

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CALENTADO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS QUE TRABAJE EN UN RANGO DE TEMPERATURAS ENTRE 1000 A 1350 GRADOS CENTÍGRADOS, Y CONTROLADO POR UN SISTEMA COMPUTARIZADO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PILLAJO CORELLA BORIS MARCELO

brs0702@outlook.com

ROMERO VELASCO FABRICIO ISMAEL

fabryepn@gmail.com

DIRECTOR: Ing. WILLAN MONAR MSc.

william.monar@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, Boris Marcelo Pillajo Corella y Fabricio Ismael Velasco Romero, declaramos 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 correspondientes 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.

Boris Marcelo Pillajo Corella

Fabricio Ismael Romero Velasco

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado en su totalidad por BORIS MARCELO PILLAJO CORELLA Y FABRICIO ISMAEL ROMERO VELASCO, bajo mi supervisión.

Ing. Willan Monar MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco mis padres Margarita y Vinicio, por haberme enseñado los valores que me formaron como persona y me permitieron alcanzar este objetivo, además por guiarme siempre correctamente y apoyarme de forma incondicional.

A mi hermano Dannes por ser mi amigo y confiar en mí siempre.

A mi compañero de tesis y amigo Fabricio, por su lealtad y entrega en el desarrollo de este proyecto a pesar de las dificultades.

A toda mi familia, por siempre estar pendientes de mí y brindarme su cariño incondicionalmente, en especial a mi tío Efrén por haberme ayudado a desarrollar este proyecto.

Al Ing. Willan Monar por haberse hecho cargo de nuestro proyecto sin poner condiciones.

A mi amigo Carlos por haber colaborado de manera desinteresada en una parte determinante del desarrollo de este proyecto.

A todos mis amigos, en especial a Xavier, Andrés y Nelson, por haber compartido su amistad con nosotros este tiempo en el que se presentaron muchas dificultades.

A mi enamorada y amiga Ale, por apoyarme siempre incondicionalmente.

A la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por haberme brindado una sólida formación profesional y además forjar mi carácter en base a esfuerzo y dedicación.

A la vibración universal que permite la perfecta armonía entre las leyes físicas y la naturaleza, por darme la conciencia de sentir que existo aquí y ahora.

Boris

AGRADECIMIENTO

“De todo lo escrito yo aprecio sólo aquello que uno escribe con su sangre. Escribe con sangre, y aprenderás que la sangre es espíritu.
Es difícil comprender sangre extraña: yo aborrezco a todos los ociosos que leen”

F. Nietzsche, Así hablaba Zaratustra

En primer lugar quiero agradecer a mis padres que han sabido guiarme y brindarme su cariño, a mis hermanos por su apoyo. Uds. son la razón principal para haber culminado con éxito un objetivo más.

A mis amigos que durante la carrera han sido apoyo y compañía la lista no es muy grande pero si lo suficiente para nombrarlos a todos en tan corto espacio al igual que las palabras que no son las suficientes para expresarles mi gratitud.

Pero quiero agradecer de manera especial a Nelson, Esteban, Diego, Boris, Javier y Andrés por su colaboración para el desarrollo de este proyecto y los proyectos que sacamos adelante y por su amistad.

Fabricio

DEDICATORIA

A mis padres Margarita y Vinicio, que han estado a mi lado y me han demostrado su amor sin condiciones durante toda mi vida.

A mi hermano Dannes que me entiende como nadie en este mundo.

A mi tía Icela que siempre está pendiente de mis actos y ha cuidado de mí desde que nací.

A toda mi familia que siempre me brinda su amor, su cariño, su felicidad, y me considera una buena persona.

A Ale que coincidió conmigo y me comparte un poco de su luz.

A todos mis abuelitos que son y han sido ejemplos de vida y alegría.

Boris

Este trabajo lo dedico a mi padre Antonio y mi madre Mariana, a mis hermanos Tito, Clever, David, María y Adriana y a todos mis amigos.

Fabricio

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE ANEXOS	XVI
NOMENCLATURA	XVII
RESUMEN	XXII
CAPÍTULO I	1
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. TRATAMIENTO TÉRMICO	2
1.2.1. RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO	2
1.2.1.1. Temperatura de calentamiento	2
1.2.1.2. Tiempo de permanencia	2
1.2.1.3. Velocidad de calentamiento	2
1.2.1.4. Velocidad de enfriamiento.....	3
1.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	4
1.2.2.1. Recocido	5
1.2.2.2. Normalizado	7
1.2.2.3. Temple	8
1.2.2.4. Revenido	16
1.3. HORNOS INDUSTRIALES	18
1.3.1. SEGÚN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO	19
1.3.1.1. Calentamiento por resistencias eléctricas	19
1.3.1.2. Calentamiento por gas o combustible	20
1.3.2. SEGÚN EL TIPO DE ATMÓSFERA	20
1.3.2.1. En vacío	21
1.3.2.2. Neutra	21
1.3.2.3. Oxidantes o reductoras	21
1.3.3. SEGÚN EL TIPO DE SOLERA.....	21
1.3.3.1. Continua.....	22

1.3.3.2. Discontinua	22
1.4. PARTES CONSTITUYENTES DE UN HORNO	23
1.4.1. CIMIENTOS.....	23
1.4.2. PLATAFORMA	23
1.4.3. SOLERA.....	23
1.4.4. BÓVEDA.....	24
1.4.5. PAREDES	24
1.4.6. JUNTAS TÉRMICAS	24
1.4.7. ESTRUCTURA METÁLICA	24
1.4.8. VENTANAS DE TRABAJO	25
1.4.9. PUERTAS.....	25
1.5. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	26
1.5.1. CONDUCCIÓN	26
1.5.2. CONVECCIÓN	27
1.5.2.1. Capa Límite Hidrodinámica	28
1.5.2.2. Capa Límite Térmica.....	29
1.5.2.3. Flujo Laminar y Turbulento	29
1.5.2.4. Números adimensionales en el análisis de la convección	31
1.5.3. RADIACIÓN.....	34
1.6. TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS	35
1.6.1. CONVECCIÓN EN RECINTOS CERRADOS.....	36
1.6.2. FACTOR DE FORMA	38
CAPÍTULO II	41
DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL HORNO..	41
2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO	41
2.2. CONFIGURACIÓN DEL HORNO.....	42
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS CAPAS DEL REVESTIMIENTO	42
2.4. CÁLCULO TÉRMICO DE LOS ESPESORES DE PARED	45
2.4.1. DISPOSICIÓN DE LOS MATERIALES EN LAS CAPAS DE REVESTIMIENTO	45
2.4.2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES	47
2.4.2.1. Consideraciones para el cálculo	49
2.4.2.2. Proceso de cálculo.....	50
2.4.2.3. Calor perdido por conducción	50
2.4.2.4. Calor perdido por convección-radiación.....	52

2.4.2.5. Modelo Seleccionado.....	54
2.4.3. RESULTADOS Y PERFIL DE TEMPARATURA.....	56
2.4.4. CALOR TOTAL PERDIDO A TRAVÉS DE LAS PAREDES	57
2.4.4.1. Calor perdido a través de las paredes verticales	57
2.4.4.2. Calor perdido a través de las paredes horizontales	58
2.4.5. CÁLCULO DEL CALOR TRANSMITIDO A LA CARGA	61
2.4.6. CÁLCULO DEL CALOR TOTAL ACUMULADO	63
2.5. CÁLCULO DEL ESTADO TRANSITORIO	66
2.5.1. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO TRANSITORIO.....	66
2.5.2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA	71
2.5.3. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL HORNO	72
2.6. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	72
2.6.1. CONSIDERACIONES Y ECUACIONES A UTILIZARSE EN EL CÁLCULO	73
2.6.2. DISPOSICIÓN Y CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS	75
2.7. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	80
2.7.1. SISTEMAS DE CONTROL DE HORNOS ELÉCTRICOS.....	81
2.7.2. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	83
2.7.2.1. Elemento de medición y control	83
2.7.2.2. Elemento de medición (termocupla).....	84
2.7.2.3. Elemento regulador.....	85
2.7.3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.....	85
2.7.3.1. Interruptor termo magnético	85
2.7.3.2. Relé 120 Vac.....	86
2.7.4. ELEMENTOS DE MANDO Y SEÑALIZACIÓN.....	86
2.7.5. SELECCIÓN DEL CALIBRE DEL CABLE ELÉCTRICO.....	87
2.7.5.1. Circuito de fuerza	87
2.7.6. CIRCUITO DE CONTROL.....	88
2.8. ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE ..	90
2.8.1. SIMULACIÓN EN SAP 2000 V17	90
2.9. DISEÑO DEL MECANISMO DE LA PUERTA.....	92
CAPÍTULO III	96
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL HORNO	96
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	96

3.2. DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA.....	96
3.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS PAREDES DEL REVESTIMIENTO TÉRMICO 100	
3.4. DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLACAS PORTA-RESISTENCIA.....	103
3.5. CONSTRUCCIÓN DE LA CUBIERTA EXTERIOR CON CHAPA METÁLICA.....	108
3.6. CONSTRUCCIÓN E INSTALACION DE LA PUERTA.....	110
CAPÍTULO IV	114
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	114
4.1. INTRODUCCIÓN	114
4.2. PRUEBA EN VACÍO	114
4.3. MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA (HORNO)	118
4.4. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA (HORNO) USANDO EL TOOLBOX DE MATLAB.....	121
4.5. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL CONTROLADOR PID 124	
4.6. RECOCIDO DEL ACERO AISI 1045.....	129
4.7. TEMPLE DEL ACERO AISI 1045.....	131
4.8. REVENIDO DEL ACERO AISI 1045	132
4.9. TEMPLE DEL ACERO STAVAX	133
4.10. ANÁLISIS METALOGRÁFICO Y DE DUREZAS	135
4.10.1. ACERO AISI 1045.....	136
4.10.2. ACERO STAVAX (AISI 420)	138
4.10.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	139
CAPÍTULO V.....	141
MANUAL DE OPERACION	141
5.1. DESCRIPCIÓN	141
5.1.1. USO DEL HORNO.....	141
5.1.2. COMPONENTES DEL HORNO	141
5.1.3. ESPECIFICACIONES DEL HORNO	143
5.2. OPERACIÓN.....	144
5.2.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLES	144
5.2.2. OPERACIÓN NORMAL.....	144
5.2.3. DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS	147
5.3. MANTENIMIENTO	147
CAPÍTULO VI.....	149

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	149
6.1. CONCLUSIONES.....	149
6.2. RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación general de un tratamiento térmico.....	3
Figura 1.2. Diagrama hierro - carburo de hierro.....	4
Figura 1.3. Régimen de recocido de relajación de tensiones.....	5
Figura 1.4. Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono.....	7
Figura 1.5. Zona de calentamiento para el temple.....	9
Figura 1.6. Tiempo necesario para alcanzar en una pequeña pieza de un acero al carbono eutectoide (C=0.90%) diversos grados de austenización.....	10
Figura 1.7. Avance de la transformación de la austenita en martensita al disminuir la temperatura.....	11
Figura 1.8. Curva de enfriamiento de un cilindro de pequeño diámetro templado en agua caliente a 76°C, determinado por Pilling y Lynch.....	13
Figura 1.9. Curvas de enfriamiento correspondiente al centro de una esfera enfriada en diferentes líquidos de temple.....	14
Figura 1.10. Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de 1/2" de diámetro y 2 1/2" de largo.....	14
Figura 1.11. Representación gráfica de los diferentes métodos de temple.....	16
Figura 1.12. Esquema del temple y revenido de un acero.....	16
Figura 1.13. Horno calentado por resistencias eléctricas.....	19
Figura 1.14. Horno industrial calentado por gas.....	20
Figura 1.15. Horno industrial de atmósfera controlada.....	21
Figura 1.16. Horno de solera continua.....	22
Figura 1.17. Horno de solera discontinua.....	22
Figura 1.18. Partes de un horno.....	25
Figura 1.19. Transferencia de calor por conducción.....	27
Figura 1.20. Capa límite hidrodinámica.....	28
Figura 1.21. Capa límite térmica.....	29
Figura 1.22. Desarrollo de la capa límite hidrodinámica sobre una placa plana.....	30

Figura 1.23. Mecanismos de transferencia de calor en un horno.....	36
Figura 1.24. Recinto cerrado rectangular vertical con superficies isotérmicas.....	38
Figura 2.1. Configuración del horno.....	42
Figura 2.2. Disposición de los materiales del revestimiento.....	46
Figura 2.3. Esquema del modelo de transferencia de calor.....	48
Figura 2.4. Perfil de temperatura en las paredes del revestimiento.....	57
Figura 2.5. Configuración de la carga para calcular el factor de forma.....	62
Figura 2.6. Esquema para el cálculo del volumen.....	64
Figura 2.7. Sección transversal del horno.....	66
Figura 2.8. Relación entre la Temperatura (T) y el tiempo (t) del horno.....	71
Figura 2.9. Esquema de conexión en delta de tres resistencias a 220 V trifásico.....	75
Figura 2.10. Diagrama de bloques de un control automático para hornos de resistencia.....	81
Figura 2.11. Conexión de termocuplas en los módulos 231-5QD30-0BX0.....	84
Figura 2.12. Circuito de fuerza del horno.....	88
Figura 2.13. Circuito de control del horno.....	89
Figura 2.14. Esquema de la estructura soportante.....	90
Figura 2.15. Aplicación de la carga en SAP 2000 V17.....	91
Figura 2.16. Resultados del trabajo virtual de los elementos en SAP 2000 V17...91	
Figura 2.17. Esquema de la puerta.....	93
Figura 2.18. Esquema del eje principal en el mecanismo.....	94
Figura 2.19. Dimensionamiento de los eslabones del mecanismo.....	95
Figura 3.1. Dimensiones de la estructura metálica.....	97
Figura 3.2. Estructura metálica de un horno en condiciones de desecho.....	98
Figura 3.3. Armado de la estructura metálica.....	99
Figura 3.4. Construcción de la solera del horno.....	100
Figura 3.5. Construcción de las paredes del horno.....	101
Figura 3.6. Disposición de los ladrillos en el techo del horno.....	101
Figura 3.7. Construcción del techo del horno.....	102
Figura 3.8. Montaje del techo del horno.....	102

