enlistan en la Tabla 4-6.



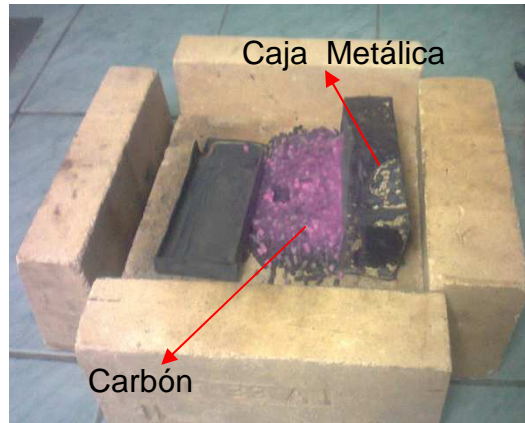
**Figura 4-3:** Probetas testigo y probeta elaboradas para someterlas a diversos tratamientos térmicos.

**Tabla 4-6:** Códigos de las probetas testigo y tratadas térmicamente de los aceros AISI 1045, V320, K100 y K110.

<b>Probetas de Acero AISI 1045</b>	<b>Código</b>
Testigo	4
Recocida	4R
Normalizada	4N
Templada	4T
<b>Probetas de Acero V320</b>	<b>Código</b>
Testigo	3
Templada	3T
<b>Probetas de Acero K100</b>	<b>Código</b>
Testigo	10
Templada	10T
<b>Probetas de Acero K110</b>	<b>Código</b>
Testigo	11
Templada	11T



Para evitar la oxidación del acero, debido a que el horno tiene una atmosfera oxidante se utilizó una caja metálica y carbón en este se introdujo la probeta para tratarla térmicamente como se muestra en la Figura 4-4.



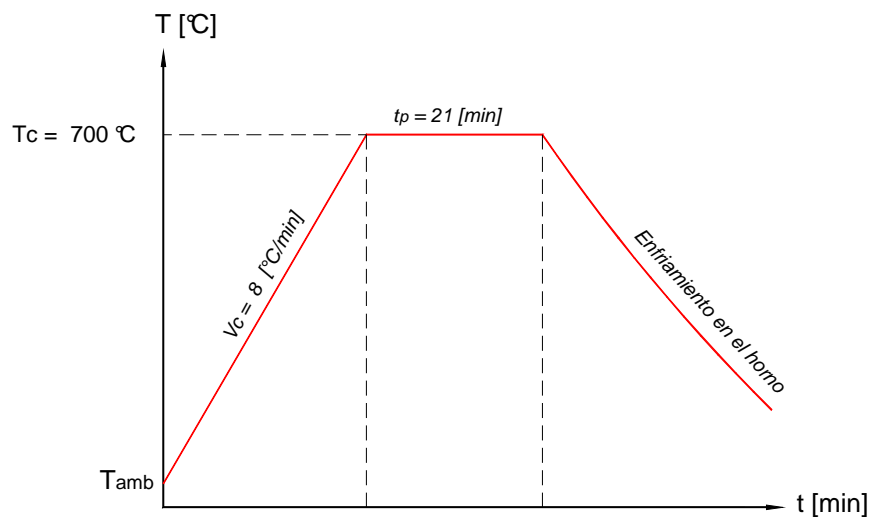
**Figura 4-4:** Caja metálica y carbón utilizados en la protección de las probetas.

Los resultados obtenidos en todos los tratamientos térmicos fueron los siguientes:  
**ACERO AISI 1045.**

Se construyeron cuatro probetas, una testigo y otras para recocido, normalizado y temple.

#### **Recocido.**

A la probeta 4R, se le realizó un recocido siguiendo un régimen de tratamiento térmico como se muestra en la Figura 4-5.



**Figura 4-5:** Régimen de tratamiento térmico de recocido del acero 1045<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> Catálogo de Bohler de aceros especiales.

Para producir el enfriamiento lento necesario se programó el enfriamiento con el horno apagado.

El software almacena en una hoja de Excel los valores de temperatura y tiempo de acuerdo a un tiempo establecido (1 min en este caso), no existe por lo tanto la necesidad de realizar esta tarea de forma manual.

Los valores tomados cada minuto durante este proceso se muestran en la Tabla 4-7.

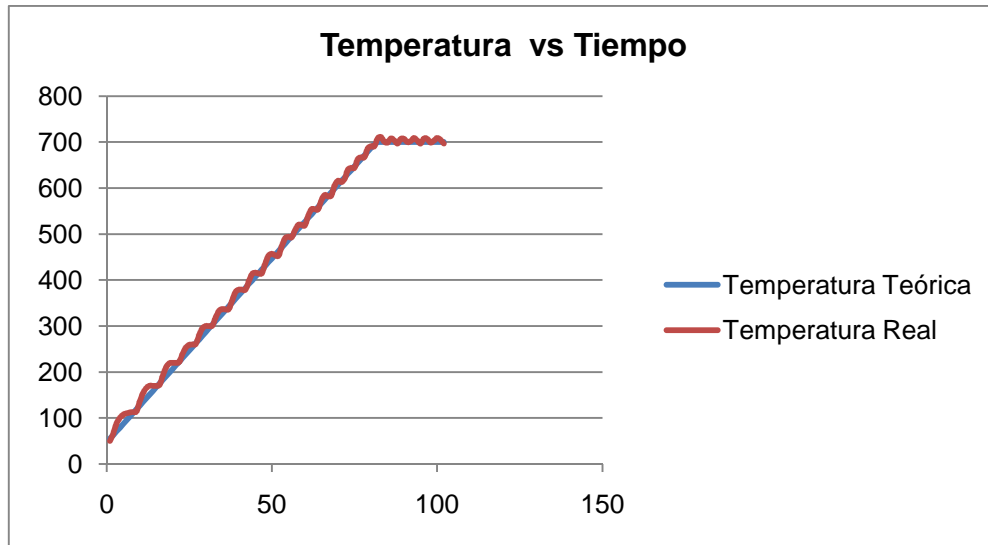
**Tabla 4-7:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el recocido del acero 1045.

<b>ACERO 1045</b>			
<b>Recocido</b>			
<b>Temperatura Real [°C]</b>	<b>Temperatura Teórica [°C]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>% Error</b>
50	55	1	9.1
66	63	2	4.8
88	71	3	23.9
100	79	4	26.6
107	87	5	23.0
110	95	6	15.8
112	103	7	8.7
113	111	8	1.8
114	119	9	4.2
135	127	10	6.3
154	135	11	14.1
165	143	12	15.4
170	151	13	12.6
170	159	14	6.9
170	167	15	1.8
172	175	16	1.7
192	183	17	4.9
210	191	18	9.9
219	199	19	10.1
220	207	20	6.3
220	215	21	2.3
222	223	22	0.4
240	231	23	3.9
253	239	24	5.9
259	247	25	4.9
260	255	26	2.0
261	263	27	0.8

280	271	28	3.3
295	279	29	5.7
300	287	30	4.5
300	295	31	1.7
301	303	32	0.7
319	311	33	2.6
333	319	34	4.4
337	327	35	3.1
336	335	36	0.3
337	343	37	1.7
356	351	38	1.4
374	359	39	4.2
379	367	40	3.3
379	375	41	1.1
379	383	42	1.0
397	391	43	1.5
413	399	44	3.5
416	407	45	2.2
414	415	46	0.2
415	423	47	1.9
436	431	48	1.2
453	439	49	3.2
457	447	50	2.2
454	455	51	0.2
453	463	52	2.2
473	471	53	0.4
491	479	54	2.5
494	487	55	1.4
493	495	56	0.4
508	503	57	1.0
520	511	58	1.8
520	519	59	0.2
519	527	60	1.5
540	535	61	0.9
554	543	62	2.0
554	551	63	0.5
554	559	64	0.9
574	567	65	1.2
585	575	66	1.7
582	583	67	0.2
584	591	68	1.2
606	599	69	1.2
616	607	70	1.5
613	615	71	0.3

620	623	72	0.5
640	631	73	1.4
644	639	74	0.8
644	647	75	0.5
663	655	76	1.2
667	663	77	0.6
667	671	78	0.6
686	679	79	1.0
691	687	80	0.6
691	695	81	0.6
708	700	82	1.1
711	700	83	1.6
701	700	84	0.1
699	700	85	0.1
708	700	86	1.1
704	700	87	0.6
697	700	88	0.4
707	700	89	1.0
707	700	90	1.0
700	700	91	0.0
702	700	92	0.3
709	700	93	1.3
703	700	94	0.4
697	700	95	0.4
708	700	96	1.1
707	700	97	1.0
699	700	98	0.1
703	700	99	0.4
709	700	100	1.3
705	700	101	0.7
697	700	102	0.4
<b>%Error Promedio</b>			3.2

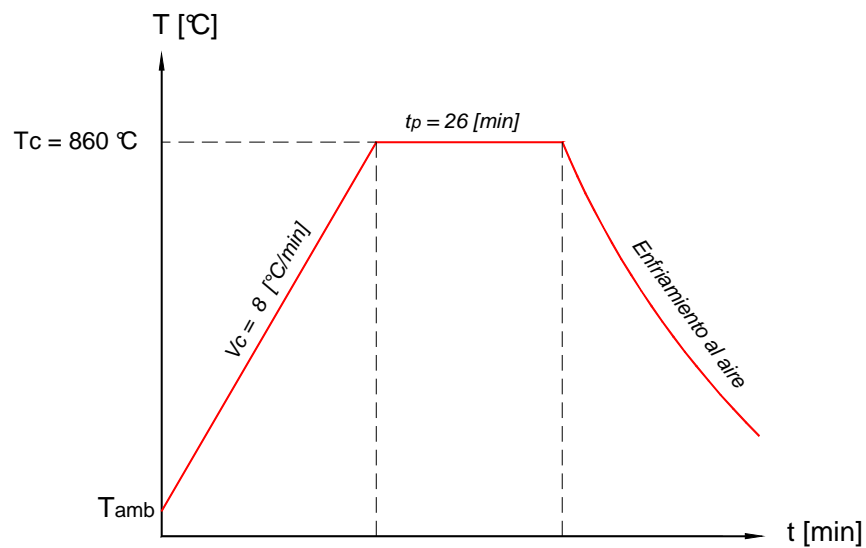
La Figura 4-6 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



**Figura 4-6:** Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el recocido del acero 1045.

### Normalizado.

A la probeta 4N se le realizó un normalizado siguiendo un régimen de tratamiento térmico como se muestra en la Figura 4-7.



**Figura 4-7:** Régimen de tratamiento térmico de normalizado del acero 1045<sup>26</sup>.

Los valores tomados cada minuto durante el normalizado del acero 1045 se muestran en la Tabla 4-8.

<sup>26</sup> Manual Bohler para aceros especiales

**Tabla 4-8:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el normalizado del acero 1045.

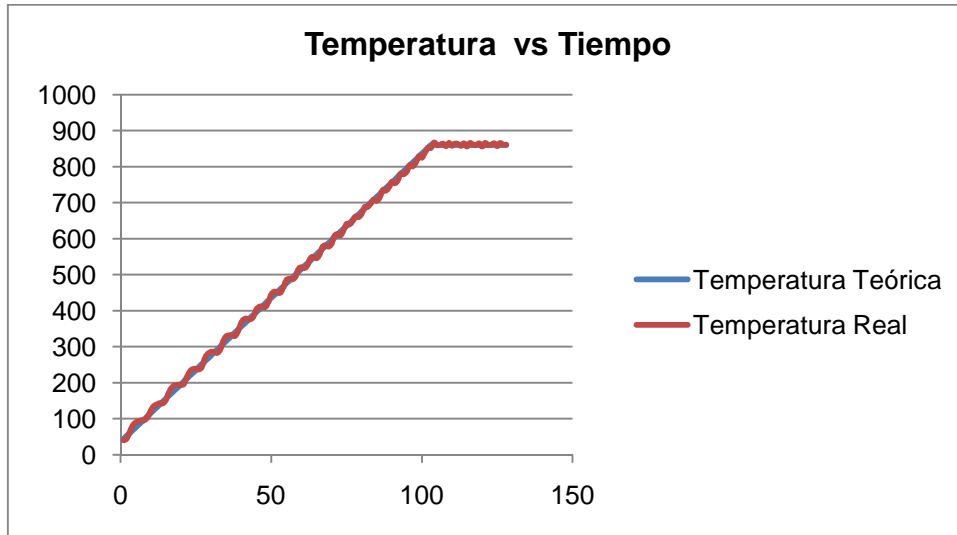
<b>Acero 1045</b>			
<b>Normalizado</b>			
<b>Temperatura Real [°C]</b>	<b>Temperatura Teórica [°C]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>%Error</b>
40	44	1	9.1
45	52	2	13.5
64	60	3	6.7
81	68	4	19.1
90	76	5	18.4
94	84	6	11.9
96	92	7	4.3
97	100	8	3.0
105	108	9	2.8
123	116	10	6.0
135	124	11	8.9
140	132	12	6.1
143	140	13	2.1
143	148	14	3.4
152	156	15	2.6
174	164	16	6.1
187	172	17	8.7
193	180	18	7.2
195	188	19	3.7
194	196	20	1.0
197	204	21	3.4
216	212	22	1.9
232	220	23	5.5
238	228	24	4.4
239	236	25	1.3
237	244	26	2.9
245	252	27	2.8
269	260	28	3.5
281	268	29	4.9
286	276	30	3.6
286	284	31	0.7
283	292	32	3.1
291	300	33	3.0
315	308	34	2.3
329	316	35	4.1
332	324	36	2.5

332	332	37	0.0
330	340	38	2.9
344	348	39	1.1
366	356	40	2.8
377	364	41	3.6
378	372	42	1.6
403	396	45	1.8
411	404	46	1.7
412	412	47	0.0
410	420	48	2.4
424	428	49	0.9
445	436	50	2.1
453	444	51	2.0
451	452	52	0.2
450	460	53	2.2
465	468	54	0.6
487	492	57	1.0
494	500	58	1.2
515	508	59	1.4
521	516	60	1.0
518	524	61	1.1
526	532	62	1.1
546	540	63	1.1
550	548	64	0.4
546	556	65	1.8
555	564	66	1.6
577	572	67	0.9
582	580	68	0.3
578	588	69	1.7
586	596	70	1.7
608	604	71	0.7
613	612	72	0.2
609	620	73	1.8
624	628	74	0.6
641	636	75	0.8
640	644	76	0.6
649	652	77	0.5
662	660	78	0.3
660	668	79	1.2
669	676	80	1.0
688	684	81	0.6
688	692	82	0.6
697	700	83	0.4
709	708	84	0.1

705	716	85	1.5
715	724	86	1.2
735	732	87	0.4
733	740	88	0.9
742	748	89	0.8
758	756	90	0.3
754	764	91	1.3
762	772	92	1.3
781	780	93	0.1
779	788	94	1.1
787	796	95	1.1
805	804	96	0.1
801	812	97	1.4
811	820	98	1.1
829	828	99	0.1
825	836	100	1.3
839	844	101	0.6
852	852	102	0.0
852	860	103	0.9
867	860	104	0.8
860	860	105	0.0
860	860	106	0.0
864	860	107	0.5
857	860	108	0.3
866	860	109	0.7
858	860	110	0.2
864	860	111	0.5
863	860	112	0.3
856	860	115	0.5
866	860	116	0.7
861	860	117	0.1
860	860	118	0.0
865	860	119	0.6
856	860	120	0.5
866	860	121	0.7
860	860	122	0.0
861	860	123	0.1
865	860	124	0.6
857	860	125	0.3
866	860	126	0.7
861	860	127	0.1
861	860	128	0.1
<b>%Error Promedio</b>			2.2



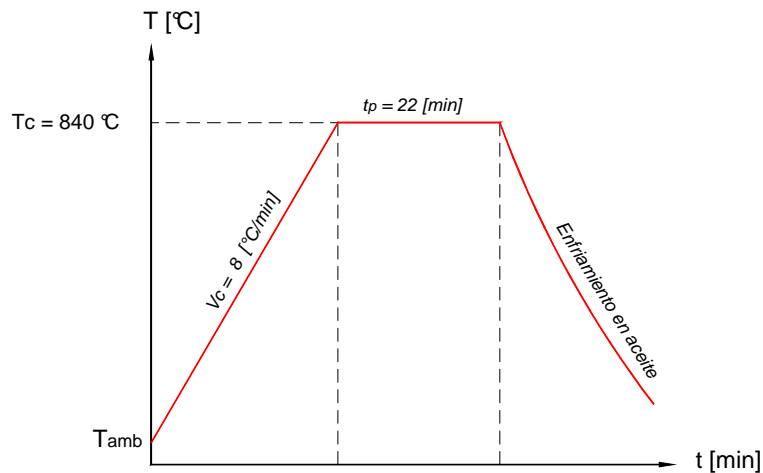
La Figura 4-8 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



**Figura 4-8:** Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el normalizado del acero 1045.

### Temple.

A la probeta 4T se le realizó un temple siguiendo un régimen de tratamiento térmico como se muestra en la Figura 4-9.



**Figura 4-9:** Régimen de tratamiento térmico de temple del acero 1045<sup>27</sup>.

Para producir un enfriamiento rápido y alcanzar estructuras de altas dureza inmediatamente después de sacar la probeta calentada se la sumerge en el medio de temple (agua o aceite), tal como se muestra en la Figura 4-10. Este proceso se sigue de manera similar para las otras probetas a templar.

<sup>27</sup> Manual Bohler de aceros especiales



**Figura 4-10:** Proceso de templado de las probetas en diferentes medios.

El medio de temple para la probeta 4T fue aceite. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4-9.

**Tabla 4-9:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero 1045.

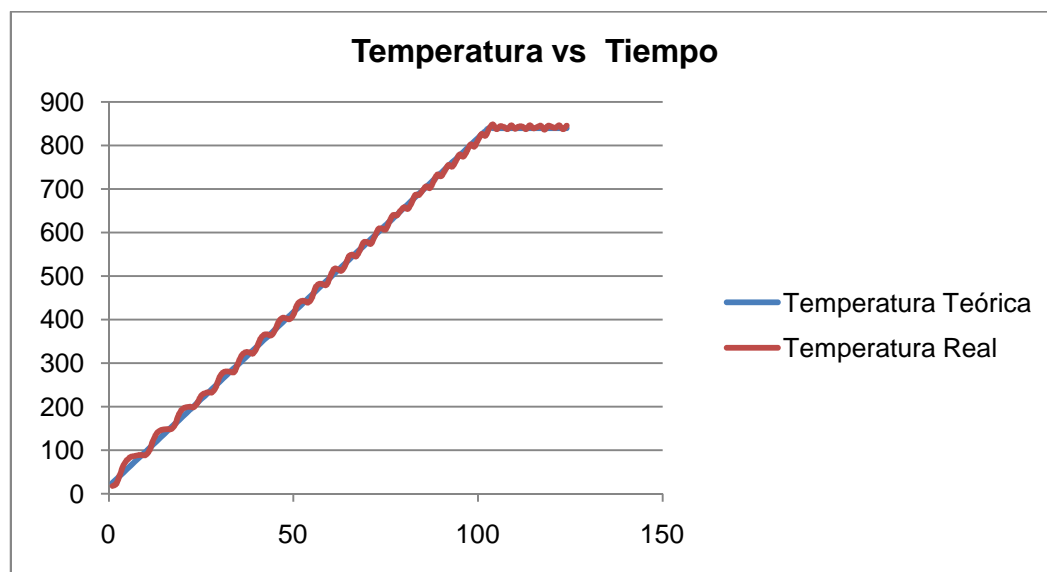
<b>ACERO 1045</b>			
<b>Temple</b>			
<b>Temperatura Real [°C]</b>	<b>Temperatura Teórica [°C]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>%Error</b>
18	25	1	28.0
23	33	2	30.3
44	41	3	7.3
66	49	4	34.7
78	57	5	36.8
85	65	6	30.8
87	73	7	19.2
89	81	8	9.9
89	89	9	0.0
89	97	10	8.2
100	105	11	4.8
123	113	12	8.8
139	121	13	14.9
146	129	14	13.2
148	137	15	8.0
149	145	16	2.8
149	153	17	2.6
160	161	18	0.6
183	169	19	8.3
195	177	20	10.2

199	185	21	7.6
200	193	22	3.6
199	201	23	1.0
209	209	24	0.0
225	217	25	3.7
231	225	26	2.7
233	233	27	0.0
233	241	28	3.3
245	249	29	1.6
268	257	30	4.3
279	265	31	5.3
281	273	32	2.9
280	281	33	0.4
280	289	34	3.1
300	297	35	1.0
318	305	36	4.3
325	313	37	3.8
325	321	38	1.2
322	329	39	2.1
334	337	40	0.9
355	345	41	2.9
365	353	42	3.4
366	361	43	1.4
364	369	44	1.4
375	377	45	0.5
395	385	46	2.6
404	393	47	2.8
403	401	48	0.5
401	409	49	2.0
411	417	50	1.4
434	425	51	2.1
442	433	52	2.1
443	441	53	0.5
439	449	54	2.2
450	457	55	1.5
474	465	56	1.9
482	473	57	1.9
481	481	58	0.0
480	489	59	1.8
499	497	60	0.4
516	505	61	2.2
516	513	62	0.6
512	521	63	1.7
524	529	64	0.9

545	537	65	1.5
549	545	66	0.7
545	553	67	1.4
559	561	68	0.4
577	569	69	1.4
578	577	70	0.2
574	585	71	1.9
590	593	72	0.5
608	601	73	1.2
609	609	74	0.0
607	617	75	1.6
625	625	76	0.0
640	633	77	1.1
639	641	78	0.3
650	649	79	0.2
658	657	80	0.2
654	665	81	1.7
668	673	82	0.7
686	681	83	0.7
686	689	84	0.4
697	697	85	0.0
706	705	86	0.1
702	713	87	1.5
729	737	90	1.1
742	745	91	0.4
755	753	92	0.3
751	761	93	1.3
764	769	94	0.7
779	777	95	0.3
774	785	96	1.4
787	793	97	0.8
802	801	98	0.1
797	809	99	1.5
812	817	100	0.6
826	825	101	0.1
822	833	102	1.3
838	840	103	0.2
848	840	104	1.0
837	840	105	0.4
844	840	106	0.5
842	840	107	0.2
837	840	108	0.4
846	840	109	0.7
838	840	110	0.2

843	840	111	0.4
843	840	112	0.4
837	840	113	0.4
846	840	114	0.7
839	840	115	0.1
842	840	116	0.2
845	840	117	0.6
836	840	118	0.5
845	840	119	0.6
842	840	120	0.2
840	840	121	0.0
846	840	122	0.7
837	840	123	0.4
845	840	124	0.6
<b>% Error Promedio</b>			<b>3.3</b>

La Figura 4-11 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



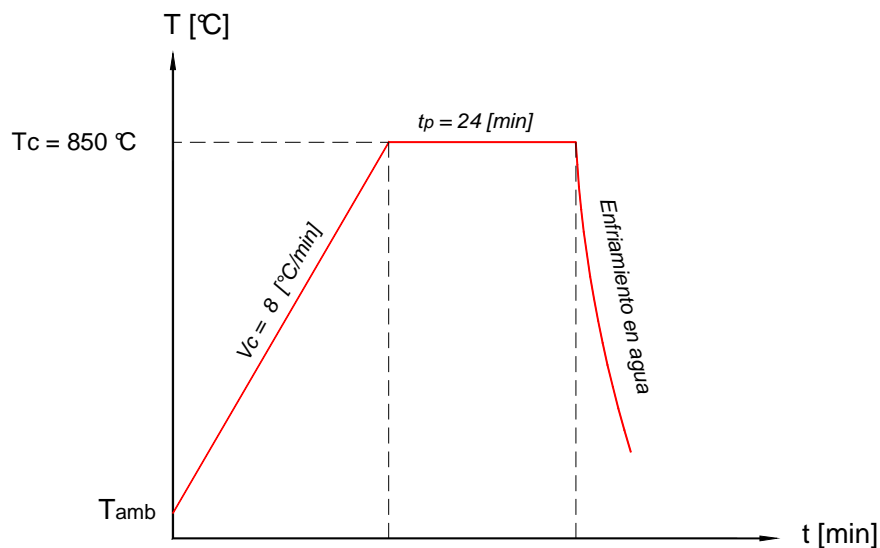
**Figura 4-11:** Gráfica de Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero 1045.

### ACERO V320

Se construyeron dos probetas una testigo y otra para temple

### Temple.

A la probeta 3T se le realizó un temple siguiendo un régimen como se muestra en la Figura 4-12.



**Figura 4-12:** Régimen de tratamiento térmico de temple del acero V320<sup>28</sup>.

El medio de temple para la probeta 3T fue agua. Los valores tomados cada minuto se muestran en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero V320.

ACERO V320			
Temple			
Temperatura Real [°C]	Temperatura Teórica [°C]	Tiempo [min]	%Error
35	43	1	18.6
44	51	2	13.7
66	59	3	11.9
83	67	4	23.9
91	75	5	21.3
96	83	6	15.7
99	91	7	8.8
99	99	8	0.0
99	107	9	7.5
112	115	10	2.6
135	123	11	9.8
149	131	12	13.7
155	139	13	11.5
159	147	14	8.2
159	155	15	2.6
158	163	16	3.1

<sup>28</sup> Manual Bohler de aceros especiales

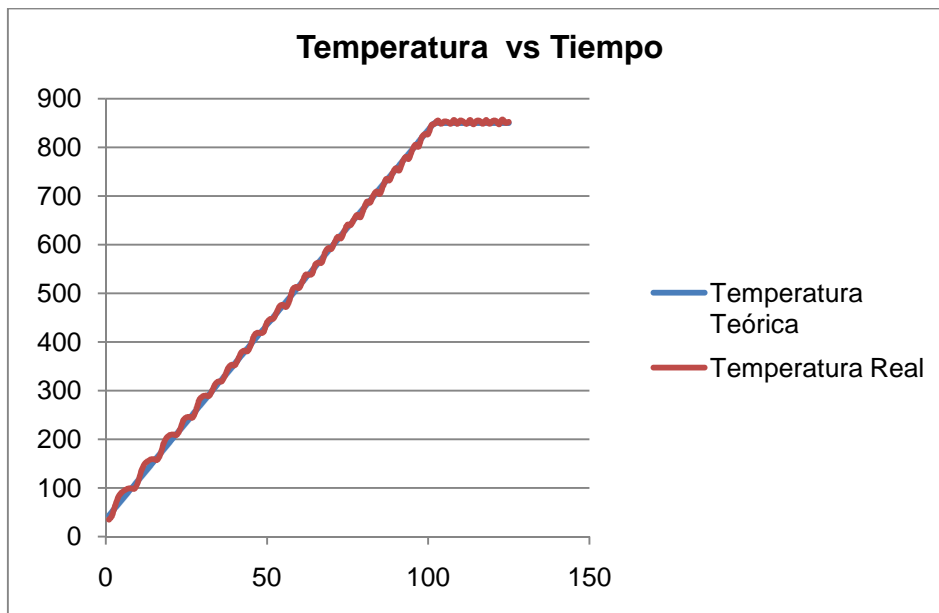
171	171	17	0.0
193	179	18	7.8
204	187	19	9.1
209	195	20	7.2
210	203	21	3.4
209	211	22	0.9
220	219	23	0.5
238	227	24	4.8
245	235	25	4.3
246	243	26	1.2
245	251	27	2.4
260	259	28	0.4
281	267	29	5.2
288	275	30	4.7
290	283	31	2.5
289	291	32	0.7
300	299	33	0.3
314	307	34	2.3
319	315	35	1.3
319	323	36	1.2
331	331	37	0.0
347	339	38	2.4
353	347	39	1.7
352	355	40	0.8
364	363	41	0.3
378	371	42	1.9
382	379	43	0.8
381	387	44	1.6
394	395	45	0.3
413	403	46	2.5
419	411	47	1.9
418	419	48	0.2
421	427	49	1.4
440	435	50	1.1
447	443	51	0.9
448	451	52	0.7
461	459	53	0.4
474	467	54	1.5
476	475	55	0.2
472	483	56	2.3
486	491	57	1.0
508	499	58	1.8
513	507	59	1.2
511	515	60	0.8