Figura 3.9. Paredes del ladrillo refractario.....	103
Figura 3.10. Esquema de las placas porta-resistencia.....	104
Figura 3.11. Preparación de la mezcla de Cóncrax 1500 y agua.....	104
Figura 3.12. Desmoldeo de las placas porta-resistencias.....	105
Figura 3.13. Secado de las placas porta-resistencias.....	106
Figura 3.14. Resistencias eléctricas de calentamiento.....	106
Figura 3.15. Disposición de las resistencias en las placas.....	107
Figura 3.16. Placas con las resistencias eléctricas.....	107
Figura 3.17. Montaje de la chapa metálica.....	108
Figura 3.18. Montaje de la cubierta metálica superior.....	109
Figura 3.19. Ubicación de tubos cerámicos para los terminales de las conexiones eléctricas de las resistencias	109
Figura 3.20. Instalación de las placas con las resistencias en la cámara del horno.....	110
Figura 3.21. Diseño de la puerta y ubicación de la fibra cerámica.....	111
Figura 3.22. Montaje de la puerta y su mecanismo.....	112
Figura 3.23. Instalación de la caja de elementos de regulación.....	112
Figura 3.24. Ubicación de la termocupla.....	113
Figura 3.25. Horno con todos sus componentes instalados.....	113
Figura 4.1. Variación de la temperatura con el tiempo durante la prueba de vacío.....	117
Figura 4.2. Creación de vectores en Matlab.....	121
Figura 4.3. Ventana del Toolbox de Matlab al ejecutar el comando ident.....	122
Figura 4.4. Diferentes modelos del comportamiento del horno.....	122
Figura 4.5. Función de transferencia para el modelo de dos polos.....	123
Figura 4.6. Programa para calcular las constantes del controlador PID según la regla de Ziegler-Nichols.....	125
Figura 4.7. Determinación gráfica de los valores L_T, τ	126
Figura 4.8. Arquitectura del control PID y el horno.....	126
Figura 4.9. Arquitectura del control PID del horno con valores de las funciones de transferencia.....	127
Figura 4.10. Función de transferencia del conjunto controlador-horno.....	127

Figura 4.11. Respuesta a una función escalón unitaria del sistema Horno-controlador.....	128
Figura 4.12. Interior de la cámara durante la prueba en vacío.....	129
Figura 4.13. Régimen teórico de recocido del acero AISI 1045.....	130
Figura 4.14. Recocido Acero AISI 1045.....	130
Figura 4.15. Régimen de temple acero AISI 1045.....	131
Figura 4.16. Régimen real del temple.....	132
Figura 4.17. Revenido acero AISI 1045.....	133
Figura 4.18. Régimen teórico de temple acero STAVAX (AISI 420).....	134
Figura 4.19. Preparación de las probetas de acero STAVAX.....	134
Figura 4.20. Régimen real temple acero STAVAX.....	135
Figura 4.21. Tratamiento del acero STAVAX (AISI 420).....	135
Figura 4.22. Metalografía del acero AISI 1045, probeta testigo, Nital 2%, a) 100 X b) 500 X.....	136
Figura 4.23. Metalografía del acero AISI 1045, probeta templada, Nital 2%, a) 100 X b) 500 X.....	136
Figura 4.24. Metalografía del acero AISI 1045, probeta de recocido completo, Nital 2%, a) 100 X b) 500 X.....	137
Figura 5.1. Componentes del horno.....	142
Figura 5.2. Ubicación del selector de encendido.....	144
Figura 5.3. Interfaz de usuario del software de control.....	145
Figura 5.4. Interfaz mostrando el Tratamiento Finalizado.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de Recocidos.....	6
Tabla 1.2. Tipos de temple.....	15
Tabla 2.1. Propiedades de los materiales del revestimiento.....	45
Tabla 2.2. Dimensiones y propiedades de los materiales.....	54
Tabla 2.3. Cálculo del calor perdido por conducción.....	55
Tabla 2.4. Temperaturas Calculadas.....	56
Tabla 2.5. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento.....	64
Tabla 2.6. Cálculo del calor transmitido a la cámara y a la carga.....	65
Tabla 4.1. Datos de la prueba en vacío.....	115
Tabla 4.2. Comportamiento del horno.....	118
Tabla 4.3. Velocidad de calentamiento promedio.....	120
Tabla 4.4. Valores de las constantes para el controlador PID.....	126
Tabla 4.5. Régimen de recocido del Acero AISI 1045.....	129
Tabla 4.6. Régimen del temple del Acero AISI 1045.....	131
Tabla 4.7. Régimen del revenido del Acero AISI 1045.....	132
Tabla 4.8. Régimen de temple del Acero STAVAX (AISI 420).....	133
Tabla 4.9. Durezas del acero AISI 1045, recocido completo.....	137
Tabla 4.10. Durezas del acero AISI 1045, Temple.....	138
Tabla 4.11. Durezas del acero STAVAX (AISI 420), Testigo.....	138
Tabla 4.12. Dureza del acero STAVAX (AISI 420), Temple.....	138
Tabla 6.1. Dimensiones del Horno.....	143
Tabla 6.2. Especificaciones Generales del Horno.....	143
Tabla 6.3. Especificaciones Eléctricas del Horno.....	144

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de propiedades del aire seco a presión atmosférica.....	156
ANEXO 2. Cálculos de potencia en circuitos trifásicos.....	157
ANEXO 3. Propiedades de las aleaciones de Kanthal.....	158
ANEXO 4. Carga superficial del horno para el Kanthal A-1.....	159
ANEXO 5. Carga superficial del elemento de resistencia (Kanthal A-1).....	160
ANEXO 6. Coeficiente de temperatura para el Kanthal A-1.....	161
ANEXO 7. Relaciones para determinar el diámetro de alambre para resistencia eléctrica.....	162
ANEXO 8. Características técnicas del alambre MIG/MAG de Indura.....	164
ANEXO 9. Características técnicas de Fusibles.....	165
ANEXO 10. Características técnicas de contactores trifásicos.....	167
ANEXO 11. Características técnicas de luces piloto, botoneras y selectores de mando.....	170
ANEXO 12. Características técnicas de Relé 120V.....	173
ANEXO 13. Características técnicas de interruptores termo magnéticos.....	176
ANEXO 14. Guía técnica para la selección de cable para las conexiones eléctricas.....	177
ANEXO 15. Guía para la selección de termopares.....	179
ANEXO 16. Características técnicas del PLC Simatic 7 1200.....	180
ANEXO 17. Propiedades del acero AISI 420.....	184
ANEXO 18. Resultados del protocolo de pruebas.....	170

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
AT	Alta temperatura	-
g	Aceleración de la gravedad	$[m/s^2]$
h	Altura de la pared del compuesta del revestimiento	$[m]$
H	Altura del recinto cerrado	$[m]$
w	Ancho de la pared del compuesta del revestimiento	$[m]$
A_c	Área de convección	$[m^2]$
A_{cr}	Área de convección-radiación	$[m^2]$
A_i	Área de la cámara interior	$[m^2]$
A_r	Área de radiación	$[m^2]$
A_e	Área exterior del horno	$[m^2]$
A_x	Área normal a la dirección x	$[m^2]$
A	Área normal al flujo de calor	$[m^2]$
A_m	Área promedio de transferencia de calor	$[m^2]$
A_{sc}	Área superficial de la carga	$[m^2]$
A_{sr}	Área superficial radiante	$[m^2]$
Q_{acc2}	Calor acumulado en la cámara y a la carga	$[J]$
Q_{acc1}	Calor acumulado en las paredes del revestimiento	$[J]$
Q	Calor disipado	$[J]$
C_p	Calor específico a presión constante	$[J/kg.K]$
C_{p_i}	Calor específico a presión constante de cada uno de los materiales.	$[J/kg.K]$
C_{p_c}	Calor específico a presión constante de la cámara	$[J/kg.K]$
Q_{gen}	Calor generado por la potencia eléctrica	$[W]$
Q_2	Calor perdido a través de la pared horizontal inferior	$[W]$
Q_3	Calor perdido a través de las pared horizontal superior	$[W]$
Q_1	Calor perdido a través de las paredes verticales	$[W]$
Q_{acc}	Calor total acumulado en las paredes del revestimiento y la cámara	$[J]$
Q_k	Calor total perdido a través de las paredes del revestimiento	$[W]$
Q_r	Calor transmitido a la carga	$[W]$
p	Carga específica del elemento del elemento calefactor	$[W/cm^2]$
cm^2/Ω	Carga térmica de la resistencia	$[cm^2/\Omega]$
β	Coeficiente de expansión volumétrica	$[1/K]$
C_t	Coeficiente de temperatura	-
h_c	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$[W/ m^2.K]$
h_r	Coeficiente de transferencia de calor por radiación	$[W/ m^2.K]$
h_{cr}	Coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación	$[W/ m^2.K]$
k_i	Conductividad térmica media de cada capa de revestimiento	$[W/ m.K]$

Símbolo	Descripción	Unidades
	del horno.	
k_1	Conductividad de la capa de Cóncrax	[W/ m.K]
k_2	Conductividad de la capa de Ladrillo Refractario	[W/ m.K]
k_3	Conductividad de la capa de Fibrocemento	[W/ m.K]
k_4	Conductividad de la capa de Aire Libre	[W/ m.K]
k_5	Conductividad de la capa de Plancha de Acero	[W/ m.K]
k_{fc}	Conductividad de la fibra cerámica	[W/ m.K]
k	Conductividad térmica	[W/ m.K]
k_{ef}	Conductividad térmica efectiva	[W/ m.K]
σ	Constante de Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
Td	Constante de factor de amortiguamiento	-
Ti	Constante de ganancia integral	-
Kp	Constante de ganancia proporcional	-
τ	Constante de tiempo	-
KM1	Contactador trifásico	-
ρ	Densidad	[g/cm ³]
ρ_i	Densidad de cada material	[g/cm ³]
ρ_c	Densidad de la cámara	[g/cm ³]
d	Diámetro del alambre de la resistencia	[mm]
D	Diámetro de las espiras	[mm]
d_e	Diámetro del eje	[cm]
α	Difusividad térmica	[m ² /s]
x	Distancia desde el borde de ataque del flujo	[m]
L_c	Distancia entre las superficies caliente y fría	[m]
η	Eficiencia del horno	[%]
ε	Emisividad	-
ε_c	Emisividad de la carga	-
ε_p	Emisividad de la pared	-
$q_{1\leftrightarrow 2}$	Energía de intercambio entre dos superficies negras	[W]
E	Error de temperatura	[°C]
τ_c	Esfuerzo cortante	-
L_i	Espesor de cada capa de revestimiento del horno.	[m]
L_1	Espesor de la capa de Cóncrax	[m]
L_2	Espesor de la capa de Ladrillo Refractario	[m]
L_3	Espesor de la capa de Fibrocemento	[m]
L_4	Espesor de la capa de Aire Libre	[m]
L_5	Espesor de la Plancha de Acero	[m]
δ_h	Espesor de la capa límite hidrodinámica	[m]
δ_t	Espesor de la capa límite térmica	[m]
L_{fc}	Espesor de la fibra cerámica	[m]
e	Espesor de la pared compuesta del revestimiento	[m]

Símbolo	Descripción	Unidades
D	Factor de amortiguamiento	-
F	Factor de forma geométrica en radiación	-
L1	Fase 1	-
L2	Fase 2	-
L3	Fase 3	-
\dot{Q}_{sal}	Flujo de calor externo	[W]
\dot{Q}_{in}	Flujo de calor interno	[W]
\dot{Q}_{acc}	Flujo de calor necesario para calentar paredes, cámara y carga.	[W]
q_k	Flujo de calor perdido por conducción.	[W/m ²]
q_{cr}	Flujo de calor perdido por convección y radiación.	[W/m ²]
FT	Función de transferencia	-
k	Ganancia del proceso	-
I	Ganancia integral	-
P	Ganancia proporcional	-
Q	Guardamotor con relé térmico	-
I_c	Intensidad de corriente a través del elemento calefactor.	[A]
I_p	Intensidad de corriente de que pasa por cada resistencia.	[A]
I_L	Intensidad de corriente en cada línea	[A]
l	Largo de la pared del revestimiento	[m]
TA _m	Línea de pérdida de solubilidad de la austenita.	-
TA ₁	Línea de reacción eutectoide	-
TA ₃	Línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita.	-
L	Longitud	[m]
L_c	Longitud Característica	[m]
L_w	Longitud de la espira comprimida	[m]
L_e	Longitud de la espira extendida	[m]
L_R	Longitud de la resistencia	[m]
L_T	Longitud total del alambre	[m]
NA	Normalmente Abiertos	-
NC	Normalmente Cerrado	-
N	Número de espiras	-
Nu	Número de Nusselt	-
Pr	Número de Prandtl	-
Ra	Número de Rayleigh	-
Re	Número de Reynolds	-
s	Paso entre espiras	[mm]
W_p	Peso de la puerta	[kg]
P_d	Potencia disipada por el conductor	[W]
P	Potencia Eléctrica	[W]
P_t	Potencia total del horno	[W]

Símbolo	Descripción	Unidades
E_b	Radiación emitida por cada cuerpo	[W/m ²]
q_x	Razón de flujo de calor en la dirección de las x	[W/m ²]
Q_k	Razón de flujo de calor por conducción (transitorio)	[W]
Q_r	Razón de flujo de calor por radiación (transitorio)	[W]
q	Razón de transferencia de calor	[W/m ²]
F1	Relé térmico	-
R_1	Resistencia calefactora 1	[Ω]
R_2	Resistencia calefactora 2	[Ω]
R_3	Resistencia calefactora 3	[Ω]
R_t	Resistencia del elemento calefactor a cierta temperatura	[Ω]
R_{20}	Resistencia del elemento calefactor a la temperatura de 20°C	[Ω]
R	Resistencia del elemento calefactor.	[Ω]
R_{k4}	Resistencia Térmica de conducción de la capa de Aire Libre.	[W/K.m]
R_{k1}	Resistencia Térmica de conducción de la placa de Cóncrax.	[W/K.m]
R_{k5}	Resistencia Térmica de conducción de la Plancha de Acero.	[W/K.m]
R_{k3}	Resistencia Térmica de conducción de la plancha de Fibrocemento.	[W/K.m]
R_{k2}	Resistencia Térmica de conducción del Ladrillo Refractario.	[W/K.m]
R_c	Resistencia Térmica de convección entre la superficie exterior y el ambiente.	[W/K.m]
R_r	Resistencia Térmica de radiación de la superficie exterior hacia el ambiente.	[W/K.m]
ρ_R	Resistividad del material independiente de la temperatura	[$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]
L_T	Retardo de tiempo	[ms]
u	Salida del controlador	-
$U(s)$	Señal de entrada	-
$E(s)$	Señal de salida (respuesta a la señal de entrada)	-
A_h	Superficie radiante	[m ²]
T	Temperatura	[°C]
$T_{\infty e}/T_{amb}$	Temperatura Ambiente	[°C]
T_{cal}	Temperatura de calentamiento	[°C]
M_s	Temperatura de inicio de la transformación martensítica	[°C]
T_c	Temperatura de la cámara	[°C]
T_{ca}	Temperatura de la carga	[°C]
T_p	Temperatura de la pared	[°C]
T_i	Temperatura de la pared radiante	[°C]
T_s	Temperatura del horno fijada	[°C]
T_{alr}	Temperatura de la superficie isotérmica	[°C]
M_f	Temperatura del final de la transformación martensítica	[°C]
T_{∞}	Temperatura del fluido / Temperatura del flujo libre	[°C]
T_o	Temperatura del horno medida	[°C]

Símbolo	Descripción	Unidades
$T_{\infty i}$	Temperatura del interior de la cámara	[°C]
T_{cc}	Temperatura en la cara caliente para cada material.	[°C]
T_{cf}	Temperatura en la cara fría para cada material.	[°C]
T_3	Temperatura en la intercara entre el Fibrocemento y la capa de Aire Libre.	[°C]
T_2	Temperatura en la intercara entre el Ladrillo Refractario y el Fibrocemento.	[°C]
T_4	Temperatura en la intercara entre la capa de Aire Libre y la Plancha de Acero	[°C]
T_1	Temperatura en la intercara entre la placa de Cóncrax y el Ladrillo Refractario.	[°C]
$T_{\infty e}$	Temperatura exterior del ambiente.	[°C]
T_f	Temperatura fijada	[°C]
T_{max}	Temperatura máxima	[°C]
T_{maxQ}	Temperatura máxima de la ciudad de Quito	[°C]
T_{minQ}	Temperatura mínima de la ciudad de Quito	[°C]
T_p	Temperatura promedio	[°C]
T_{sea}	Temperatura superficial exterior asumida	[°C]
T_{sec}	Temperatura superficial exterior calculada	[°C]
T_{se}	Temperatura superficial exterior del revestimiento.	[°C]
T_{si}	Temperatura superficial interior del revestimiento.	[°C]
T_1, T_2	Temperaturas de los lados caliente y frío de la capa	[°C]
t	Tiempo	[s]
t_c	Tiempo de calentamiento	[s]
t_e	Tiempo de enfriamiento	[s]
d	Tiempo de inactividad o tiempo muerto	[s]
t_p	Tiempo de permanencia	[s]
V	Velocidad (temperatura)	[°C/s]
V_{cal}	Velocidad de calentamiento	[°C/s]
V_{enf}	Velocidad de enfriamiento	[°C/s]
U	Velocidad del fluido	[m/s]
U_{∞}	Velocidad del flujo libre	[m/s]
μ	Viscosidad absoluta del fluido	[N.s/m ²]
ν	Viscosidad cinemática del fluido	[m ² /s]
V_L	Voltaje entre fases	[V]
V_c	Volumen de la cámara	[m ³]
V_i	Volumen que ocupa cada material.	[m ³]

RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo diseñar y construir un horno calentado por resistencias eléctricas para que trabaje en un rango de temperaturas entre 1000 °C y 1350 °C y controlado por un sistema computarizado para el laboratorio de tratamientos térmicos de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

El proyecto se lleva a cabo por la necesidad de disponer en el laboratorio de un horno que opere en un rango de temperatura mayor a lo que se alcanza con los hornos que actualmente se encuentran en el laboratorio cuyo límite de operación no supera los 900 °C, por lo tanto no se pueden tratar térmicamente a los aceros especiales para los cuales la temperatura de cambio de fase supera esta el valor mencionado.

El proyecto se realizó con consultas en textos, folletos técnicos y referencias de internet acerca de temas afines tales como tratamientos térmicos, diseño de hornos industriales calentados por resistencia, automatización con énfasis en el control de temperatura, refractarios y transferencia de calor en hornos.

En el primer capítulo se hace un resumen de los procesos de tratamientos térmicos más comunes aplicados a los metales principalmente ferrosos, también se encuentra información sobre los tipos de hornos industriales para realizar tratamientos térmicos, especialmente se trata sobre los hornos calentados por resistencia eléctrica, además de un resumen sobre la transferencia de calor en hornos donde se obtiene las relaciones que describen cada uno de los mecanismos de transferencia de calor y las que serán utilizadas posteriormente en el diseño del horno.

En el segundo capítulo se plantean los parámetros de diseño, se encontrará información técnica de las propiedades de los materiales refractarios seleccionados para el diseño térmico del horno y se muestra el método de cálculo con las consideraciones para determinar el espesor de cada una de las capas de

la pared compuesta, en función de lo calculado en el estado estable se hace un análisis del estado transitorio para obtener la respuesta del sistema, a continuación se aplican los conceptos de transferencia de calor para determinar la potencia total requerida para efectuar el cálculo y selección de las resistencias eléctricas, posteriormente se presenta una introducción al control automático y se realiza la selección de los elementos de protección y regulación para los sistemas eléctrico y de control en base a un criterio técnico de acuerdo a información técnica y referencias de temas afines sobre control de temperatura en hornos calentados por resistencias; finalmente se efectúa el análisis de fiabilidad de la estructura soporte del horno y el diseño del mecanismo de la puerta.

El tercer capítulo contiene todo lo referente a la construcción de cada uno de los componentes principales del horno para llevar a cabo el proceso se divide en varios procesos en los cuales cada uno se relaciona con una parte importante del horno a saber: la estructura metálica principal, las paredes del revestimiento, las placas porta-resistencia y las resistencias, la puerta y la cubierta metálica. Un importante punto en este capítulo a revisar es el proceso desarrollado para la elaboración de las placas porta-resistencia con cemento refractario en moldes de acrílico, el proceso es de autoría propia que se logró obtener luego de hacer varias pruebas.

En el cuarto capítulo se efectúa la prueba en vacío y a máxima potencia para obtener datos reales de temperatura y tiempo del comportamiento dinámico del horno, con los datos obtenidos y mediante el uso del toolbox de Matlab se determinan las constantes del control PID, una vez instalado y programado el control automático se realizan las pruebas experimentales de acuerdo a las especificaciones técnicas y a las prácticas de laboratorio que se llevan cabo en la materia de tratamientos térmicos; para las pruebas se utilizaron probetas de acero AISI 1045 y AISI 420, al final de cada prueba se muestran los ensayos de dureza y metalografías para el acero AISI 1045 con el objetivo de comprobar el cambio obtenido luego del tratamiento, finalmente al concluir el capítulo se presenta el análisis de resultados sobre el proyecto realizado.

En el quinto capítulo se detalla el manual técnico de operación y mantenimiento, en este se indican las partes principales del horno, el manejo correcto de la interfaz para el control de la temperatura y recomendaciones generales para el mantenimiento de los elementos que pueden llegar a deteriorarse con el uso.

En el sexto capítulo se especifican las conclusiones y recomendaciones obtenidas de este proyecto, en las que se señalan los objetivos alcanzados y las características obtenidas del horno, además en las recomendaciones se destacan principalmente los cuidados que se deben tener durante la construcción de las partes principales del horno así como durante su operación.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de los tratamientos térmicos en materiales metálicos o sus aleaciones permite lograr la transformación de las estructuras y fases constituyentes, con el objeto de mejorar determinadas propiedades en el desempeño de un elemento. Dependiendo de las características de cada material las transformaciones se producen a mayores o menores rangos de temperatura, velocidades de calentamiento, tiempos de permanencia y velocidades de enfriamiento; por este motivo, es necesaria la disponibilidad de un dispositivo que además de alcanzar estos rangos de transformación, permita controlar el régimen del proceso de una manera eficaz y automática.

El laboratorio de tratamientos térmicos cuenta con hornos cuya temperatura de trabajo máxima no supera los 900°C, debido a esto, no se pueden tratar aleaciones de amplia aplicación industrial tales como aceros rápidos, aceros para herramientas o aceros para moldes de inyección plástica, en consecuencia, se hace necesaria la implementación de un horno que alcance las temperaturas de transformación requeridas en el tratamiento de este tipo materiales.

Adicionalmente, en el laboratorio se pretende automatizar todos los hornos disponibles para poder realizar un control global de los procesos, tanto en los trabajos para el medio externo como en las prácticas que se llevan a cabo dentro del mismo. Mediante la automatización de los hornos se facilita la experimentación, se aumenta la eficiencia de los procesos, se logran resultados óptimos y se cuenta con una memoria digital que permite manejar fácil y estadísticamente los datos obtenidos.

En el presente trabajo se diseñará y construirá un horno calentado por resistencias eléctricas que alcance las temperaturas antes mencionadas, en el que se instalará un sistema automático de control.

Se pretende que este dispositivo colabore en el trabajo de experimentación del laboratorio de tratamientos térmicos y facilite la investigación en general, aportando de forma directa al desarrollo de la industria ecuatoriana.

1.2. TRATAMIENTO TÉRMICO

Es un conjunto de operaciones de calentamiento, permanencia a una temperatura determinada y enfriamiento de manera controlada con el objeto de producir una variación en las propiedades y estructura de los materiales, generalmente en metales y sus aleaciones, con o sin modificar la forma y composición química superficial. Los cambios producidos deben ser permanentes, es decir, deben ocurrir variaciones estables debidas a transformaciones de fase. (Avner, 1988)

1.2.1. RÉGIMEN DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Cualquier proceso de tratamiento térmico puede describirse en un gráfico de coordenadas tiempo-temperatura y controlarse mediante un régimen que consiste en cuatro parámetros principales, la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento.

1.2.1.1. Temperatura de calentamiento

Es la temperatura máxima determinada a la que se calienta el material y que asegura la transformación de fase.

1.2.1.2. Tiempo de permanencia

Es el tiempo que se mantiene el material a la temperatura de calentamiento, durante este tiempo se logra la transformación total o parcial de la microestructura de la aleación, se homogeniza la composición química granular y se uniformiza la temperatura de todo el material.

1.2.1.3. Velocidad de calentamiento

Es el aumento de la temperatura del material en un determinado intervalo de tiempo, esta velocidad debe ser controlada de tal manera que no se produzcan microfisuras debido a la dilatación térmica.

1.2.1.4. Velocidad de enfriamiento

Es la disminución de la temperatura del material en un determinado intervalo de tiempo, de este parámetro dependen las características finales de la aleación.

La velocidad V de calentamiento o enfriamiento puede obtenerse como la derivada de la temperatura T respecto al tiempo t .

$$V = \frac{dT}{dt}$$

Para fines prácticos es suficiente considerar un valor medio de la velocidad de calentamiento o enfriamiento.

$$V_e = \frac{T_{cal}}{t_e}$$

$$V_c = \frac{T_{cal}}{t_c}$$

donde t , es el tiempo de calentamiento o enfriamiento respectivamente.

Si la variación de la temperatura durante el calentamiento o el enfriamiento es uniforme sin cambios bruscos, la velocidad de calentamiento o enfriamiento se representa de una forma aproximada mediante una línea con determinada inclinación en el diagrama t - T , como indica la figura 1.1.

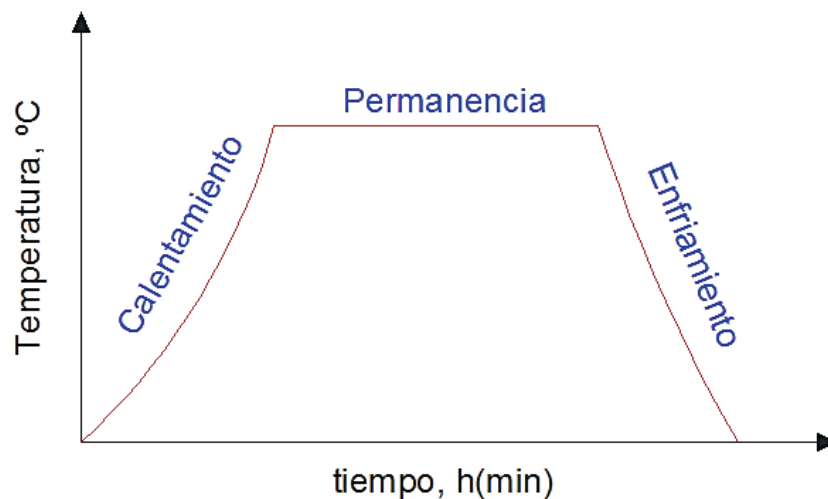


Figura 1.1. Representación general de un tratamiento térmico.