524	523	61	0.2
538	531	62	1.3
538	539	63	0.2
540	547	64	1.3
559	555	65	0.7
563	563	66	0.0
563	571	67	1.4
583	579	68	0.7
593	587	69	1.0
591	595	70	0.7
605	603	71	0.3
616	611	72	0.8
613	619	73	1.0
628	627	74	0.2
641	635	75	0.9
640	643	76	0.5
652	651	77	0.2
661	659	78	0.3
656	667	79	1.6
673	675	80	0.3
688	683	81	0.7
686	691	82	0.7
701	699	83	0.3
709	707	84	0.3
704	715	85	1.5
720	723	86	0.4
732	739	88	0.9
747	747	89	0.0
757	755	90	0.3
752	763	91	1.4
769	771	92	0.3
776	787	94	1.4
793	795	95	0.3
805	803	96	0.2
801	811	97	1.2
820	819	98	0.1
827	827	99	0.0
827	835	100	1.0
845	843	101	0.2
848	850	102	0.2
855	850	103	0.6
848	850	104	0.2
853	850	105	0.4
852	850	106	0.2



848	850	107	0.2
856	850	108	0.7
848	850	109	0.2
855	850	110	0.6
852	850	111	0.2
848	850	112	0.2
856	850	113	0.7
847	850	114	0.4
854	850	115	0.5
854	850	116	0.5
848	850	117	0.2
856	850	118	0.7
848	850	119	0.2
854	850	120	0.5
854	850	121	0.5
847	850	122	0.4
857	850	123	0.8
850	850	124	0.0
852	850	125	0.2
<b>%Error Promedio</b>			2.4

La Figura 4-13 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



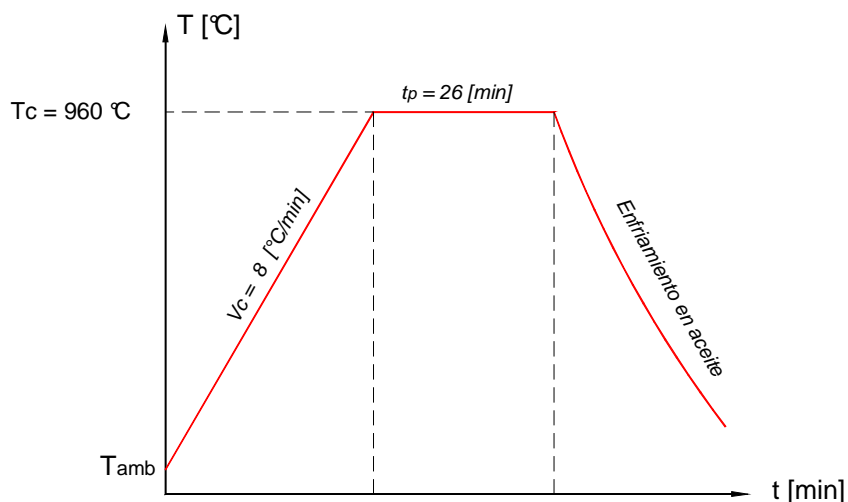
**Figura 4-13:** Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero V320.

## ACERO K100

Se construyeron dos probetas una testigo y otra para temple.

### Temple.

A la probeta 10T se le realizó un temple siguiendo un régimen de tratamiento térmico como se muestra en la Figura 4-14.



**Figura 4-14:** Régimen de tratamiento térmico de temple del acero V320<sup>29</sup>.

El medio de temple para la probeta 10T fue aceite. Los valores tomados cada minuto se muestran en la Tabla 4-11.

**Tabla 4-11:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero V320.

ACERO K100			
Temple			
Temperatura Real [°C]	Temperatura Teórica [°C]	Tiempo [min]	%Error
25	32	1	21.9
48	40	2	20.0
64	48	3	33.3
72	56	4	28.6
76	64	5	18.8
78	72	6	8.3
79	80	7	1.3
79	88	8	10.2
93	96	9	3.1
117	104	10	12.5
132	112	11	17.9

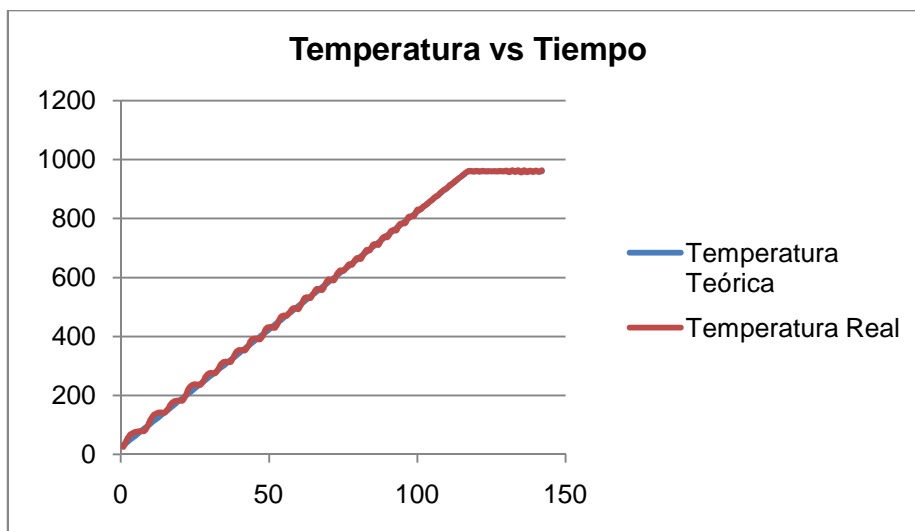
<sup>29</sup> Manual Bohler para aceros especiales

139	120	12	15.8
142	128	13	10.9
142	136	14	4.4
142	144	15	1.4
155	152	16	2.0
171	160	17	6.9
180	168	18	7.1
182	176	19	3.4
183	184	20	0.5
183	192	21	4.7
202	200	22	1.0
224	208	23	7.7
234	216	24	8.3
238	224	25	6.3
237	232	26	2.2
236	240	27	1.7
251	248	28	1.2
268	256	29	4.7
276	264	30	4.5
276	272	31	1.5
276	280	32	1.4
291	288	33	1.0
308	296	34	4.1
314	304	35	3.3
314	312	36	0.6
313	320	37	2.2
328	328	38	0.0
348	336	39	3.6
354	344	40	2.9
354	352	41	0.6
353	360	42	1.9
368	368	43	0.0
387	376	44	2.9
393	384	45	2.3
393	392	46	0.3
390	400	47	2.5
404	408	48	1.0
426	416	49	2.4
432	424	50	1.9
432	432	51	0.0
429	440	52	2.5
445	448	53	0.7
466	456	54	2.2
471	464	55	1.5

470	472	56	0.4
482	480	57	0.4
495	488	58	1.4
496	496	59	0.0
493	504	60	2.2
511	512	61	0.2
530	520	62	1.9
533	528	63	0.9
530	536	64	1.1
546	544	65	0.4
561	552	66	1.6
560	560	67	0.0
558	568	68	1.8
578	576	69	0.3
593	584	70	1.5
592	592	71	0.0
591	600	72	1.5
612	608	73	0.7
624	616	74	1.3
622	624	75	0.3
632	632	76	0.0
645	640	77	0.8
643	648	78	0.8
660	656	79	0.6
667	664	80	0.5
663	672	81	1.3
681	680	82	0.1
694	688	83	0.9
692	696	84	0.6
710	704	85	0.9
714	712	86	0.3
711	720	87	1.3
731	728	88	0.4
739	736	89	0.4
737	744	90	0.9
756	752	91	0.5
761	760	92	0.1
760	768	93	1.0
780	776	94	0.5
784	784	95	0.0
785	792	96	0.9
805	800	97	0.6
807	808	98	0.1
810	816	99	0.7

830	824	100	0.7
830	832	101	0.2
840	840	102	0.0
846	848	103	0.2
855	856	104	0.1
863	864	105	0.1
873	872	106	0.1
878	880	107	0.2
898	896	109	0.2
903	904	110	0.1
914	912	111	0.2
920	920	112	0.0
929	928	113	0.1
937	936	114	0.1
944	944	115	0.0
953	952	116	0.1
962	960	118	0.2
959	960	119	0.1
962	960	120	0.2
959	960	121	0.1
962	960	122	0.2
960	960	123	0.0
961	960	124	0.1
960	960	125	0.0
961	960	126	0.1
960	960	127	0.0
962	960	128	0.2
960	960	129	0.0
963	960	130	0.3
957	960	131	0.3
964	960	132	0.4
958	960	133	0.2
964	960	134	0.4
964	960	136	0.4
957	960	137	0.3
963	960	138	0.3
958	960	139	0.2
963	960	140	0.3
958	960	141	0.2
964	960	142	0.4
<b>% Error promedio</b>			2.5

La Figura 4-15 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



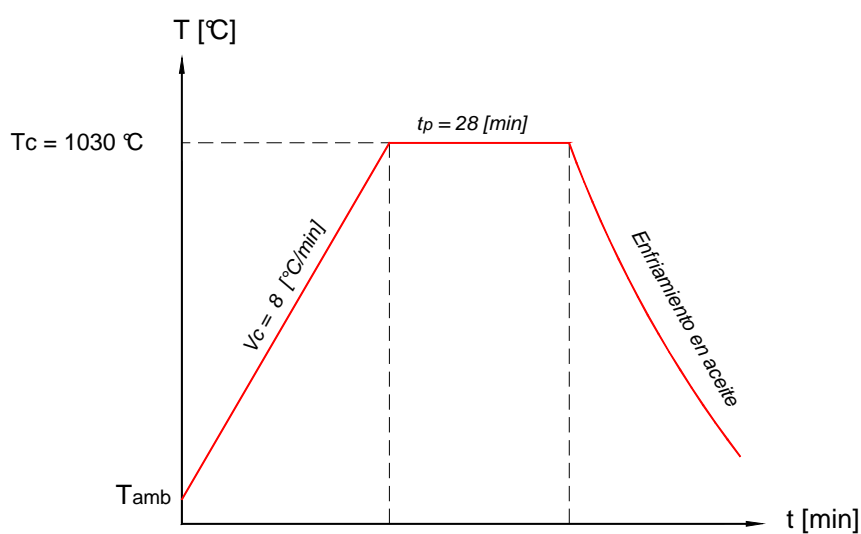
**Figura 4-15:** Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero K100.

### ACERO K110

Se construyeron dos probetas una testigo y otra para temple.

### Temple.

A la probeta 11T se le realizó un temple siguiendo un régimen de tratamiento térmico como se muestra en la Figura 4-16.



**Figura 4-16:** Régimen de tratamiento térmico de temple del acero K110<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> Manual Bohler de aceros especiales

El medio de temple para la probeta 11T fue aceite. Los valores tomados cada minuto se muestran en la Tabla 4-12.