Entonces queda claro que todo proceso de tratamiento térmico puede representarse en un diagrama Temperatura-tiempo. (Ruiz, 2007)

1.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos pueden realizarse en general a metales y sus aleaciones, sin embargo, las definiciones tratadas posteriormente corresponden a los aceros y demás aleaciones ferrosas, por este motivo para la clasificación se analizará el diagrama hierro- carburo de hierro mostrado en la figura 1.2.

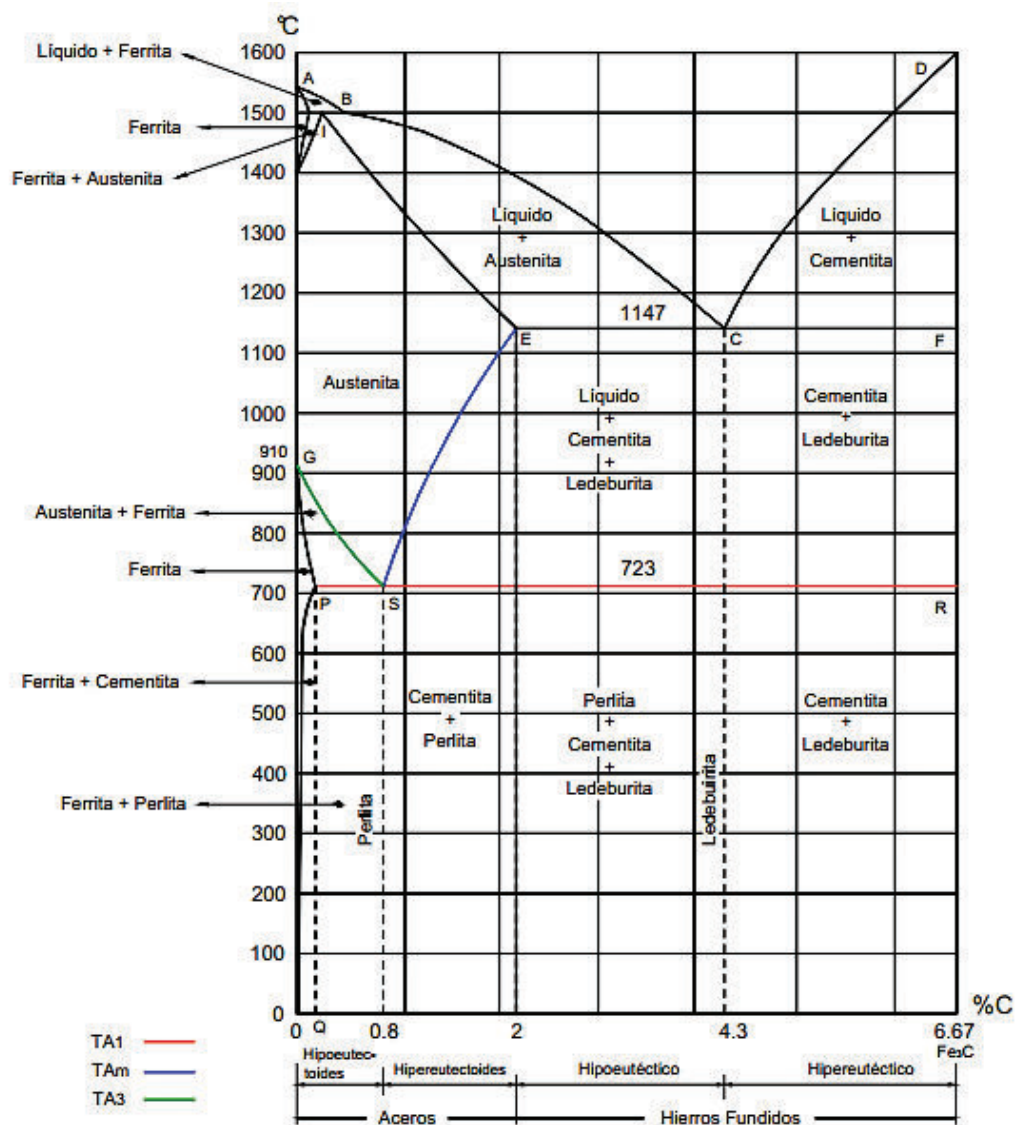


Figura 1.2. Diagrama hierro - carburo de hierro. (Avner, 1988)

A las líneas de transformaciones de fase se le asignarán las siguientes nomenclaturas:

- TA_1 (Ac_1 ó Ar_1): Línea de la reacción eutectoide.

- TA_m (Ac_m ó Ar_m): Línea de pérdida de solubilidad de la austenita.

- TA_3 (Ac_3 ó Ar_3): Línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita.

En general se tienen cuatro tipos de tratamientos térmicos que son el Recocido Normalizado, Temple y Revenido.

1.2.2.1. Recocido

Consiste en calentar el material a una temperatura determinada, mantenerlo a esa temperatura por un período de tiempo y luego enfriarlo lentamente durante el intervalo de transformación, preferentemente dentro del horno o en un medio aislado.

El recocido se refiere a un grupo amplio de tratamientos térmicos que tienen como propósito aliviar tensiones generadas por un proceso previo, reducir la dureza, aumentar la ductilidad, homogenizar y refinar la estructura del grano.

En la figura 1.3 se observa el régimen de tratamiento térmico para un recocido de relajación de tensiones aplicado en un material conformado por proceso de forja.

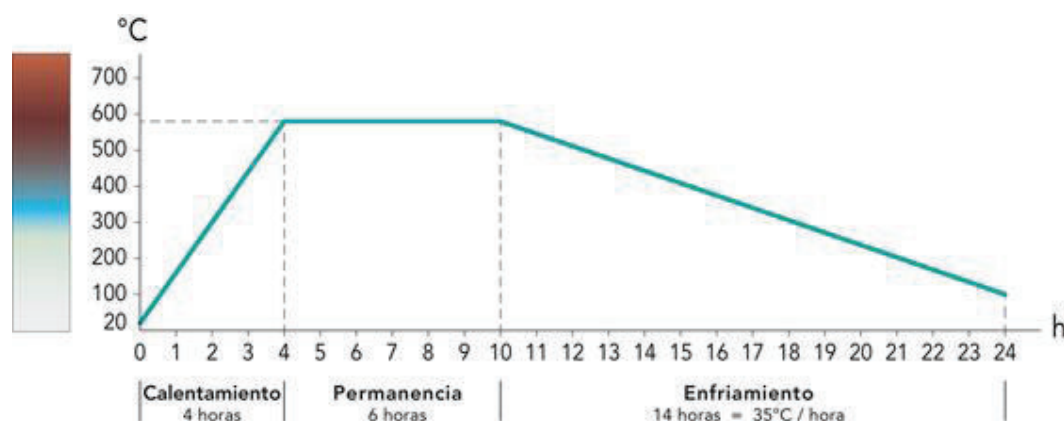


Figura 1.3. Régimen de recocido de relajación de tensiones.

(<http://www.meusburger.com/es/empresa/calidad/recocido-de-estabilizacion.html>)

En la Tabla 1.1 se presentan los tipos de recocido, con las variables involucradas y su uso general.

Tabla 1.1. Tipos de Recocidos

RECOCIDOS					
	Características	V _c [°C/h]	T _c [°C]	t _p [h]	V _e [°C/h]
Difusivo	Reduce la heterogeneidad química de los lingotes de acero y elimina las segregaciones dendríticas y tensiones internas.	100-150	1000-1150	8-15	100-200
Completo	Se aplica solamente en aceros hipoeutectoides trabajados en caliente para afinar el grano y reducir tensiones internas	100-150	TA3+30° o 50°	1/4 t _c	100-200
Incompleto	Se aplica solamente en aceros hipereutectoides, para reducir la dureza, elevar la plasticidad y la maquinabilidad.	100-150	TA1+30° o 50°<T _{Am}	1/4 t _c	100-200
Isotérmico	Reduce la dureza y mejora la maquinabilidad.	100-150	Hipoeutectoides TA3+30° o 50° Hipereutectoides TA1+30° o 50°<T _{Am}	1/4 t _c	Se enfría lentamente en un baño de sales hasta T>TA1, posteriormente al aire.
Esferoidizante	Se produce la transformación a perlita granular esferoidizada a partir de perlita laminar, mejorando la maquinabilidad.	100-150	T _c >TA1	1/4 t _c	Se enfría inicialmente a 780°C y después hasta 550°C-600°C, en adelante al aire.
Recristalizante	Elimina el endurecimiento por deformación en frío, por procesos como laminado en frío, estampado, embutido, etc.	100-150	T _c >TA1	1/4 t _c	100-200
Relajante	Elimina tensiones internas producto de procesos de fundición, forja, soldadura y mecanizados.	100-150	550-600	1-2	100-200

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, T_e=Tiempo de enfriamiento

1.2.2.2. Normalizado

El normalizado es un tratamiento térmico que consta de tres etapas; la primera etapa consiste en calentar el material entre 30° a 50°C por encima de las líneas de temperatura crítica superior TA_m ó TA_3 , mostradas en la figura 1.4, para aceros hipereutectoides o hipoeutectoides respectivamente; la segunda etapa consiste en mantener a esa temperatura por un período de tiempo con el fin de homogenizar la austenita; la etapa final consiste en enfriar el material en aire quieto hasta la temperatura ambiente, este tratamiento térmico es solamente aplicable a las aleaciones ferrosas.

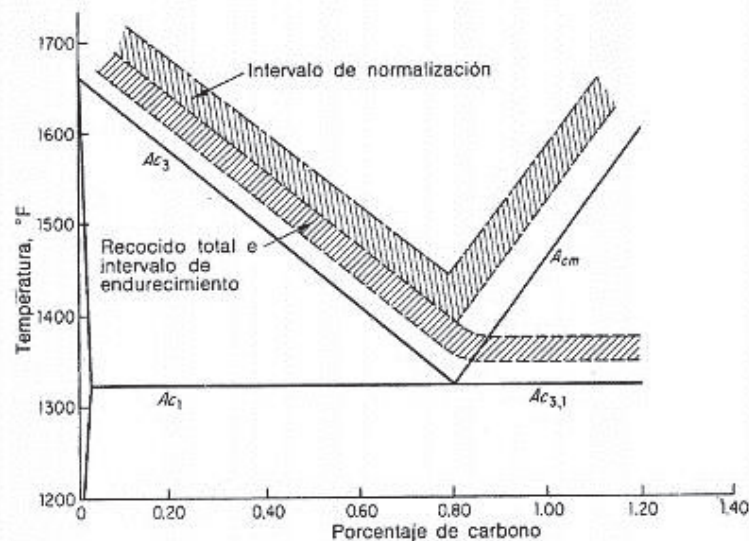


Figura 1.4. Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono. (Avner, 1988)

La normalización se emplea para afinar la estructura de grano grueso, mejorar la maquinabilidad y las propiedades antes del temple; durante el normalizado se reducen las tensiones internas y tiene lugar la recristalización del acero que afina la estructura de grano en uniones soldadas y piezas formadas o fundidas; la normalización del acero en comparación con el recocido es un tratamiento térmico más corto, y como consecuencia de mayor rendimiento.

1.2.2.3. Temple

Es un tratamiento térmico que consiste en calentar el acero sobre una temperatura de transición similar a los procesos de recocido y normalizado, mantenerlo a esta temperatura por un tiempo determinado y posteriormente enfriarlo en un medio tal que permita superar el valor mínimo de velocidad de enfriamiento, de tal manera que se produzca la formación de martensita sin una estructura perlítica intermedia, esta velocidad mínima de enfriamiento se conoce como la velocidad crítica de enfriamiento.

Cuando el acero es calentado por sobre la temperatura de austenización y enfriado lo suficientemente rápido, los átomos de carbono no tienen tiempo para reposicionarse y volver a formar la estructura inicial desde la austenita como sucede durante el recocido, es decir, se impide la formación de la perlita; como resultado se obtiene una fase dura y frágil llamada martensita con una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT).

Luego del endurecimiento no toda la austenita se transforma en martensita, siempre queda un residuo presente en la estructura, llamado austenita retenida o residual. La cantidad de austenita retenida aumenta con el incremento del contenido carbono de la aleación, la elevada temperatura, largos tiempos de inmersión y la velocidad de enfriamiento.

La estructura luego del temple contiene tensiones internas que pueden fácilmente agrietar el material, esto se puede contrarrestar al recalentar el acero a cierta temperatura reduciendo las tensiones y transformando la austenita retenida en una medida que depende de la temperatura de recalentamiento, a este proceso se lo conoce como revenido, mismo que será tratado más adelante en esta sección.

Temperatura de calentamiento en el temple

Las temperaturas de calentamiento son las mismas que se determinan para los procesos de revenido y normalizado, es decir, se debe alcanzar el rango de transformación austenítica, sin excederlo demasiado porque se produciría un grano muy grande que es origen de fatiga.

El calentamiento debe ser lento con un incremento gradual de la temperatura, solo unos cuantos grados por minuto, con el fin de evitar los esfuerzos que se generan producto de distorsiones durante el tratamiento térmico, por este motivo, el incremento de temperatura se lo debe hacer por etapas, parando el proceso a ciertas temperaturas, comúnmente llamadas etapas de precalentamiento, la razón de esto es igualar las temperaturas entre la superficie y el centro de las piezas.