**Tabla 4-12:** Valores de temperatura y tiempo obtenidos durante el temple del acero K110.

<b>ACERO K110</b>			
<b>Temple</b>			
<b>Temperatura Real [C°]</b>	<b>Temperatura Teórica [°C]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>%Error</b>
32	39	1	17.9
43	47	2	8.5
64	55	3	16.4
79	63	4	25.4
88	71	5	23.9
91	79	6	15.2
93	87	7	6.9
94	95	8	1.1
95	103	9	7.8
110	111	10	0.9
135	119	11	13.4
148	127	12	16.5
154	135	13	14.1
156	143	14	9.1
157	151	15	4.0
157	159	16	1.3
172	167	17	3.0
189	175	18	8.0
197	183	19	7.7
200	191	20	4.7
201	199	21	1.0
200	207	22	3.4
218	215	23	1.4
239	223	24	7.2
248	231	25	7.4
250	239	26	4.6
249	247	27	0.8
248	255	28	2.7
266	263	29	1.1
286	271	30	5.5
293	279	31	5.0
294	287	32	2.4
294	295	33	0.3

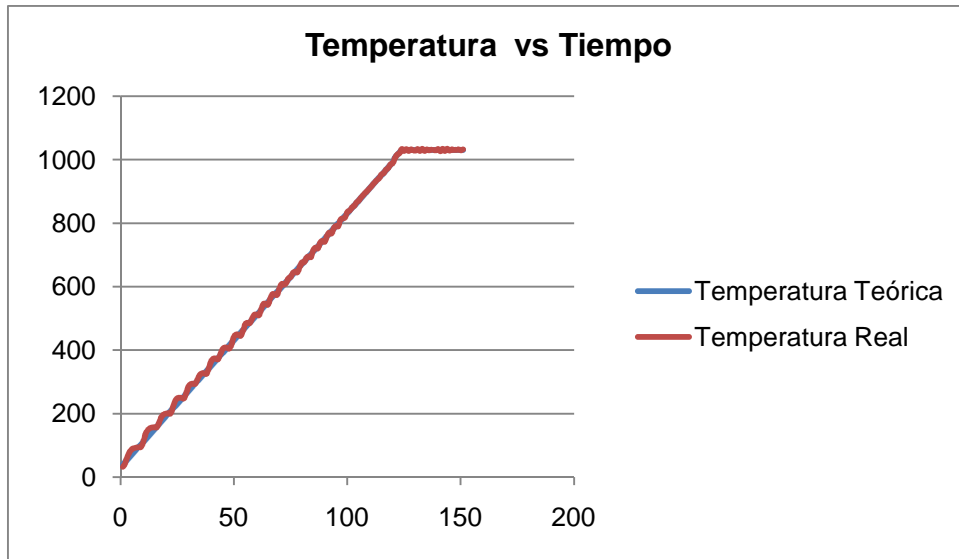
309	303	34	2.0
322	311	35	3.5
327	319	36	2.5
326	327	37	0.3
326	335	38	2.7
346	343	39	0.9
365	351	40	4.0
373	359	41	3.9
373	367	42	1.6
371	375	43	1.1
387	383	44	1.0
403	391	45	3.1
408	399	46	2.3
407	407	47	0.0
405	415	48	2.4
420	423	49	0.7
442	431	50	2.6
449	439	51	2.3
448	447	52	0.2
445	455	53	2.2
461	463	54	0.4
482	471	55	2.3
486	479	56	1.5
485	487	57	0.4
499	495	58	0.8
511	503	59	1.6
512	511	60	0.2
510	519	61	1.7
528	527	62	0.2
545	535	63	1.9
546	543	64	0.6
543	551	65	1.5
562	559	66	0.5
576	567	67	1.6
575	575	68	0.0
574	583	69	1.5
594	591	70	0.5
608	599	71	1.5
606	607	72	0.2
611	615	73	0.7
626	623	74	0.5
630	631	75	0.2
643	639	76	0.6
647	647	77	0.0



645	655	78	1.5
662	663	79	0.2
676	671	80	0.7
677	679	81	0.3
691	687	82	0.6
695	695	83	0.0
693	703	84	1.4
715	711	85	0.6
723	719	86	0.6
720	727	87	1.0
738	735	88	0.4
744	743	89	0.1
741	751	90	1.3
759	759	91	0.0
770	767	92	0.4
767	775	93	1.0
784	783	94	0.1
791	791	95	0.0
790	799	96	1.1
811	807	97	0.5
814	815	98	0.1
818	823	99	0.6
835	831	100	0.5
839	839	101	0.0
849	847	102	0.2
854	855	103	0.1
865	863	104	0.2
871	871	105	0.0
880	879	106	0.1
888	887	107	0.1
896	895	108	0.1
903	903	109	0.0
911	911	110	0.0
919	919	111	0.0
927	927	112	0.0
935	935	113	0.0
941	943	114	0.2
953	951	115	0.2
957	959	116	0.2
968	967	117	0.1
973	975	118	0.2
985	983	119	0.2
989	991	120	0.2
1005	1007	121	0.2

1016	1015	122	0.1
1020	1023	123	0.3
1033	1030	124	0.3
1027	1030	125	0.3
1033	1030	126	0.3
1027	1030	127	0.3
1032	1030	128	0.2
1029	1030	129	0.1
1028	1030	130	0.2
1033	1030	131	0.3
1027	1030	132	0.3
1034	1030	133	0.4
1027	1030	134	0.3
1032	1030	135	0.2
1029	1030	136	0.1
1031	1030	137	0.1
1030	1030	138	0.0
1029	1030	139	0.1
1033	1030	140	0.3
1026	1030	141	0.4
1034	1030	142	0.4
1027	1030	143	0.3
1034	1030	144	0.4
1028	1030	145	0.2
1032	1030	146	0.2
1030	1030	147	0.0
1030	1030	148	0.0
1032	1030	149	0.2
1029	1030	150	0.1
1032	1030	151	0.2
<b>% Error Promedio</b>			<b>2.2</b>

La Figura 4-17 muestra las curvas real y teórica obtenidas en este tratamiento térmico.



**Figura 4-17:** Temperatura real y teórica vs tiempo para el temple del acero K110.

Analizando tanto las tablas de datos obtenidas y gráficas para cada tratamiento térmico de los diferentes tipos de aceros se observa que el error o desviación entre la temperatura real y teórica del horno se presenta en bajas temperaturas debido a la inercia de calentamiento en las resistencias del horno, pero para los rangos de temperatura en los que generalmente se requiere mayor precisión (500 – 1100 °C) esta desviación disminuye notablemente de tal forma que el error promedio obtenido es relativamente pequeño y despreciable.

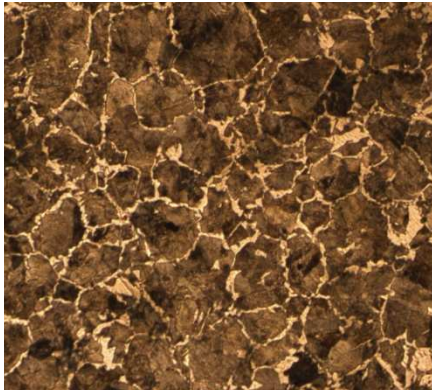
Se puede considerar entonces que una vez realizados los ajustes necesarios el sistema de control de la temperatura del horno está calibrado adecuadamente.

## 4.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO.

Una vez realizados los diferentes tratamientos térmicos a las probetas de diferentes aleaciones se procedió a realizar un análisis metalográfico para constatar que las estructuras obtenidas en cada probeta son las deseadas y con esto verificar además que el horno haya alcanzado y permanecido a las temperaturas programadas. Todas las probetas se pulieron adecuadamente y observando a través del microscopio se obtuvieron los siguientes resultados:

## ACERO 1045

### PROBETA TESTIGO



a)

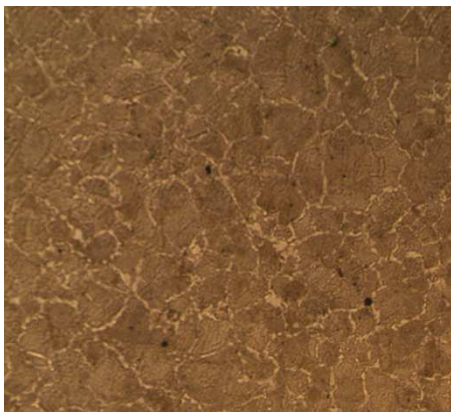


b)

**Figura 4-18:** Metalografías del acero 1045 probeta testigo. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

En la probeta testigo se puede apreciar ferrita en los límites de grano (partes blancas) y perlita (zonas oscuras), el grano no tiene un tamaño uniforme y se observan placas laterales de ferrita.

### PROBETA RECOCIDA.



a)

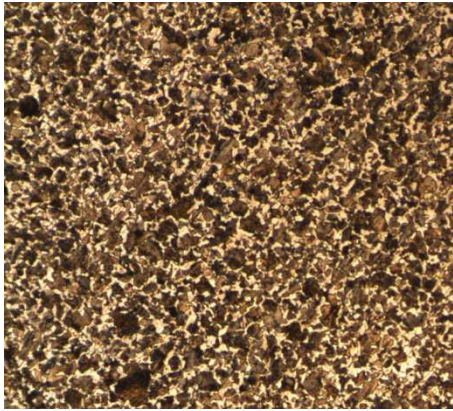


b)

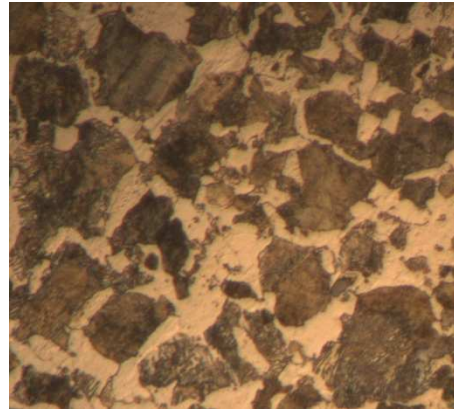
**Figura 4-19:** Metalografías del acero 1045, probeta recocida. Nital 2%, a) 100x, b) 500x

Se observa en la estructura principalmente la presencia de ferrita proeutectoide en los límites de grano con inmersiones de espigas de ferrita en una matriz de perlita. A diferencia de la probeta testigo el tamaño del grano se redujo y la estructura es más homogénea, esto debido a un enfriamiento lento alcanzado en el horno.

### PROBETA NORMALIZADA.



a)

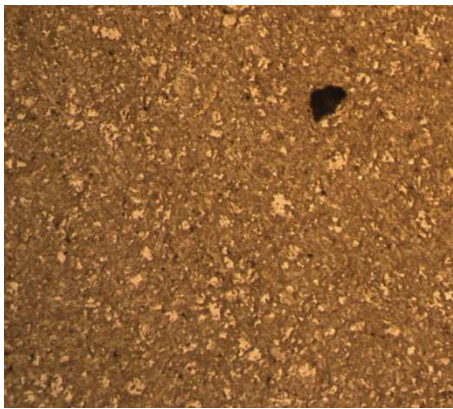


b)

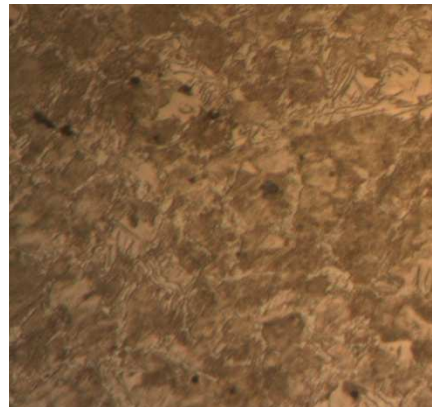
**Figura 4-20:** Metalografías del acero 1045, probeta normalizada. Nital 2%, a) 100x, b) 500x

Se puede observar una perlita fina laminar (partes oscuras) y ferrita (partes blancas). Esta estructura tiene mayor presencia de perlita que la probeta testigo, razón por la cual la dureza debe ser mayor, no es una estructura homogénea debido a que el enfriamiento se realizó al aire libre.

### PROBETA TEMPLADA



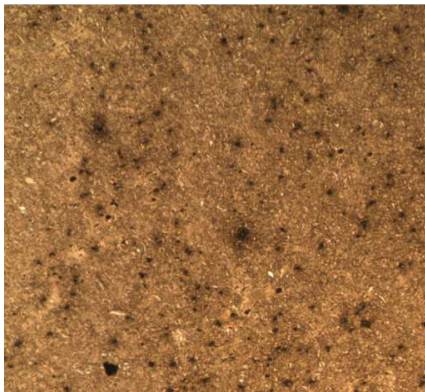
a)



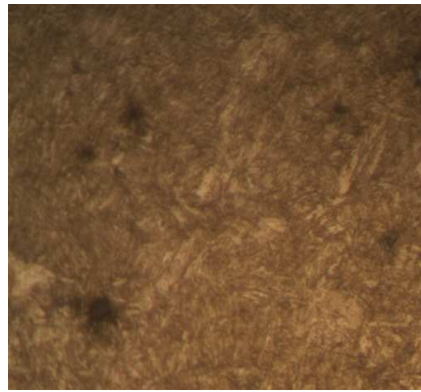
b)

**Figura 4-21:** Metalografías del acero 1045 probeta templada. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

Se puede observar en la fotografía la presencia de ferrita en los límites de grano, la estructura acicular es probablemente bainita superior, la matriz es perlítica. Esta probeta fue enfriada en aceite, razón por la cual no se formó martensita, pero la presencia de bainita en la estructura aumenta la dureza de la muestra.

**ACERO V320****PROBETA TESTIGO**

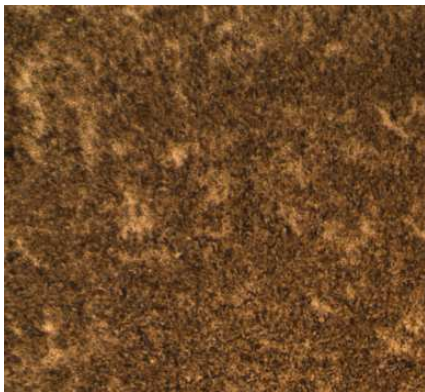
a)



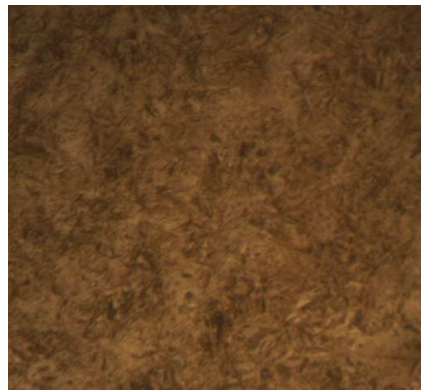
b)

**Figura 4-22:** Metalografías del acero V320, probeta testigo. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

La probeta testigo muestra un bloque de ferrita y perlita laminar fina, las partes oscuras son sulfuros.

**PROBETA TEMPLADA**

a)



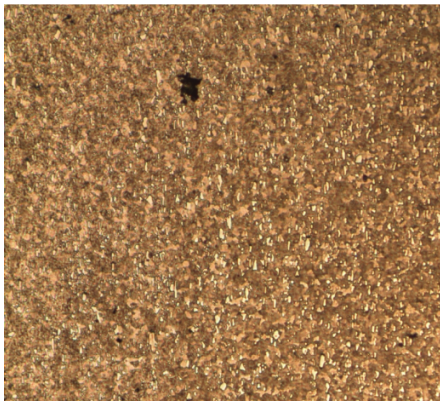
b)

**Figura 4-23:** Metalografías del acero V320, probeta templada. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

En la probeta templada se observa una estructura constituida enteramente por martensita fina y homogénea. En ciertas zonas se puede apreciar en la Figura 4-20b austenita retenida debido a enfriamiento brusco en agua.

## ACERO K100.

### PROBETA TESTIGO.



a)

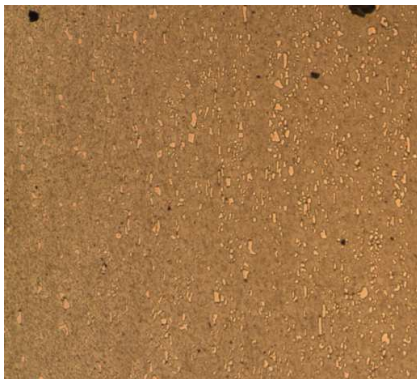


b)

**Figura 4-24:** Metalografías del acero K100, probeta testigo. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

La probeta testigo tiene una matriz de perlita, con zonas de ferrita y carburos de cromo formados en muchas zonas por tratarse de una aleación de cromo (partes cremas).

### PROBETA TEMPLADA



a)



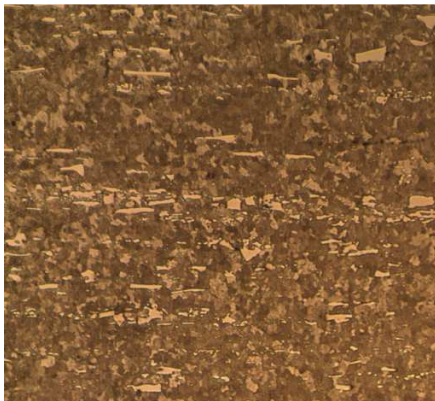
b)

**Figura 4-25:** Metalografías del acero K100, probeta templada. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

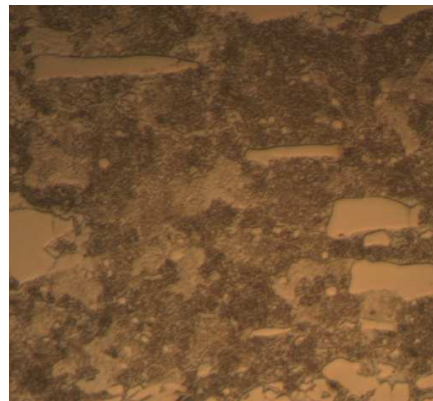
En esta probeta se ve claramente pequeñas partículas esferoidales de carburo de cromo dentro de los granos en una matriz de martensita, la cual se obtuvo durante el temple. Se puede además observar en la figura 4-22b zonas de austenita retenida.

## ACERO K110

### PROBETA TESTIGO



a)

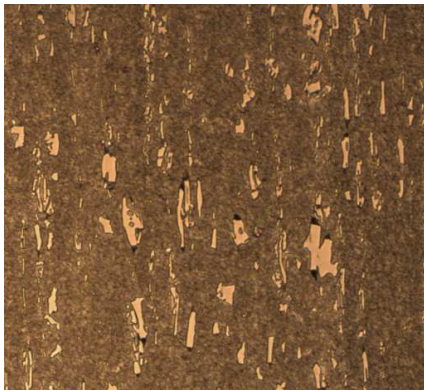


b)

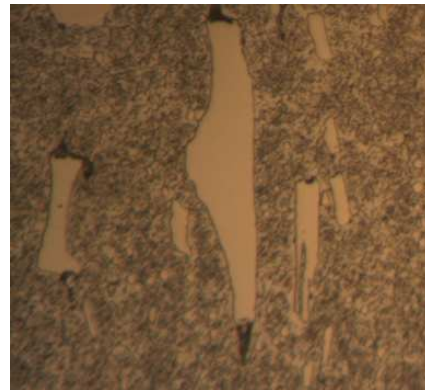
**Figura 4-26:** Metalografías del acero K110, probeta testigo. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

Se trata de una aleación de cromo en la cual se ve claramente pequeñas partículas de carburo de cromo dentro de una matriz de perlita con zonas de ferrita.

### PROBETA TEMPLADA



a)



b)

**Figura 4-27:** Metalografías del acero K110, probeta testigo. Nital 2%, a) 100x, b) 500x.

Se ve claramente en la probeta pequeñas partículas de carburo de cromo dentro de los granos en una matriz de martensita. La martensita aparece más oscura debido a que la probeta fue templada desde una temperatura muy alta. Se puede también observar en la Figura 4-24b zonas de austenita retenida.

Las estructuras obtenidas fueron las esperadas, esto demuestra que fueron llevadas a las temperaturas programadas y permanecieron en ellas los tiempos



establecidos, para poder detectar con mayor facilidad las estructuras obtenidas, se utilizó el Atlas de Microestructuras de Aleaciones Industriales Vol 7 del Metals Handbook., en donde existen metalografías de estos materiales sometidos a tratamientos térmicos similares.

### 4.3 ANÁLISIS DE DUREZAS.

Una vez realizado el análisis metalográfico se procede a verificar las durezas de las probetas, en la Tabla 4-13 se tabulan las durezas medidas para cada probeta.

**Tabla 4-13:** Durezas de las probetas testigo y tratadas térmicamente.

<b>Determinación de las Durezas</b>							
<b>Material</b>	<b>Dureza 1 [HRB]</b>	<b>Dureza 2 [HRB]</b>	<b>Dureza 3 [HRB]</b>	<b>Dureza 4 [HRB]</b>	<b>Dureza 5 [HRB]</b>	<b>Prom [HRB]</b>	<b>Dureza Brinell</b>
Acero K100	96	96	94	97	98	96	223
Acero K110	94	94	94	94	93	94	212
Acero V320	98	99	100	98	99	99	241
Acero 1045	82	84	85	85	89	85	167
<b>Temple</b>							
<b>Material</b>	<b>Dureza 1 [HRC]</b>	<b>Dureza 2 [HRC]</b>	<b>Dureza 3 [HRC]</b>	<b>Dureza 4 [HRC]</b>	<b>Dureza 5 [HRC]</b>	<b>Prom [HRC]</b>	<b>Dureza Brinell</b>
Acero K100 (enfriamiento en aceite)	60	60	59	60	60	60	627
Acero K110 (enfriamiento en aceite)	59	60	61	58	59	59	601
Acero V320 (enfriamiento en agua)	52	50	53	53	55	53	534
Acero 1045 (enfriamiento en aceite)	29	28	25	28	30	28	262
<b>Normalizado</b>							
<b>Material</b>	<b>Dureza 1 [HRB]</b>	<b>Dureza 2 [HRB]</b>	<b>Dureza 3 [HRB]</b>	<b>Dureza 4 [HRB]</b>	<b>Dureza 5 [HRB]</b>	<b>Prom [HRB]</b>	<b>Dureza Brinell</b>
Acero 1045	90	90	92	89	90	90	187
<b>Recocido</b>							
<b>Material</b>	<b>Dureza 1 [HRB]</b>	<b>Dureza 2 [HRB]</b>	<b>Dureza 3 [HRB]</b>	<b>Dureza 4 [HRB]</b>	<b>Dureza 5 [HRB]</b>	<b>Prom [HRB]</b>	<b>Dureza Brinell</b>
Acero 1045	84	86	86	86	86	86	170

Las conversiones de las escalas HRB y HRC a la escala Brinell se realizaron usando las tablas del manual de la BOHLER para aceros especiales. Esto permite comparar de mejor forma las durezas de las probetas.

De la tabla de datos se puede analizar lo siguiente:

- Las probetas de todos los aceros presentan un aumento en su dureza después de ser sometidas a temple, esto reafirma que se produjeron los cambios estructurales anteriormente explicados, además los valores alcanzados están dentro de los rangos esperados.
- La probeta 4T no fue templado en agua y por esto no alcanzó su máxima dureza, al templearla en aceite se obtuvo un valor medio debido a que la velocidad de enfriamiento es menor.
- La dureza de la probeta recocida 4R tiene una dureza similar a la de la probeta testigo 4, esto se debe a que el estado de suministro de la misma es en recocido, sin embargo la probeta 4R presenta un grano más pequeño y homogéneo.
- La probeta normalizada 4N tiene una dureza levemente mayor a la recocida 4R esta es la razón por la cual a veces es preferible realizar recocido en lugar del normalizado a los aceros con más del 0,4%C.

## CAPÍTULO 5

# MANUAL DE PROGRAMACIÓN Y OPERACIÓN DEL HORNO LINDBERG

### 5.1 INSTALACIÓN DEL EJECUTABLE DE CONTROL DEL HORNO

El ejecutable para el control del horno fue creado en el programa Labview 2009, este no puede ser modificado en su estructura interna ni externa, cumple con las funciones mencionadas en el Capítulo III. No es necesario tener instalado el software Labview para poder correr el ejecutable de control creado.

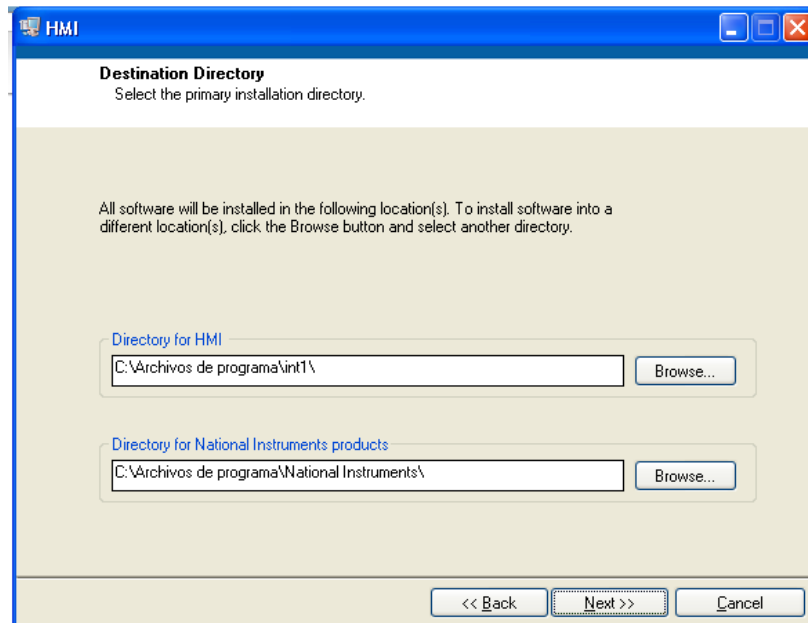
#### 5.1.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

El ejecutable puede ser instalado en sistemas de Windows XP, Vista y Windows 7, el requerimiento de memoria RAM debe ser de más de 500MB. El computador debe poseer una entrada serial tipo RS-232 (DB9) libre para la conexión del cable de programación TSX PCX 1031, en caso contrario se pueden utilizar los puertos USB del computador mediante un cable adaptador DB9 a USB configurando previamente el puerto COM de este en el administrador de dispositivos e instalando el driver del cable adaptador correctamente.

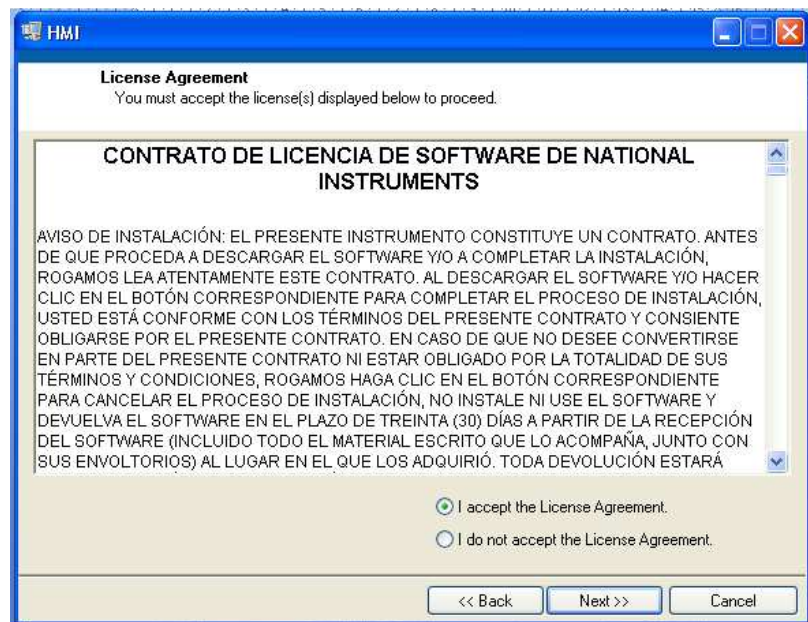
#### 5.1.2 PASOS PARA LA INSTALACIÓN

1. Insertar el CD de instalación en el computador.
2. Abrir la carpeta **Ejecutablehorno** en donde se encuentran el ejecutable del HMI y su instalador en Mis Documentos.
3. Abrir la Carpeta **HMI INSTALADOR/HMI instalador horno/Volume**
4. Pulsar el icono SETUP para la instalación.
5. El instalador pide la dirección en donde va a guardarse: C:\Archivos de programa\int1\ (Ver Figura 5-1), presionar NEXT.
6. Aceptar la licencia y presionar NEXT (Ver Figura 5-2).
7. Presionar NEXT para empezar la instalación (Ver Figura 5-3).
8. Esperar hasta que la instalación este realizada. Es recomendable reiniciar el computador como pide el programa de instalación (Ver Figura 5-4).
9. El ejecutable se abre en **INICIO/Todos los programas/HMI/HMI HORNO**

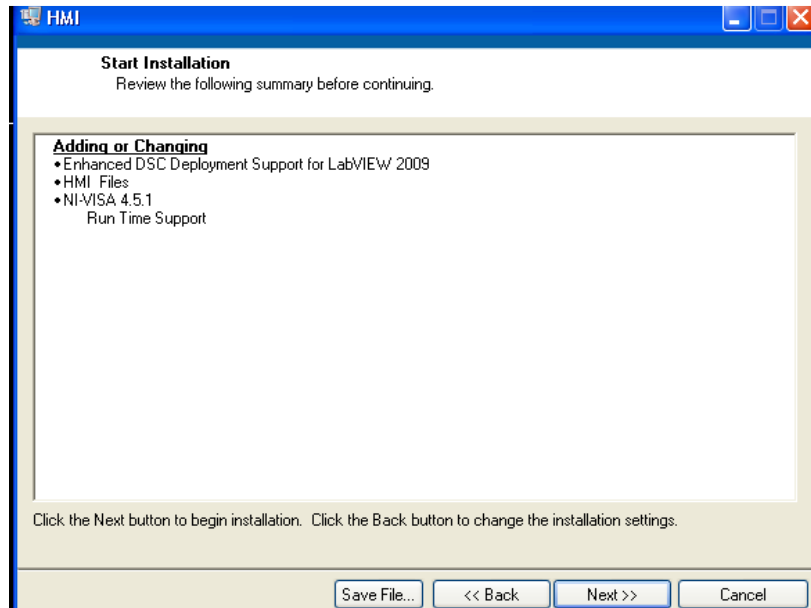
**NOTA:** Es recomendable crear un acceso directo del ejecutable y ubicarlo en el escritorio.