Los valores típicos para las temperaturas de precalentamiento en aceros son 600°a 650°C y 800°a 850°C; para el caso de piezas grandes con geometría compleja es necesaria una tercera etapa de precalentamiento cerca de la temperatura de austenización. (Barreiro, 1984)

En general en el temple la temperatura final de calentamiento se eleva entre 40°C a 60°C por encima de la temperatura de transición TA3 ó TA1, como se muestra en la figura 1.5.

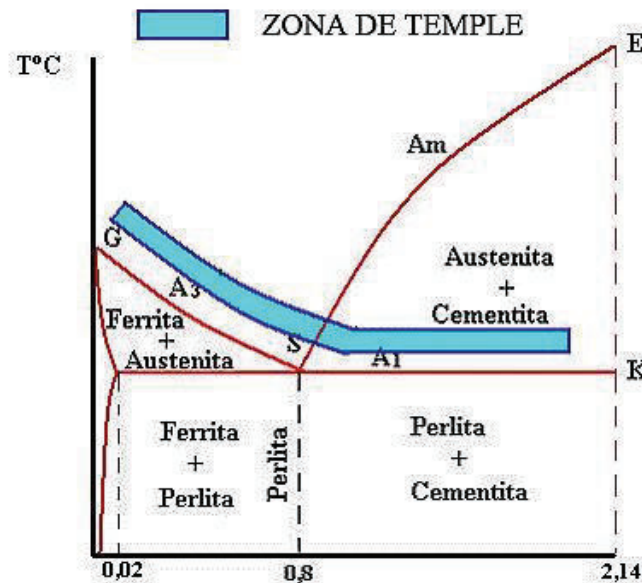


Figura 1.5. Zona de calentamiento para el temple.

(http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4911/html/4_temple.html)

Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia debe ser lo suficientemente largo para que la carga alcance la temperatura del horno, pero no excesivo porque el grano austenítico empieza a crecer, lo que origina problemas y representa un desperdicio de energía y dinero.

Con la permanencia se logra la homogeneización de la austenita, este tiempo depende de varios factores como son el tipo de horno, la temperatura de calentamiento para el temple, el peso de la carga en relación con el tamaño del horno, la geometría de las diferentes partes de la carga, entre otros; por este motivo, es difícil hacer una recomendación generalizada respecto al tiempo de permanencia para cada caso de calentamiento.

La permanencia comienza cuando se alcanza la temperatura de calentamiento sobre toda la pieza incluso en su centro, en general la permanencia debe ser equivalente a un quinto del tiempo de calentamiento (Ruiz, 2007). En la figura 1.6 se observa la influencia del tiempo y la temperatura en la austenización de una pequeña pieza de un acero eutectoide.

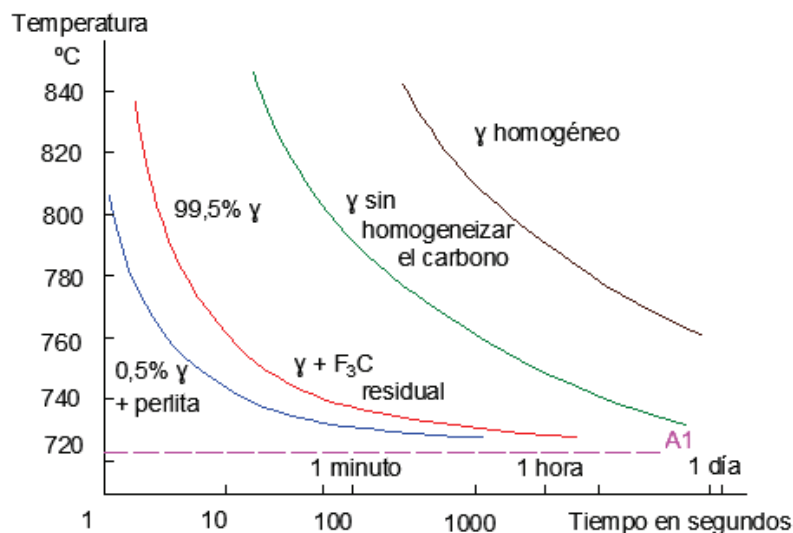


Figura 1.6. Tiempo necesario para alcanzar en una pequeña pieza de un acero al carbono eutectoide (C=0.90%) diversos grados de austenización. (Barreiro, 1984)

En la práctica para un proceso de temple se recomienda un tiempo de permanencia de entre media hora y una hora por pulgada de espesor.

Transformación de la Martensita

La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa y por ello es metaestable, se obtiene por enfriamiento muy rápido de los aceros, es decir, si el enfriamiento supera la velocidad crítica luego de haberse alcanzado la austenización.

La martensita se presenta en forma de agujas y cristaliza en la red tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) en lugar de cristalizar en la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del hierro alfa, esto se debe a la deformación que produce en su red cristalina la inserción de los átomos de carbono.

Durante el proceso de transformación martensítica si se mantiene la temperatura constante, la transformación no avanza o avanza muy lentamente, pero si se desciende la temperatura la transformación vuelve a avanzar, es decir, solo ocurre durante el enfriamiento y se interrumpe si este se detiene, por lo tanto, la transformación solo depende de la disminución temperatura y es independiente del tiempo. La figura 1.7 ilustra el proceso para un acero de composición C=0,45%, Mn=0.71% Cr=0.85%, Ni=1.80%, Mo=0.22% (Barreiro, 1984).

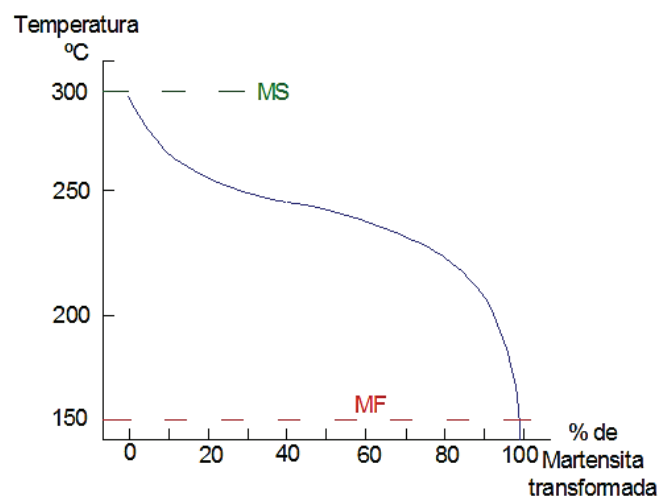


Figura 1.7. Avance de la transformación de la austenita en martensita al disminuir la temperatura. (Barreiro, 1984)

Cada acero tiene una temperatura crítica de inicio de transformación M_s , que es independiente de la velocidad de enfriamiento, la transformación martensítica aumenta con el descenso de la temperatura hasta llegar al 100% en el punto M_F que es el final de la transformación.

Las temperaturas M_s y M_F se modifican si cambia la temperatura de austenización, además los componentes aleantes del acero también modifican estas temperaturas, siendo el carbono el principal elemento que provoca un descenso de la temperatura de inicio de transformación, así como el Mn, Cr y Ni provocan un descenso de la temperatura de fin de transformación.

Velocidad de enfriamiento

La microestructura y las propiedades obtenidas luego del temple están directamente relacionadas con la velocidad de enfriamiento, se ha mencionado que su valor debe superar al de la velocidad crítica para obtener una transformación de 100% de martensita, si la velocidad es menor a la crítica la pieza no endurecerá completamente, además, es recomendable que en el intervalo de las temperaturas de inicio M_s y fin M_F de transformación, el enfriamiento sea lento para disminuir las tensiones internas generadas durante el enfriamiento brusco; durante el enfriamiento se distinguen tres etapas: la de recubrimiento de vapor, la de ebullición y la de convección – conducción; estas se muestran en la figura 1.8.

Etapas de recubrimiento de vapor

Al momento de sumergir el metal en el líquido, como su temperatura es bastante alta, se forma una capa de vapor alrededor y el enfriamiento se produce por convección y radiación a través de la fase gaseosa, el enfriamiento durante esta etapa es relativamente lento debido a la influencia de la temperatura de ebullición del líquido y su conductividad térmica.

Etapas de ebullición

Mientras la temperatura de la superficie del metal va descendiendo la película de vapor va desapareciendo, sin embargo el líquido continúa en ebullición y forma muchas burbujas alrededor del metal, las burbujas son transportadas

principalmente por convección y a medida que el vapor va desapareciendo se desprende de la superficie del metal siendo reemplazado por líquido, el calor se disipa rápidamente en forma de calor latente de vaporización; esta es la etapa de más rápido enfriamiento.

Etapa de conducción y convección

El enfriamiento lo produce el líquido por conducción y convección, se presenta generalmente por debajo de los 300°C cuando la diferencia de temperatura entre la superficie del metal y el líquido refrigerante es pequeña, esta etapa de enfriamiento se llama etapa de enfriamiento por líquido y es más lenta que las anteriores, dependiendo de la conductividad térmica del medio refrigerante y de su agitación. (Barreiro, 1984)

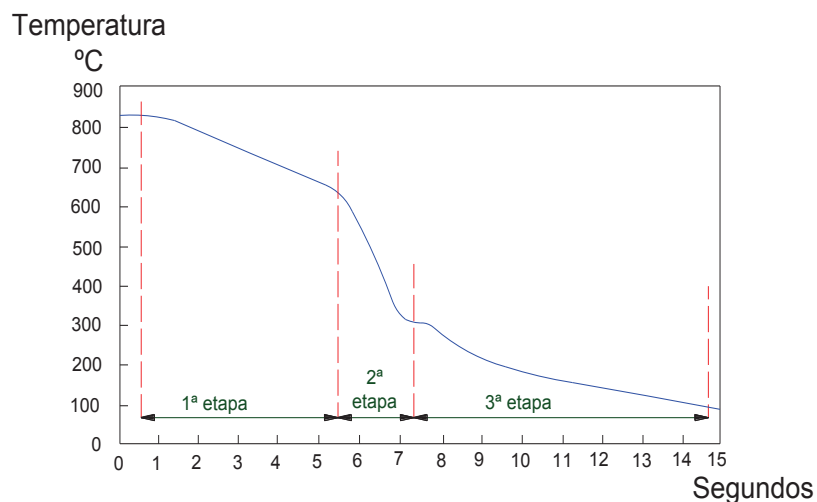


Figura 1.8. Curva de enfriamiento de un cilindro de pequeño diámetro templado en agua caliente a 76°C, determinado por Pilling y Lynch. (Barreiro, 1984)

Elección del medio del temple

Durante el temple es preciso seleccionar el medio que proporcione una velocidad de enfriamiento mayor a la crítica, en el proceso casi siempre es inevitable que se produzcan esfuerzos térmicos debido a las diferencias de temperatura, porque la superficie de la pieza se enfría más rápidamente que su centro, por lo tanto el medio seleccionado debe evitar en lo posible la aparición de grietas y deformaciones; la figura 1.9 muestra el enfriamiento en diferentes medios.

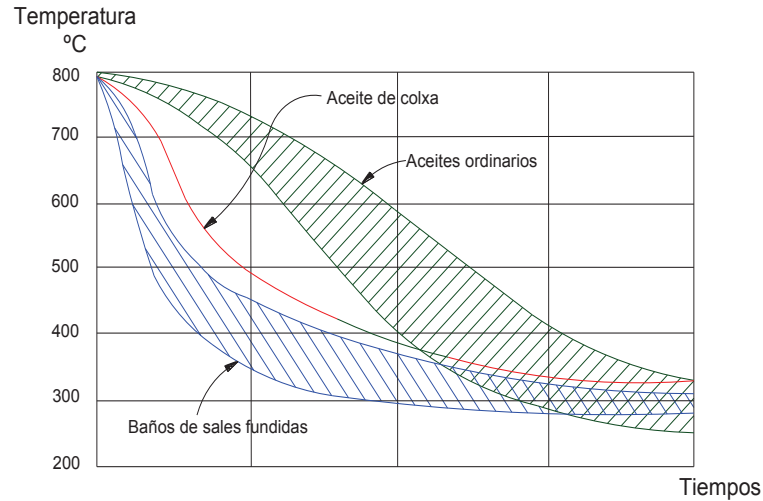


Figura 1.9. Curvas de enfriamiento correspondiente al centro de una esfera enfriada en diferentes líquidos de temple. (Barreiro, 1984)

Medios de Temple

Los medios de enfriamiento para el temple más empleados son: agua, salmuera, aire, aceite, plomo, mercurio y sales fundidas, en la actualidad existen medios de temple más variados y con el avance de las investigaciones en este campo, se han logrado templar aceros en otros medios que no constan dentro de la clasificación anterior. A continuación se muestra la figura 1.10 con las velocidades típicas de enfriamiento de varios medios de temple comúnmente utilizados en la industria.