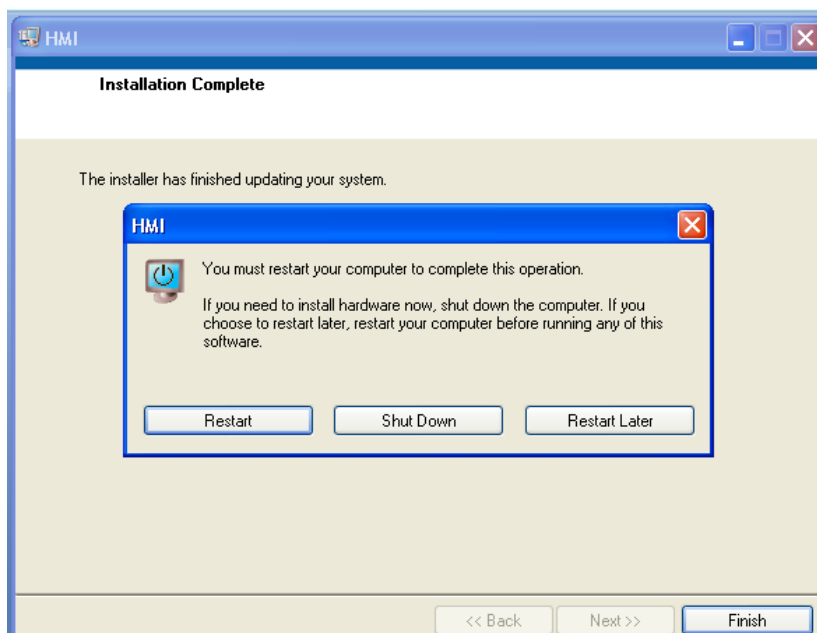
**Figura 5-1:** Proceso de direccionamiento del ejecutable del HMI.



**Figura 5-2:** Contrato de licencia de Software.



**Figura 5-3:** Elementos que se instalan.



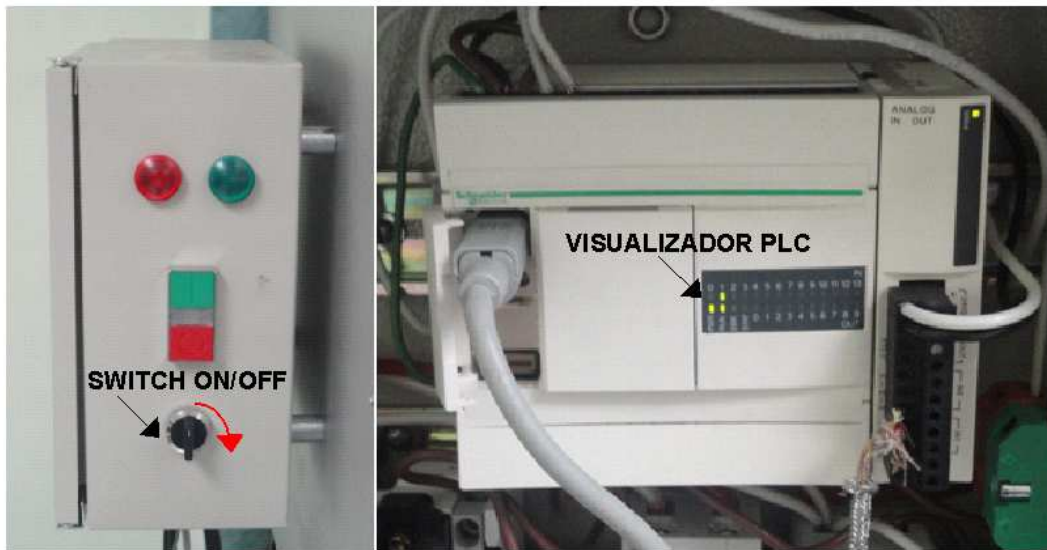
**Figura 5-4:** Instalación del ejecutable.

## 5.2 OPERACIÓN Y MANEJO DEL SISTEMA

Previo a realizar la programación del proceso de tratamientos térmicos se deben realizar los siguientes pasos:

**Paso 1:** Conectar el cable de poder a la red 220VAC.

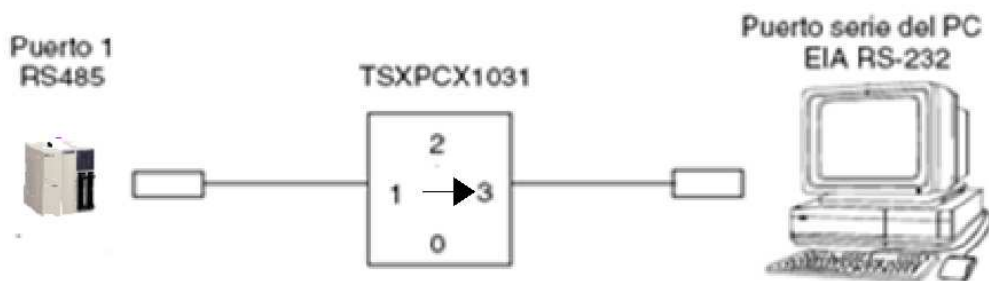
**Paso 2:** Girar el SWITCH ON/OFF en la caja de control, el cual prende el PLC como se indica en la Figura 5-5.



**Figura 5-5:** Encendido del PLC.

**NOTA:** En el visualizador del PLC se enciende el indicador verde RUN, lo cual indica que este está listo para funcionar.

**Paso 3:** Comprobar que el cable de programación TSX PCX 1031 este bien conectado y su selector se encuentre ubicado en la opción 3 (Ver Figura 5-6).

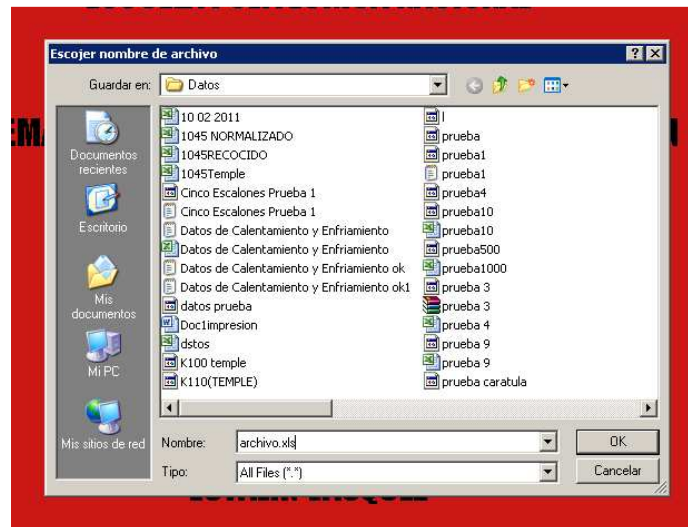


**Figura 5-6:** Cable de programación TSX PCX 1031.

**Paso 4:** Abrir el ejecutable instalado en la computadora, automáticamente el PLC se enlaza con el HMI si la comunicación es correcta entre puertos.

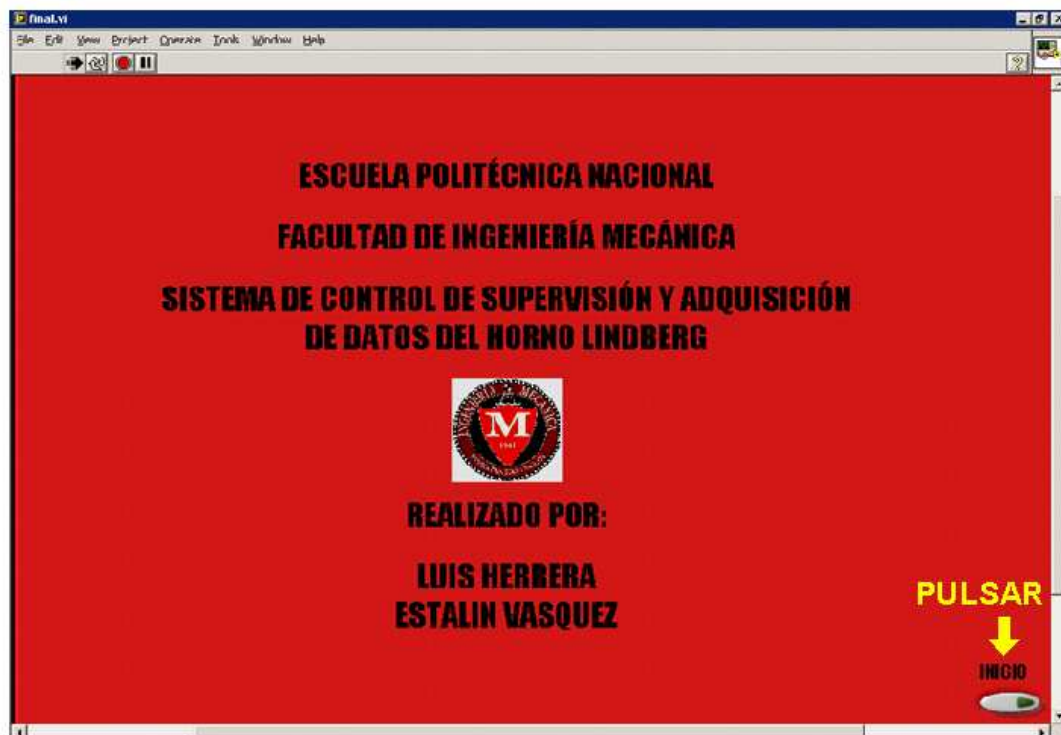
**Paso 5:** Una vez enlazado, el programa automáticamente despliega una ventana para guardar un archivo, con la dirección y nombre que se desee, en este archivo, se almacenaran los datos tomados de Temperatura Real y Temperatura Teórica y Tiempo de muestreo del proceso de tratamientos térmicos (Ver Figura 5-7).

Al momento de escribir el nombre del archivo es preferible grabar el nombre de este con la extensión “xls”, es decir, “nombredelarchivo.xls” así este se guardara como un archivo EXCEL, caso contrario se guardara como un archivo desconocido, pero también este se podrá abrir con EXCEL.



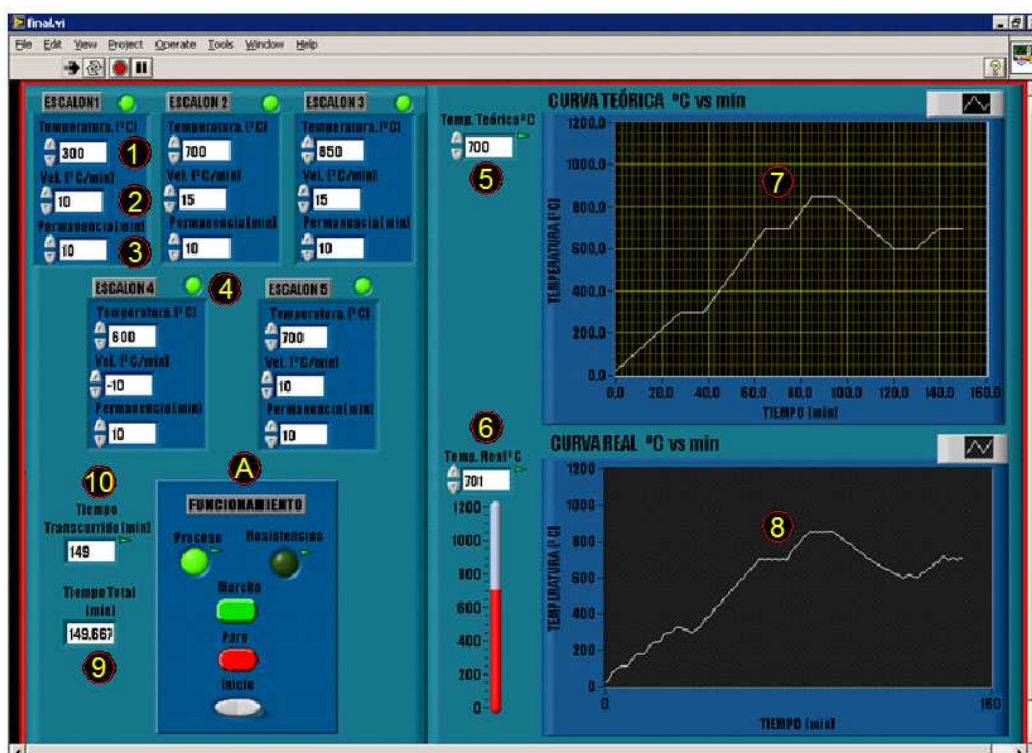
**Figura 5-7:** Guardando un archivo del proceso.

**Paso 6:** El HMI empieza a funcionar mostrando el panel frontal, para continuar al panel de control se pulsa el botón INICIO (Ver Figura 5-8)



**Figura 5-8:** Panel Frontal del HMI.

**Paso 7:** En la Figura 5-9 se presenta el panel de control y en la Tabla 5-1 se describen sus componentes explicados en el CAPITULO III.



**Figura 5-9:** Pantalla de proceso del HMI.

**Tabla 5-1:** Componentes para la pantalla de proceso.

NÚMERO/ LETRA	DESCRIPCIÓN
1	Indica el valor de temperatura [°C] a programarse
2	Indica el valor de velocidad de calentamiento o enfriamiento [°C/min] a programarse
3	Indica el valor de tiempo de permanencia [min] a programarse
4	Luz que permite visualizar en que escalón se encuentra el programa.
5	Indica la temperatura teórica o de consigna al instante
6	Indica la temperatura real al interior del horno al instante
7	Indica la curva teórica Temperatura Vs. Tiempo del programa
8	Indica la curva real Temperatura Vs. Tiempo del programa
9	Indica el tiempo total que toma en ejecutarse el programa
10	Indica el tiempo transcurrido mientras se ejecuta el programa
A	Menú que consta de cuatro pasos para la programación

En la Figura 5-10 se observa el menú completo del componente A, los cuatro pasos son: Configuración, Graficar; Transferencia CPU-PLC y Funcionamiento,



cada uno de ellos se activan en orden secuencial cuando se cargan datos validos. En la Tabla 5-2 se describen cada elemento de este componente

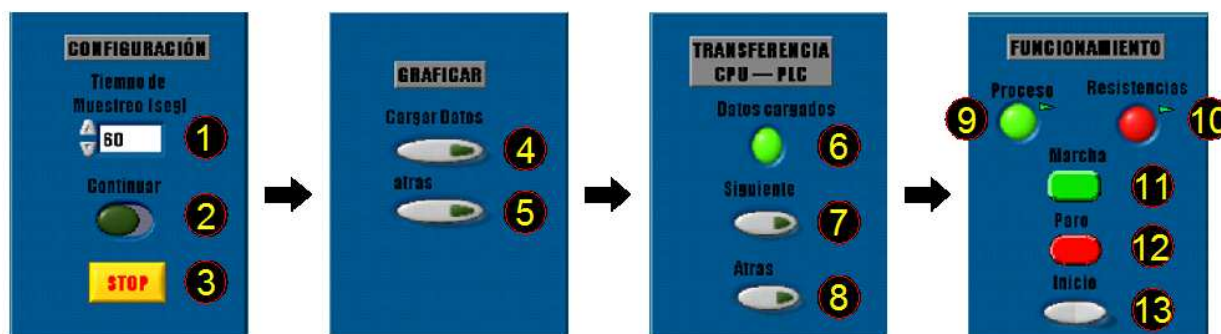


Figura 5-10: Menú de Programación del HMI.

Tabla 5-2: Elementos del Menú de Programación.

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Indica el Tiempo [seg] en que los datos van a ser tomados
2	Botón que permite ir al paso siguiente GRAFICAR
3	Botón que permite desvincular el PLC del HMI
4	Botón que permite cargar los datos al PLC
5	Botón que permite ir al paso anterior CONFIGURACIÓN
6	Indica que los datos han sido cargados con éxito
7	Botón que permite ir al paso siguiente FUNCIONAMIENTO
8	Botón que permite ir al paso anterior GRAFICAR
9	Indica que el programa se está ejecutando
10	Indica que las resistencias están encendidas
11	Botón que permite correr el proceso de tratamientos térmicos
12	Botón que permite parar el programa
13	Botón que permite ir al paso CONFIGURACIÓN

**NOTA:** Se debe verificar que exista la comunicación entre el PLC y el HMI observando que el indicador de temperatura real (#6 en la Figura 5-9) este entregando un valor correcto de temperatura al interior del horno.

En el panel de control se deben seguir los pasos de programación que a continuación se indican

1. En CONFIGURACIÓN se escribe mediante el teclado el valor en segundos del tiempo de muestreo. Este parámetro se define como en el tiempo en que van hacer tomados los datos de Temperatura Real y Temperatura

teórica, es recomendable poner 60 segundos así los datos van a ser adquiridos cada minuto (Se puede escribir cualquier valor de tiempo en segundos, considerando el numero de datos que se quieren tomar). Para seguir se presiona el botón CONTINUAR para ir al paso GRAFICAR (Ver Figura 5-11).

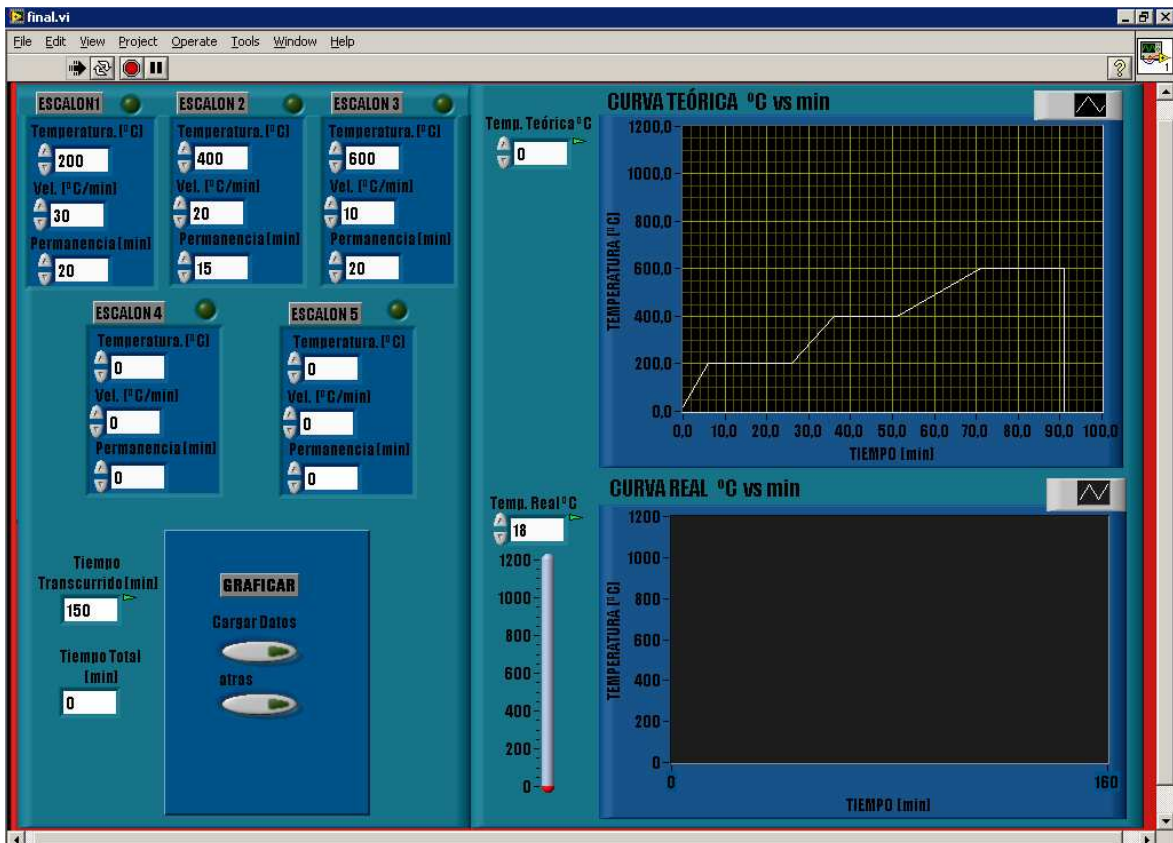


**Figura 5-11:** Paso CONFIGURACIÓN.

**NOTA:** El botón STOP desvincula el PLC del HMI para poder cerrar el programa y guardar otro proceso.

2. En GRAFICAR se debe escribir mediante el teclado los valores de Temperatura [°C], Velocidad de calentamiento y/o enfriamiento [°C/min] y Tiempo de permanencia [min] que se desean programar para un tratamiento térmico, tomando en cuenta:
  - Los valores de Velocidad de calentamiento van de un rango de 2°C/min hasta 30°C/min
  - Se pueden programar distintas Velocidades, Permanencias y Temperaturas en los escalones.
  - La velocidad de enfriamiento es única y se debe escribir con signo negativo con valor -10°C/min, en cualquier escalón.
  - La temperatura máxima de programación es de 1200°C

Con estos datos el programa empieza a graficar la Curva Teórica que el horno debe seguir. Se pueden programar uno, dos... hasta cinco escalones. Si se quieren programar menos de 5 escalones, aquellos no utilizados deben tener valor 0 en sus tres variables. Para seguir se presiona el botón CARGAR DATOS al paso TRANSFERENCIA-CPU (Ver Figura 5-12).



**Figura 5-12:** Paso GRAFICAR.

**NOTA:** Si se quiere volver al paso CONFIGURACIÓN se presiona el botón ATRÁS

En este paso se presentan alarmas para datos incorrectos como:

- Valores superiores a 1200<sup>a</sup>C en Temperatura
- Valores superiores a 30°C/min en Velocidad de calentamiento
- Valores diferentes a 10°C/min en Velocidad de enfriamiento

Estas alarmas son de tipo gráfico que aparecen en el panel de proceso e impiden continuar el proceso, una vez corregidas permiten seguir con el mismo (Ver Figura 5-13).

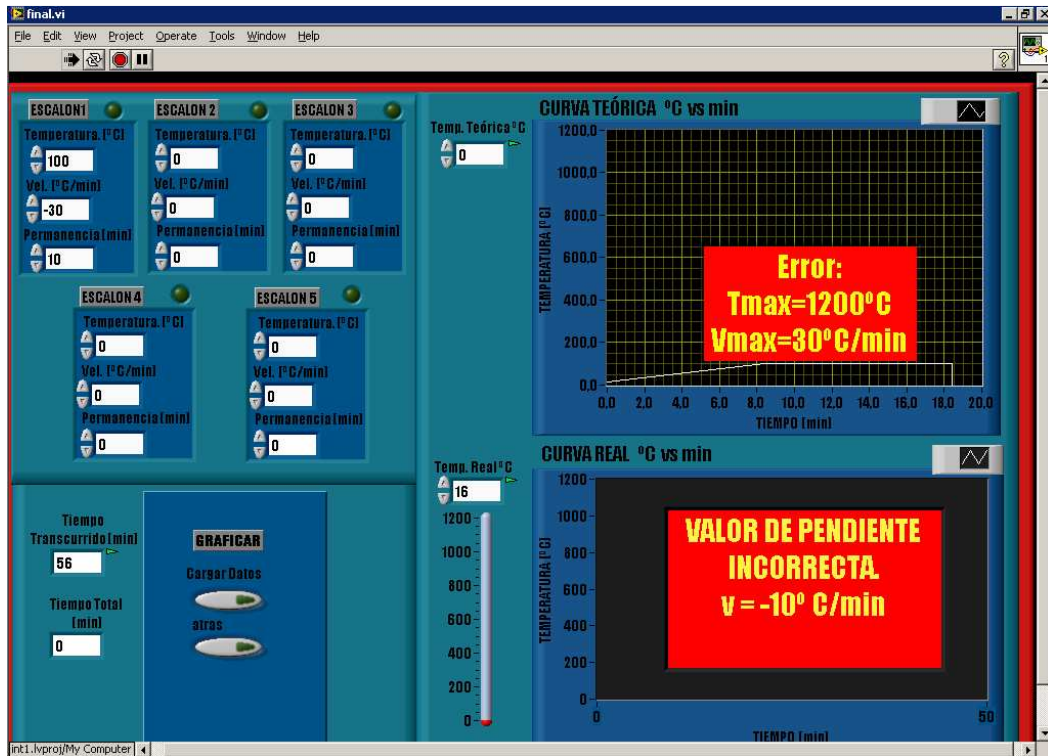


Figura 5-13: Alarmas del Proceso.

- En el paso TRANSFERENCIA-CPU los datos son cargados al PLC, la luz verde indica que se cargaron satisfactoriamente. Aquí se calcula el tiempo que va a tomar el proceso programado en completarse. Para continuar se presiona el botón SIGUIENTE al paso FUNCIONAMIENTO (Ver Figura 5-14).

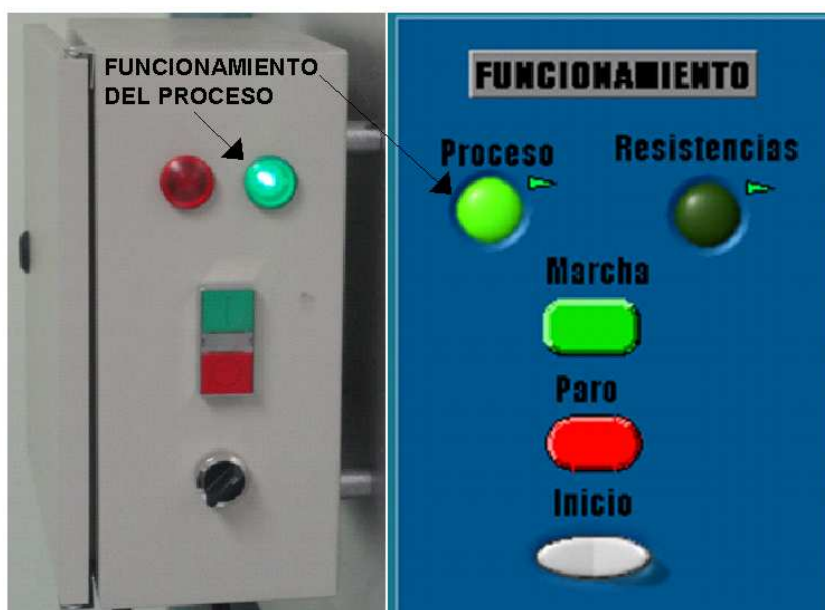


Figura 5-14: Paso TRANSFERENCIA-CPU.