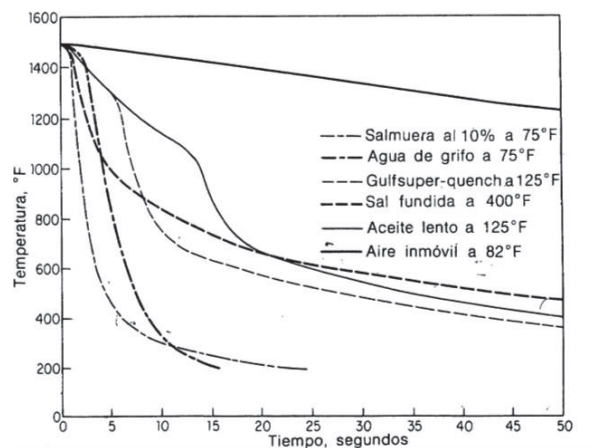


Figura 1.10. Curvas de enfriamiento obtenidas en el centro de una barra de acero inoxidable de 1/2" de diámetro y 2 1/2" de largo. (Avner, 1988)

Como en el caso del recocido, se tienen varios métodos de temple que se presentan de manera resumida en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Tipos de temple

Tipo de temple	Medio de enfriamiento	Características del temple
En un solo medio	Líquidos (agua, aceite, etc.) y aire. Con agitación	Se producen tensiones internas y grietas
Programado	Enfriamiento en agua hasta una $T > M_s$ y luego en aceite o aire hasta T_{amb} .	Disminuir tensiones internas en la transformación de la austenita en martensita
Escalonado	Enfriar en agua, aceite, etc. Hasta $T > M_s$ y luego al aire hasta T_{amb} .	Reducir variaciones volumétricas, tensiones internas y grietas
Isotérmico	Similar al escalonado pero con un tiempo de permanencia mayor en el primer medio	Generalmente para aceros aleados
Con Auto revenido	Se sumerge parcialmente la pieza y la temperatura de acuerdo a los colores de revenido	El calor para el revenido proviene de la parte de la pieza que no se sumergió.
A temperaturas Bajo cero	Enfriar hasta una $T_{amb} < T < M_F$ Primero en agua hasta T_{amb} y luego en acetona o CO_2	Acero con $M_F < T_{amb}$. Incrementa la dureza, el volumen y estabiliza las dimensiones de la pieza

La figura 1.11 muestra los diagramas de los tipos de temple con las velocidades de enfriamiento en la curva temperatura – tiempo – transformación (TTT) para un acero hipoeutectoide.

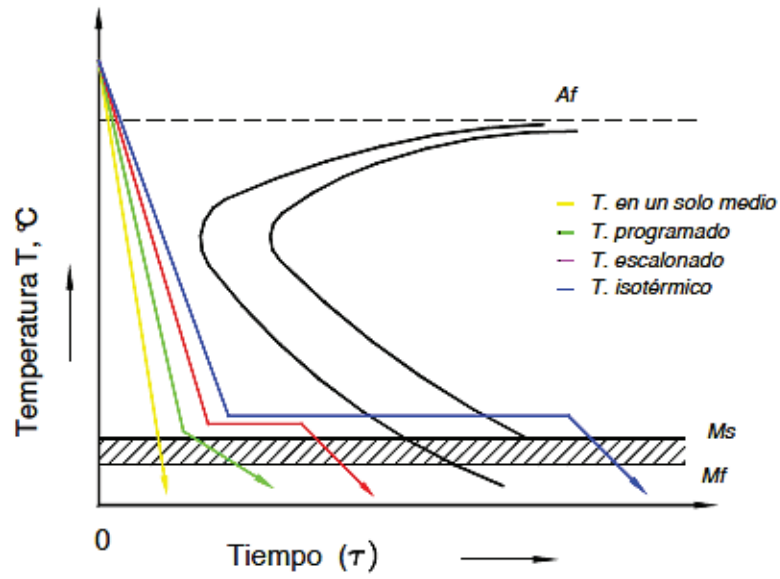


Figura 1.11. Representación gráfica de los diferentes métodos de temple.
(Ruiz, 2007)

1.2.2.4. Revenido

Para la mayoría de las aplicaciones, luego de haberse realizado el temple en los aceros, estos quedan muy duros y frágiles, por lo que para obtener las propiedades adecuadas correspondientes a una aplicación específica, es necesario calentar nuevamente el acero por debajo de la temperatura crítica inferior A_{C1} y enfriarlo luego en aire, agua o aceite según la composición del acero.

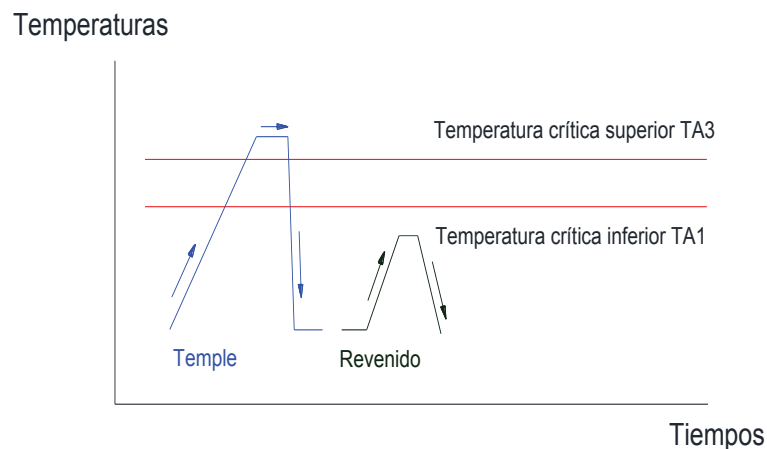


Figura 1.12. Esquema del temple y revenido de un acero. (Barreiro, 1984).

Con el revenido no se consigue eliminar los defectos producidos en el temple sino más bien modificarlos, tanto la dureza como la resistencia se reducen, aumentando la tenacidad y eliminando las tensiones internas que siempre están presentes luego del proceso.

De acuerdo a la temperatura a la que se caliente el acero se tienen tres tipos de revenido: de bajas temperaturas, de temperaturas medias y de altas temperaturas.

Revenido de bajas temperaturas

Se realiza en rangos de temperatura entre 80° a 200°C y se aplica para reducir la tetragonalidad de la red cristalina de la martensita, mediante la formación de carburos y la disminución del contenido de carbono de la martensita, este carbono se desprende en forma de carburo épsilon $Fe_{2.4}C$ (carburo intermedio denominado épsilon ϵ , de estructura hexagonal compacta y fórmula aproximada $Fe_{2.4}C$, cementita no estequiométrica) que posee una red enlazada coherentemente con la de la martensita, es decir, comparten algunos planos cristalográficos.

Mediante este tratamiento se logra reducir las tensiones internas de la martensita manteniendo su dureza y la estructura fina así obtenida se llama martensita revenida que es de elevada resiliencia y tenacidad.

Revenido de temperaturas medianas

La temperatura a la cual se calienta está en los rangos de 350°-500°C, a estas temperaturas el carburo épsilon $Fe_{2.4}C$ se transforma en cementita que se separa de la red cristalina de la solución sólida; la precipitación de la cementita (compuesto químico carburo de hierro Fe_3C) va acompañada de la reducción de la dureza y aumento de la plasticidad, de esta manera la estructura que se obtiene como producto final es una mezcla ferrito-cementítica conocida como troostita de revenido.

Revenido de altas temperaturas

El calentamiento se lo realiza entre 500°-600°C, mediante este proceso se eliminan completamente las tensiones internas con la formación de la cementita,

al final del proceso se obtiene una disminución considerable de la dureza con el aumento de la plasticidad y resiliencia, la martensita ya recuperada se recristaliza produciendo una estructura ferrítica que tiene inclusiones de partículas de cementita en los bordes de grano o entre ellos, esta estructura se llama sorbita de revenido.

Las propiedades del acero revenido a altas temperaturas son mejores que después del recocido y a este proceso de tratamiento térmico en el que se realiza primero el temple y luego el revenido a altas temperaturas se conoce como bonificado.

Cuando se realiza el revenido de los aceros en los rangos de temperatura entre 250° a 400°C, experimentalmente se ha determinado una disminución de la tenacidad a pesar que se presenta un ablandamiento, lo que se conoce como la fragilidad del revenido, se ha comprobado que tal disminución se presenta cuando la cementita forma una red o película alrededor de las agujas de la martensita, la fragilidad es mayor cuanto mayor es la cantidad de esa red de cementita, sin embargo a temperaturas más elevadas al producirse la coalescencia de la cementita tiende a desaparecer esta red y aumentar la tenacidad. (Avner, 1988)

1.3. HORNOS INDUSTRIALES

Los hornos son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales, piezas o elementos, colocándolos en su interior por encima de la temperatura ambiente, el objeto de este calentamiento puede ser fundir, ablandar para una operación de conformado posterior, tratar térmicamente un material para impartir determinadas propiedades, llevar el material a la temperatura necesaria para producir las reacciones químicas en la obtención de un determinado producto o recubrir las piezas con otros elementos.

Para evitar ambigüedades se denominarán hornos a todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte del proceso, a temperatura superior a la ambiente, realizándose el calentamiento de forma directa sobre las piezas o de forma indirecta por transmisión de calor desde otros elementos por mecanismos de conducción, convección y radiación.

De esta manera, atendiendo al tipo de efecto que el horno produce, se pueden tener hornos de fusión, hornos de calentamiento y hornos para producir efectos químicos; en el presente trabajo se hace referencia específicamente a los hornos de calentamiento que tienen como objeto el tratamiento térmico del material para impartir propiedades específicas.

Los hornos para tratamientos térmicos se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios: por el proceso de calentamiento, por el tipo de atmósfera y por el tipo de solera.

1.3.1. SEGÚN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO

El sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir, misma que es función de la naturaleza del material a tratar térmicamente y de las características del proceso de tratamiento.

1.3.1.1. Calentamiento por resistencias eléctricas

Los hornos de resistencias son aquellos en que la energía requerida para el calentamiento del material es de tipo eléctrico y procede de la resistencia óhmica directa de las piezas o de resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor.



Figura 1.13. Horno calentado por resistencias eléctricas.
(http://www.esmaltycolor.com/category.php?id_category=87)

Los hornos eléctricos, a pesar de ser más costosos que los de combustión presentan ciertas ventajas sobre los últimos que facilitan una gran cantidad de procesos, entre las principales se tienen: la oportunidad de obtener temperaturas muy elevadas, hasta 3500°C dependiendo del diseño y la facilidad de regular automáticamente la temperatura.

1.3.1.2. Calentamiento por gas o combustible

El calentamiento por gas tiene como ventaja la economía y como dificultad el control de la temperatura. La temperatura alcanzada suele alcanzar los 1100°C y el control de la atmósfera es muy difícil por ello apenas se emplea este sistema de calentamiento en tratamientos térmicos. (Molera, 1991)



Figura 1.14. Horno industrial calentado por gas.
(<http://especialidadestermicas-mx.com/hornos>)

1.3.2. SEGÚN EL TIPO DE ATMÓSFERA

En tratamientos térmicos se entiende por atmósfera a la masa gaseosa encerrada dentro del horno, que está en contacto con las piezas a tratar, las atmósferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor, además, el papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble, por una parte evita que se produzcan oxidación y decarburación, por otra parte, permite realizar las acciones previstas, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases absorbidos.



Figura 1.15. Horno industrial de atmósfera controlada. (<http://especialidadestermicas-mx.com/hornos>)

1.3.2.1. En vacío

El vacío se utiliza para sintetizar carburos cementados y para el tratamiento térmico especial de los aceros aleados, se consigue mediante bombas mecánicas y de difusión de aceite o mercurio.

1.3.2.2. Neutra

Las atmósferas neutras de argón, helio y nitrógeno apenas se emplean debido al precio de estos gases y las tasas de oxígeno que suelen contener.

1.3.2.3. Oxidantes o reductoras

Las atmósferas carburantes o descarburantes obtenidas por combustión o disociación de mezclas de hidrocarburos (metano, propano, gas natural), con aire N₂, CO, H₂, CO₂ y pequeñas cantidades de vapor de agua.

En un generador exotérmico se introducen hidrocarburos y aire seco limpio convenientemente dosificado, se mezclan en la cámara de combustión, se filtra y se separa el agua; el gas seco resultante se introduce al horno de tratamiento térmico y la mezcla que se introduce en un generador endotérmico es similar a la inyectada en el exotérmico pero no tiene quemador sino que los gases reaccionan entre sí en un catalizador calentado exageradamente.

1.3.3. SEGÚN EL TIPO DE SOLERA

Solera es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal o los materiales a calentarse.

1.3.3.1. Continua

El horno trabaja de forma regular en un proceso sin intermitencias debido a que el material a tratarse ingresa y sale de la solera de manera continua sobre una cinta transportadora suficientemente resistente y termoestable, además el proceso es en serie y se controla de manera automática para toda una línea producción.



Figura 1.16. Horno de solera continua.

(<http://www.directindustry.es/prod/ceradel-industries/product-68368-1042761.html>)

1.3.3.2. Discontinua

El material a tratarse ingresa a la solera de forma individual, el proceso empieza y termina con la pieza en el interior de la cámara, el calentamiento se produce con la pieza inmóvil y los parámetros se regulan de acuerdo al proceso específico a realizarse en el elemento.



Figura 1.17. Horno de solera discontinua.

(http://www.directindustry.es/prod/ceradel-industries/product-68368-1042761.html#product-item_1043451)

1.4. PARTES CONSTITUYENTES DE UN HORNO

Todos los hornos se distinguen de acuerdo a los fines con que fueron ideados y presentan características apropiadas para cada caso, dependiendo de los requerimientos de diseño, a pesar de aquello, tienen toda una serie de elementos constructivos comunes.

La zona de trabajo es la parte principal del horno, en esta se realiza el proceso para el cual se ha diseñado, en general esta zona se separa del ambiente por medio de la bóveda, las paredes y la solera, constituidas de materiales refractarios y termoaislantes, además, en su base tienen los cimientos y se arman sobre una estructura de elementos construidos de materiales comunes.

1.4.1. CIMIENTOS

Los cimientos del horno son la parte que se apoya directamente en el suelo y su principal función es sostener las demás partes del horno, es decir, se necesita su absoluta solidez para soportar toda la carga estática, así como eventuales cargas dinámicas sin deteriorarse; los cimientos se dimensionan de tal manera que la presión contra el suelo no supere los valores permisibles.

1.4.2. PLATAFORMA

La plataforma se ubica sobre los cimientos y debajo de la mampostería, en su construcción se utilizan materiales como ladrillos refractarios y termoaislantes; la estructura del horno determina el tipo de construcción y el espesor de la plataforma; su principal función es proporcionar una superficie sobre la cual se apoyen las demás partes del horno.

1.4.3. SOLERA

La solera es la parte sobre la cual se sitúa el metal o los materiales a calentarse, debido a que soporta la carga del material debe ser suficientemente sólida e impermeable, y químicamente estable respecto al material vítreo y escorias en el caso de los hornos de fundición.

La solera debe soportar: el impacto mecánico en el caso de caída de la chatarra, la erosión por el acero fundido, la penetración de materiales de bajo punto de fusión y la posible hidratación entre procesos.

1.4.4. BÓVEDA

La bóveda es una parte muy importante del horno, en general soporta muy altas temperaturas, además debe ser impermeable a los gases calientes que se encuentran la parte superior de la zona de trabajo y están a una presión superior a la normal.

Los refractarios de la bóveda deben ser capaces de soportar: la radiación térmica y el choque térmico por fuertes variaciones de temperatura, el ataque de los humos con FeO, CO, etc., y eventualmente el impacto mecánico.

1.4.5. PAREDES

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno, deben proteger la zona de las pérdidas de calor, mantener la bóveda y no permitir la salida de los gases de hogar ni la succión del aire de la atmósfera hacia el interior; la cara interior es la más importante, debe ser uniforme, limpia y tener juntas delgadas; se construyen con ladrillos enteros y sanos tanto de sus caras, como de aristas y ángulos.

La parte superior de las paredes debe soportar el choque térmico por las fuertes fluctuaciones de temperatura, el ataque de los humos con FeO, las salpicaduras de escoria al utilizar las lanzas de O₂ y por el arco.

1.4.6. JUNTAS TÉRMICAS

Las juntas térmicas compensan la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor, asegurando su integridad y adicionalmente deben mantener la solidez de la misma sin ser causa del escape de gases, metales o escorias; las dimensiones y la disposición de las juntas se determinan de acuerdo con el calentamiento de una parte dada del horno y de los coeficientes de dilatación de los materiales.

1.4.7. ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura metálica es el esqueleto del horno porque soporta todas sus partes y absorbe los esfuerzos originados en la mampostería tanto durante su ejercicio,

como posteriormente en los procesos de su trabajo; la estructura metálica transmite estos esfuerzos a los cimientos y sobre ella se montan los accesorios del horno, como: marcos, tapas, puertas, ventanas, mecheros, toberas, etc.

1.4.8. VENTANAS DE TRABAJO

Las ventanas de trabajo permiten cargar y descargar los materiales y objetos en la solera, además sirven para vigilar el proceso al que se someten y para controlarlo; las aberturas de las ventanas se cierran por sus correspondientes puertas a bisagras o a guillotina.

1.4.9. PUERTAS

Son los elementos que permiten la carga y descarga del material, deben ser estancas, ligeras, sólidas y resistentes a la temperatura, así como también deben presentar resistencia mecánica y durabilidad; las puertas pueden ser de tipo bisagra o levadizo, pero en ambos casos se debe garantizar la mayor hermeticidad posible.

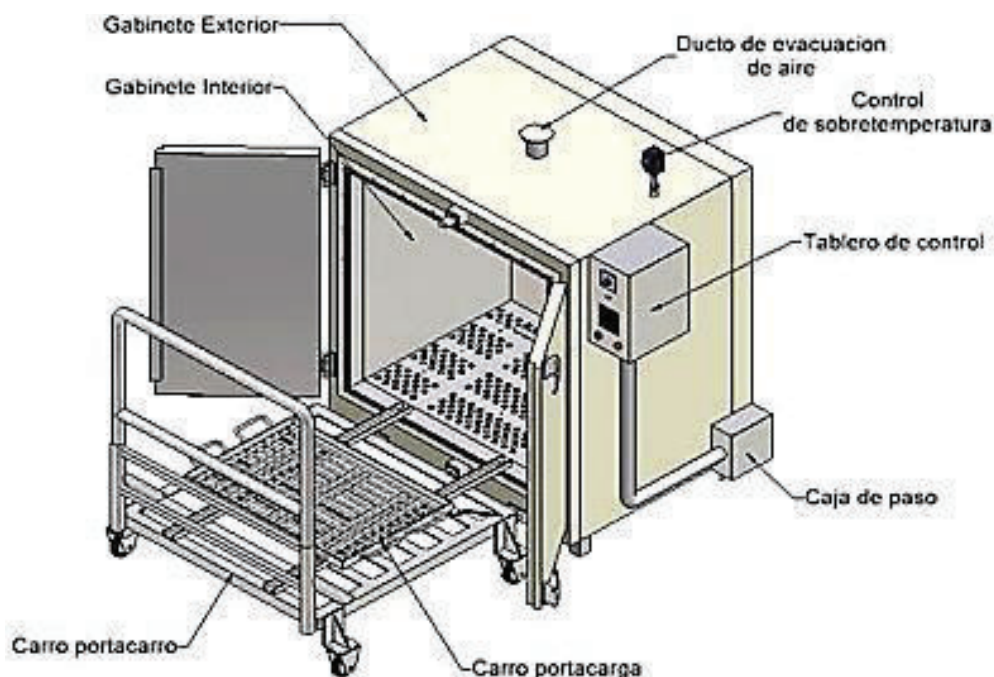


Figura 1.18. Partes de un horno

(<http://jararesistencias.com/hornos-estufas-muflas>)

1.5. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la energía en tránsito debida a una diferencia de temperaturas, es decir, siempre que exista una diferencia de temperaturas debe ocurrir una transferencia de calor. (Incropera, 1999)

En general se tienen tres modos o mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación; es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados, estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo.

1.5.1. CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por medio de la conducción se logra a través de dos mecanismos, el primero es la interacción molecular, en el cual las moléculas de niveles energéticos relativamente mayores (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles inferiores; este tipo de transferencia sucede en los sistemas que tienen moléculas de sólidos, líquidos o gases y en los que hay un gradiente de temperatura.

El segundo mecanismo para la conducción sucede a través de electrones libres, los cuales se presentan principalmente en los sólidos metálicos puros, la concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy bajo para los no metales; la facilidad que tienen los sólidos para conducir varía directamente con la concentración de electrones libres, en consecuencia se espera que los metales puros sean los mejores conductores de calor, hecho confirmado por la experiencia; para la conducción de calor la ecuación o modelo matemático se conoce como ley de Fourier. (Welty, 1994)

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

[Ec. 1.1]

(Welty, 1994)

Donde q_x es la razón de flujo de calor en la dirección de las x ; A es el área normal a la dirección del flujo de calor, dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección de las x y k es la conductividad térmica, la figura 1.19 muestra un esquema del mecanismo de conducción.

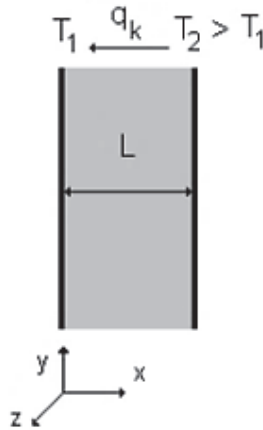


Figura 1.19. Transferencia de calor por conducción. (Welty, 1994)

La conductividad térmica es un parámetro que depende del tipo de material, en referencia a su estructura macroscópica y de la temperatura; ésta representa la cantidad de calor conducido por unidad de tiempo a través de la unidad de área (perpendicular a la dirección de transporte de calor) cuando el gradiente de temperatura a través del elemento conductor es la unidad. (Welty, 1994)

1.5.2. CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección consiste en dos mecanismos que ocurren simultáneamente, en el primero la transferencia de energía se debe al movimiento molecular aleatorio, es decir, por conducción; superpuesto a este mecanismo la transferencia de energía se debe al movimiento global o macroscópico de agregados de fluido.

El movimiento del fluido es el resultado de agregados, formados por un gran número de moléculas, moviéndose por la acción de una fuerza externa, esta fuerza externa puede deberse a un gradiente de densidad o a una diferencia de presión. (Kreith, 2011)

Existen dos clases de procesos convectivos que son: la convección forzada, en la que se obliga el movimiento de un fluido por una superficie debido al efecto de un agente externo tal como un ventilador o una bomba; y la convección natural o convección libre, en la que los cambios de densidad del fluido a consecuencia del intercambio libre de energía provocan un movimiento natural en el fluido; sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma. (Incropera, 1999)

$$q = h * A * (T_s - T_\infty)$$

[Ec. 1.2]

(Incropera, 1999)

En donde q es la relación de transferencia de calor, A es el área normal a la dirección del flujo de calor, $(T_s - T_\infty)$ es la diferencia de temperaturas entre la superficie T_s y el fluido T_∞ , y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, ésta expresión se conoce como la Ley de enfriamiento de Newton.

Para el análisis general de la convección es necesario definir las capas límites hidrodinámica y térmica, además establecer el límite entre el flujo laminar y turbulento.

1.5.2.1. Capa Límite Hidrodinámica

Se asocia a los gradientes de velocidad provocados por la presencia de la superficie sobre el flujo.

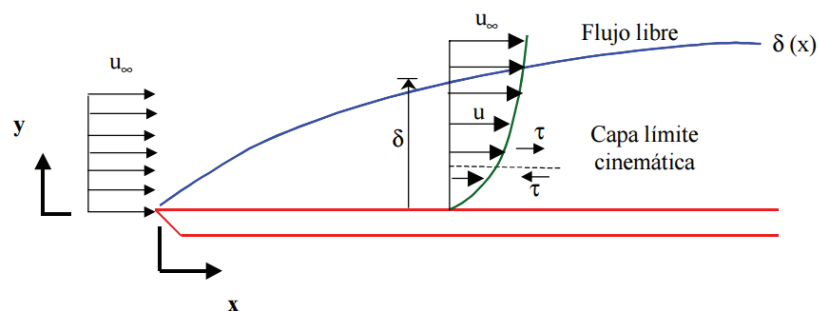


Figura 1.20. Capa límite hidrodinámica. (Incropera, 1999)

1.5.2.2. Capa Límite Térmica

Se asocia a los gradientes de temperatura en el fluido provocados por la presencia de una superficie a diferente temperatura.

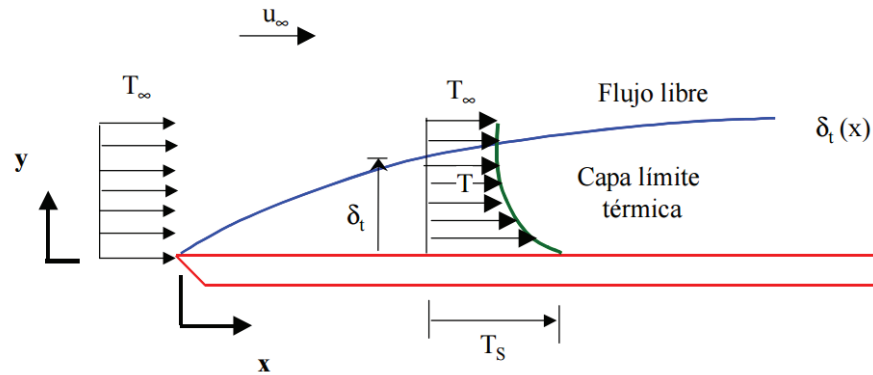


Figura 1.21. Capa límite térmica. (Incropera, 1999)

1.5.2.3. Flujo Laminar y Turbulento

En el presente trabajo se tratará únicamente el caso de la configuración de flujo externo, de esta manera, al analizar la convección es esencial determinar si la capa límite es laminar o turbulenta, debido a que la fricción superficial y la transferencia de calor convectiva dependen de esta condición.

Cuando se calcula el comportamiento de la capa límite, se supone que la transición empieza en una posición x , misma que se determina por el número de Reynolds Re .

El número de Reynolds caracteriza el tipo de flujo sea este laminar, de transición o turbulento, para el caso tratado (flujo externo), el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{\rho * U_\infty * x}{\mu} = \frac{U_\infty * x}{\nu}$$

[Ec 1.3]

(Incropera, 1999)

Donde,

U_{∞} : Velocidad del fluido libre

x : Distancia con respecto al borde de la entrada

$\nu = \mu/\rho$: Viscosidad cinemática del fluido

μ : Viscosidad absoluta del fluido

ρ : Densidad del fluido

Siendo x la distancia desde el borde de ataque del flujo, por lo tanto, Reynolds crece linealmente con x . En la figura 1.22 se observa un esquema de lo indicado.

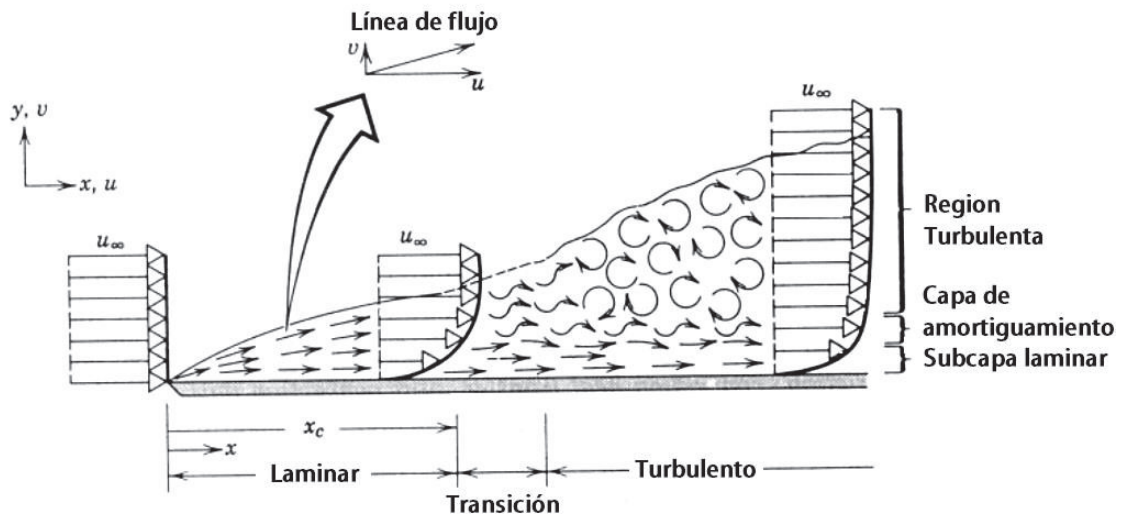


Figura 1.22. Desarrollo de la capa límite hidrodinámica sobre una placa plana.