**NOTA:** Si se quiere volver al paso GRAFICAR se presiona el botón ATRÁS

4. En el paso FUNCIONAMIENTO se tienen dos opciones de manejo a través del HMI o a través de la caja de control.

Al presionar el botón MARCHA en el HMI o en el botón verde en la caja de control se inicia el proceso programado y se enciende el indicador verde tanto en el HMI como en la caja de control (Ver Figura 5-15).



**Figura 5-15:** Luz indicadora del funcionamiento del proceso.

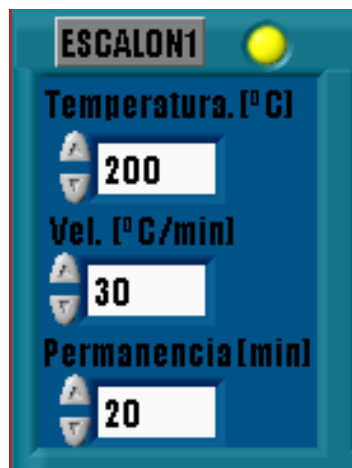
**NOTA:** Si no se quiere empezar el proceso programado se presiona el botón INICIO y vuelve a CONFIGURACIÓN para de nuevo programar todas las variables o salir para guardar otro proceso.

La luz roja indica que las resistencias están funcionando para calentar al horno, no siempre debe estar prendido este indicador, ya que el control es ON/OFF (Ver Figura 5-16).



**Figura 5-16:** Luz indicadora del funcionamiento de las resistencias.

Cada escalón en el HMI tiene un indicador, el cual titila cuando se encuentra en una rampa y permanece prendido cuando se encuentra en el tiempo de permanencia de ese escalón (Ver Figura 5-17).



**Figura 5-17:** Luz indicadora de cada escalón.

Si se quiere detener el proceso en cualquier instante se pulsa el botón PARO en el HMI o en la caja de control, los datos se guardaran hasta ese momento en el archivo especificado.

El proceso finaliza cuando el Tiempo transcurrido [min] se iguala al Tiempo Total [min] como se indica en la Figura 5-18 del HMI.



**Figura 5-18:** Final del proceso.

Inmediatamente se activa una alarma de aviso sonora y visual de finalización del proceso, para lo cual los parlantes de la computadora tienen que estar encendidos (Ver Figura 5-19).



**Figura 5-19:** Alarma de Proceso Finalizado.

5. Para poder programar otro proceso y guardarlo o cerrar el programa definitivamente se presiona el botón INICIO en FUNCIONAMIENTO, el programa vuelve a CONFIGURACIÓN, aquí se presiona el botón STOP, este desvincula el PLC del HMI.

Desvinculado el PLC del HMI, si ya no se requiere realizar otro proceso se recomienda apagar el PLC con SWITCH ON/OFF en la caja de control, luego desconectar el cable de poder.

### 5.3 ERRORES Y SOLUCIONES

1. **CABLE DE COMUNICACIÓN:** Si se observa que el PLC no este enviado un dato de temperatura, es decir, no se puede vincular el HMI con el PLC y el proceso no puede ejecutarse se debe verificar que el cable de comunicación TSX PCX 1031 este bien conectado. y su selector se encuentre en la posición 3.
2. **NO EXISTE COMUNICACIÓN:** Este error es frecuente cuando se utiliza el puerto USB del computador para conectarse con el PLC, se debe verificar la correcta instalación del driver del cable adaptador DB9 a USB y la configuración del COM en el administrador de dispositivos.
3. **MALA CONEXIÓN DE LA TERMOCUPLA:** Cuando existen saltos de temperatura en el cuadro de Temperatura Real en el HMI, lo que produce que el contactor empiece a prenderse y apagarse rápidamente, significa que la termocupla está mal conectada en la entrada analógica IN 0 del PLC.
4. **EN CASO DE UN APAGÓN:** Mientras el proceso está funcionando, se deben verificar los equipos, si el PLC tiene una luz indicadora de ERROR prendida, y no se quiere vincular al HMI después de haber revisado el cable, se debe volver a cargar el programa del software TwidoSoft al PLC como se explica en el CAPITULO III.

### 5.4 PRECAUCIONES DE USO

El horno llega hasta un máximo de 1200<sup>a</sup>C por lo que mientras se encuentra funcionando en la puerta de este puede llegar a una temperatura de 60 [°C] a plena carga, siempre para manipular la puerta se debe utilizar el asa del horno.

Al abrir la puerta finalizado un proceso se debe contar con guantes y pinzas para retirar las muestras de la cámara del horno y ubicarlas en una cama de ladrillos refractarios como se indican en la Figura 5-20.





**Figura 5-20:** Precauciones de uso.

Las conexiones eléctricas tanto de las resistencias del horno, como de la caja de control deben estar aisladas para evitar accidentes.

#### **5.4 MANTENIMIENTO**

El mantenimiento para este sistema se basa fundamentalmente en la parte eléctrica, principalmente los fusibles de la caja de control.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- El desarrollo del sistema SCADA del horno LINDBERG, se enfoca en la utilización de un PLC, que actúa como esclavo, el cual recibe y envía información a un computador, que actúa como maestro, el cual posee una aplicación de monitoreo y gestión de la información en el HMI que ejecuta el sistema de control de temperatura ON/OFF en los procesos de Tratamientos Térmicos en tiempo real.
- Se selecciono el PLC Twido TWDAA24DRF ya que cumple con los requerimientos establecidos, este permite adaptar un modulo analógico TWDALM3LT en donde se conecta la termocupla tipo k directamente, ya que no necesita acondicionamiento previo. El control ON-OFF con histéresis y realimentación resulta ser el más conveniente tipo de control de temperatura para este proceso, el cual no necesita un alto grado de exactitud, por lo que el contactor AC3 220v es el actuador más conveniente.
- El entorno grafico que presenta el HMI desarrollado en Labview 2009 facilita al operador monitorear y controlar las variables en cualquier instante y obliga a este programar un proceso correctamente, ya que incluye alarmas de valores incorrectos no aceptados por el sistema y así este puede tomar decisiones operacionales correctas. En el HMI se programan hasta 5 escalones de tres variables que son: Temperaturas, Velocidades de calentamiento y/o enfriamiento y Tiempos de permanencia para ejecutar los tratamientos térmicos.
- Los datos de temperatura real y temperatura teórica en el tiempo programado son almacenados automáticamente en el disco duro en formato de hoja de cálculo (EXCEL), estos históricos pueden ser manipulados de acuerdo a la necesidad del usuario.
- La operación entre el operador y el HMI no requieren de conocimientos profundos de computación, ya que únicamente se usa el mouse y el teclado para el manejo del sistema de control.

- El sistema de automatización se encuentra en una caja de control donde está el PLC, el contactor y los elementos de protección, para la adquisición de datos el sistema necesita el cable TSX PCX 10131 que convierte las señales RS232 a RS485 o viceversa según la posición de su selector. Para la comunicación del PLC-PC se utiliza el protocolo Modbus RTU, este es un protocolo comercial ampliamente difundido, es uno de los más económicos y transfiere una gran cantidad de datos a alta velocidad. La velocidad de transferencia de datos es 9600 bps, lo cual determina una respuesta rápida de envío y adquisición de datos para este tipo de procesos.
- Realizada las pruebas se tiene que el control tiene un error de  $\pm 3\%$  de temperatura real promedio con la temperatura de consigna en las curvas de tratamientos térmicos, este error es mínimo ya que en las probetas se obtuvieron los resultados esperados en pruebas de metalografía y dureza.

## RECOMENDACIONES

- La formación integral de los estudiantes se obtiene al complementar la formación académica con la parte práctica, mediante el uso de nuevas herramientas tecnológicas sustentado en una sólida base de conocimientos. Se debe tomar en cuenta que la parte mecánica siempre irá acompañada de la parte eléctrica y electrónica para mejorar los procesos, por lo tanto, los estudiantes tenemos la obligación de poder manejar estas tres materias importantes.
- Este sistema de control y monitoreo puede ser utilizado en cualquier proceso donde la temperatura sea la variable a controlar, también puede adaptarse a cualquier horno configurando previamente las velocidades máximas de calentamiento y temperatura máxima alcanzada.
- El sistema es flexible lo que permite renovaciones o modificaciones para futuras actualizaciones, ya que el PLC tiene una entrada y salida analógica disponible y varias entradas y salidas digitales.
- Para evitar daños en el PLC se deben verificar los circuitos de protección del mismo. Tener cuidado con las conexiones eléctricas y el calentamiento de la puerta para evitar lesiones. Debe considerarse que las termocuplas en general se deterioran con el tiempo y ello ocurre de forma significativa cuando se instalan en procesos a altas temperaturas y en ambientes agresivos, como es el caso del horno. Por tanto es recomendable hacer un estudio experimental que determine la periodicidad con la que haya que cambiar estos dispositivos.
- Aun cuando el manejo de del HMI es sencillo, se recomienda un adiestramiento previo al personal que está a cargo del sistema en conocimientos técnicos del proceso de tratamientos térmicos y en seguridad de manejo del horno.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **LIBROS**

- AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, México, 1998.
- RUIZ Rodrigo, Folleto de Tratamientos Térmicos, EPN, 2007.
- METAL HANDBOOK, American Society for Metals, Vol. 2, Ohio, 1994
- METALS HANDBOOK, Atlas de Microestructuras de Aleaciones Industriales Volumen 7, Ohio, 1994.
- BETANCUR M., Automatización del Horno de Tratamientos Térmicos de Aluminio en la Aerolínea Tampa Cargo, Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad EAFIT; Colombia; 2004.
- APRAIZ B. José, Tratamientos Térmicos de los Aceros, Dossat, Madrid, 1980.
- GUY Albert, Metalurgia Física para Ingenieros, Massachusetts, Addison-Wesley, 1970.
- BOLZERN Paolo, Fundamentos del Control Automático, McGraw-Hill, México, 2009.
- RODRIGUEZ Jesús, Introducción a la Ingeniería del Control Automático, McGraw-Hill, México, 1998.
- ROCA C. Alfred, Control de Procesos, Alfaomega, México, 2002.
- CREUS Antonio, Simulación y Control de Procesos por Ordenador, Marcombo, Barcelona 2007.
- ACEDO S. José, Instrumentación y Control Básico de Proceso, Díaz de Santos, Madrid, 2006.

### **MANUALES**

- Autómatas programables TWIDO Guía de instalación del software TwidoSoft spa Versión 2.0.
- Boholer, Manual de Aceros Especiales, Quto, Ecuador, 2010.
- ARÉVALO P. y HERRERA S.; Manual Labview 8.5 Básico e Intermedio, Abril 2009.

**TESIS**

- ANDAGANA H. y CHURO E.; Diseño e Implementación de un Sistema de Control Distribuido Didáctico para el Laboratorio de Control de Procesos; Quito; Tesis EPN; 2006.
- PAREDES J.; Computarización de la Máquina de Ensayos MTS; Quito; Tesis EPN; 2002.
- ALVARADO L. y TORRES J.; Utilización de un PLC en el Control de un Sistema de Enfriamiento Evaporativo Aplicado a Oficinas; Quito; Tesis EPN; 2001.
- RUANO E.; Diseño, Construcción y Automatización con un PLC Allen-Bradley Micrologix 1100 de un Caldero Didáctico de Vapor Saturado; Quito; Tesis EPN; 2009.
- CRUZ D. y PROAÑO J.; Diseño, Programación y Construcción del Control de un Sistema Hidráulico de Nivel Empleando un Autómata Programable (PLC) Cumpliendo con la Norma IEC; Quito; Tesis EPN; 2009.
- RUEDA P. y VÁSQUEZ J.; Automatización de un Torno de Operación Manual Mediante un PLC Allen-Bradley Micrologix Para Convertirlo en un Torno de Control Numérico, Quito; Tesis EPN; 2010.
- MORENO G.; Sistema de Monitoreo de Viento, y Nivel de Agua en el Reservorio de la Central Hidroeléctrica Illuchi; Quito; Tesis EPN; 2010.
- CHAMORRO A. y SANDOVAL M.; Diseño e Implementación del Sistema de Control de Temperatura para la Climatización de las Salas de: Terapia Intensiva, Neonatología y Urgencias en el Hospital del IESS de Riobamba; Quito; Tesis EPN; 2010.

**DIRECCIONES ELECTRONICAS**

- Empresa Carbo San Luis proveedor de material refractario.  
<http://www.carbosanluis.com.ar>.

- REYES J.; Automatización del Sistema de Control y Monitoreo de una Autoclave para el Proceso de Vulcanización del Caucho en Calzado de Lona; Lima; Tesis PUCP; 2008.

<http://www.creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

- GONZÁLEZ R. y PRADINES R.; Análisis de Software para Desarrollo Entorno Gráfico Labview y Propuesta de Implementación para Laboratorio en el Instituto de Electricidad y Electrónica en Universidad Austral De Chile; Valdivia; Tesis UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE ;2007.

<http://www.measurementcomputing.com>

# **ANEXOS**



**ANEXO No. 1**

**Hoja de Información de Seguridad de Producto Refractario:**

**ANEXO No. 2****Manual Usuario para el PLC Twido TWDLCAA24DRF:**

**ANEXO No. 3****Programa en TWIDO SOFT:**

**ANEXO No. 4****Programa en LABVIEW:**

**ANEXO No. 5****Catálogo de los aceros utilizados en los Tratamientos Térmicos.**