(Incropera, 1999)

Flujo Laminar

Las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas de inercia, movimiento de fluido ordenado, líneas de corriente paralelas.

Régimen de Transición

Muy irregular, transformación de régimen laminar a turbulento.

Flujo Turbulento

Irregular, Intercambio continuo de energía y masa entre capas, fluctuaciones de velocidad, mayor transmisión de calor asociada a la mayor agitación, el movimiento global se define por propiedades medias.

En el caso del flujo externo, primero se desarrolla siempre la capa laminar, y si la superficie es lo suficientemente larga entonces se produce la transición, y se puede llegar a condiciones de flujo turbulento. Tanto el rozamiento con la superficie, como la magnitud del calor transmitido dependen fuertemente del tipo de flujo, laminar o turbulento.

1.5.2.4. Números adimensionales en el análisis de la convección

Los factores que afectan al proceso de transmisión de calor por convección son: propiedades del fluido, campo de temperaturas (capa límite térmica) y campo de velocidades (capa límite hidrodinámica).

Tomando en cuenta los factores mencionados y efectuando un análisis dimensional se determinan los siguientes números adimensionales que serán utilizados en la determinación del coeficiente de convección h_c y el flujo de calor por convección q_c .

Número de Prandtl (Pr)

Razón de las difusividades de momento y térmica.

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$$

[Ec 1.4]

(Incropera, 1999)

ν : Viscosidad cinemática.

α : Difusividad térmica.

Cp : Capacidad calorífica a presión constante.

μ : Viscosidad.

k : Conductividad térmica.

Número de Grashof (Gr)

Razón de las fuerzas de empuje viscosas.

$$Gr = \frac{g * L^3 * \rho^2 * (T_s - T_\infty) * \beta}{\mu^2}$$

[Ec 1.5]

(Incropera, 1999)

Donde,

g : Aceleración de la gravedad

L : Longitud característica.

ρ : Densidad del fluido.

T_s : Temperatura superficial.

T_∞ : Temperatura del fluido.

μ : Viscosidad.

β : Coeficiente de expansión volumétrica para gases perfectos

$$\beta = \frac{1}{T}$$

T : Temperatura del gas en kelvin.

Número de Rayleigh (Ra)

Es el producto de los números de Grashof Gr y Prandtl Pr .

$$Ra = Gr * Pr$$

[Ec 1.6]

(Incropera, 1999)

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L^3}{\nu * \alpha}$$

[Ec 1.7]

(Incropera, 1999)

Número de Nusselt (Nu)

Representa el gradiente de perfil adimensional de temperaturas, es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción en una capa de fluido de espesor L .

$$Nu = \frac{h_c * L}{k}$$

[Ec 1.8]

(Incropera, 1999)

Donde,

h_c : Coeficiente de convección

L : Longitud característica.

k : Conductividad térmica del fluido.

Los coeficientes medios de transferencia de calor por convección natural pueden representarse, para flujo externo, en la forma funcional siguiente:

$$Nu_f = C * (Ra_f)^m$$

[Ec 1.9]

(Incropera, 1999)

$$Nu_f = C * (Gr_f * Pr_f)^m$$

[Ec 1.10]

(Incropera, 1999)

Donde C, m son constantes y el subíndice f indica que las propiedades en los grupos adimensionales se evalúan a la temperatura de película $T_f = (T_\infty + T_s)/2$.

1.5.3. RADIACIÓN

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, ésta puede provenir de sólidos, líquidos y gases; sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de átomos o moléculas constitutivos.

La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas por este motivo a diferencia de la transferencia de energía por conducción o por convección, la radiación no requiere de un medio material para propagarse, de hecho, el intercambio radiante entre superficies es máximo cuando no hay material que ocupe el espacio intermedio, es decir, es más eficiente en el vacío.

El intercambio de energía radiante puede ocurrir entre dos superficies, entre una superficie y un gas o medio participante, o puede involucrar una interacción compleja entre varias superficies o fluidos participantes.

La transferencia de energía por radiación se puede tratar con razonable exactitud, si se llama cuerpo negro a un cuerpo perfectamente emisor o absorbente, la razón a la que emite energía radiante el cuerpo negro está dada por la ecuación o modelo

$$\frac{q}{A} = \sigma * T^4$$

[Ec. 1.11]

(Incropera, 1999)

En donde q es la emisión radiante, A es el área de la superficie de emisión, T es la temperatura absoluta y σ es la constante de Stefan-Boltzmann, que numéricamente es igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

El intercambio de radiación entre una superficie pequeña y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea a la pequeña, se puede tratar mediante el siguiente modelo:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

[Ec. 1.12]

(Incropera, 1999)

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, con valores del rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con el cuerpo negro, T_s es la temperatura de la superficie pequeña y T_{alr} es la temperatura de la superficie isotérmica.

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción por radiación; hay muchas aplicaciones en las que es conveniente expresar el intercambio neto de radiación q_{rad} de la forma (Incropera, 1999)

$$q_{rad} = h_r * A * (T_s - T_{alr})$$

[Ec. 1.13]

(Incropera, 1999)

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r es

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s - T_{alr}) * (T_s^2 + T_{alr}^2)$$

[Ec. 1.14]

(Incropera, 1999)

1.6. TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS

Los aislamientos utilizados en hornos industriales pueden adoptar la forma de pared plana en el cuerpo del horno, de pared cilíndrica en tuberías y de pantallas de radiación en hornos de vacío.

Para el caso a tratar se analiza la transferencia de calor unidimensional en una pared plana correspondiente al revestimiento del horno, la transmisión de calor a través del revestimiento es un fenómeno de transporte complejo, debido a que al estar compuesto por varias capas en su mayoría de sólido poroso, intervienen en él, en mayor o menor grado, los tres mecanismos de transmisión de calor: conducción (en el sólido y en el gas encerrado en los poros), convección (en el gas) y radiación (en el gas).

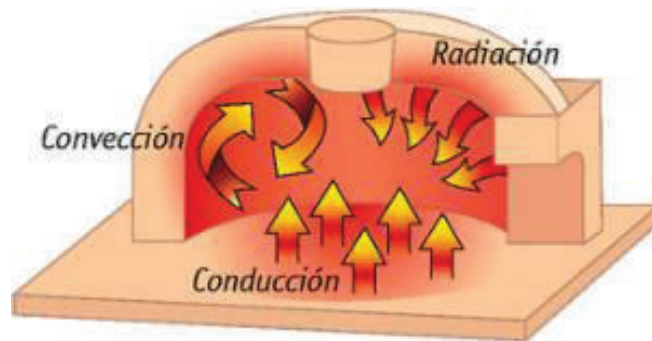


Figura 1.23. Mecanismos de transferencia de calor en un horno.

(<http://www.webquestceys.com/majwq/wq/ver/6688>)

1.6.1. CONVECCIÓN EN RECINTOS CERRADOS

El número de Rayleigh para recintos cerrados Ra_L según (Cengel, 2007) se determina a partir de:

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} * Pr$$

[Ec. 1.15]

Cuando se conoce el número de Nusselt la razón de la transferencia de calor a través del recinto cerrado se puede determinar por medio de la relación

$$q = h * A_x * (T_1 - T_2) = k * Nu * A_x * \frac{T_1 - T_2}{L_c}$$

[Ec. 1.16]

(Cengel, 2007)

Debido a que $k = h \times Nu/L$; la razón de la conducción q_k estacionaria de calor de uno a otro lado de una capa de espesor L_c , área A_x y conductividad térmica k , se expresa como

$$q_k = k * A_x * \frac{T_1 - T_2}{L_c}$$

[Ec. 1.17]

(Cengel, 2007)

Donde T_1 y T_2 son las temperaturas en los dos lados de la capa; al compararla con la ecuación inicial se observa que la transferencia de calor por convección en un recinto cerrado es análoga a la conducción de calor de uno a otro lado de la capa de fluido en ese recinto, siempre que la conductividad térmica k se reemplace por $k * Nu$, es decir, el fluido en un recinto cerrado se comporta como un fluido cuya conductividad térmica es $k * Nu$ como resultado de las corrientes de convección; por lo tanto se llama conductividad térmica efectiva del recinto, es decir,

$$k_{ef} = k * Nu$$

[Ec. 1.18]

(Cengel, 2007)

Para el caso de recintos cerrados rectangulares verticales, Catton (1978) recomienda estas dos correlaciones debidas a Berkowsky y Polevikov (1977),

$$Nu = 0.18 * \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} * Ra_L \right)^{0.29} , \quad 1 < \frac{H}{L} < 2$$

$$\text{Válida para } \frac{Pr}{0.2+Pr} * Ra_L > 10^3$$

[Ec. 1.19]

(Cengel, 2007)

$$Nu = 0.22 * \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} * Ra_L \right)^{0.28} * \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4}, \quad 2 < \frac{H}{L} < 10 \quad [\text{Ec. 1.20}]$$

(Cengel, 2007)

La ecuación 1.20 es válida para cualquier número de Prandtl.

En la figura 1.21 se muestran las variables en un recinto cerrado rectangular vertical.

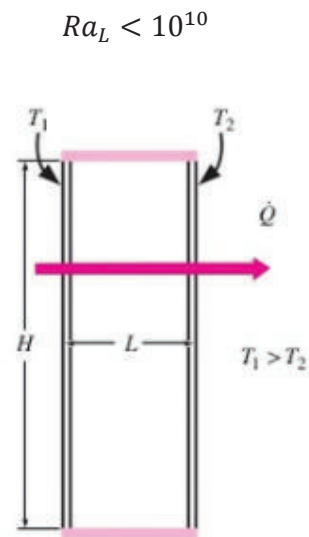


Figura 1.24. Recinto cerrado rectangular vertical con superficies isotérmicas.

(Cengel, 2007)

Todas las propiedades del fluido deben evaluarse a la temperatura promedio $T_p = (T_1 + T_2)/2$. (Cengel, 2007).

1.6.2. FACTOR DE FORMA

En el diseño de hornos y dispositivos que calientan o enfrían sistemas mediante radiación, se necesita calcular el factor de forma, el cual permite determinar la transferencia de calor por radiación entre superficies que estén a diferente temperatura.

En los problemas de transferencia de calor por radiación, la intensidad de la radiación térmica entre dos superficies no es afectada de manera apreciable por

el medio, a menos que la temperatura sea tan alta que cause la ionización o disociación de los gases, por lo tanto, para la mayoría de los casos de superficies a nivel industrial se puede tratar como dos cuerpos difusos intercambiando energía.

El problema para calcular la transferencia de calor por radiación intercambiado por dos superficies consiste en determinar la fracción de calor emitido por el un cuerpo y la fracción recibida por el otro cuerpo y viceversa; a la fracción de la distribución de la radiación difusa que deja una superficie A_i y llega a otra A_j se le conoce como factor de forma de radiación F_{i-j} . (Kreith, 2011)

La energía de intercambio $q_{1\leftrightarrow 2}$ entre dos superficies negras está dada por la siguiente relación:

$$q_{1\leftrightarrow 2} = A_1 * F_{1-2} * (E_{b1} - E_{b2}) = A_2 * F_{2-1} * (E_{b1} - E_{b2})$$

[Ec. 1.21]

(Kreith, 2011)

Donde E_b es la radiación emitida por cada cuerpo y el factor de forma geométrica F_{1-2} en general está dado por la ecuación:

$$F_{1-2} = \iint \frac{\cos \theta_1 * \cos \theta_2 * dA_1 dA_2}{\pi * r^2}$$

[Ec. 1.22]

(Kreith, 2011)

Donde θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia de la radiación y r es la distancia entre las superficies.

Para el intercambio de calor entre superficies grises se ha llegado a establecer relaciones para el factor de forma y en el caso de placas paralelas infinitas la relación aproximada es:

$$\frac{q}{A} = \frac{\sigma * (T_1^2 - T_2^2)}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2) - 1}$$

[Ec. 1.23]

(Holman, 1999)

De donde se obtiene la siguiente relación para el factor de forma F_{1-2} , en la cámara de un horno según (Holman, 1999)

$$F_{1-2} = \frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_{sc}}{A_h} * \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1 \right)$$

[Ec. 1.124]

(Holman, 1999)

En donde ϵ_c es la emisividad de la carga, ϵ_p la emisividad de la pared, A_h superficie radiante y A_{sc} el área superficial de la carga.

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL HORNO

2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

En este apartado se presentan las variables principales a considerarse en el diseño térmico y estructural del horno, los criterios fundamentales para el dimensionamiento, y los factores determinantes en la selección de materiales y demás elementos constituyentes.

El equipo a construirse será un horno que cumpla con los siguientes parámetros: calentamiento por resistencias eléctricas, temperatura de trabajo de hasta 1350 grados centígrados por la disponibilidad de elementos calefactores en el mercado nacional y con el objetivo de tratar los materiales mencionados en el primer capítulo, el acabado superficial del interior de la cámara permitirá una radiación uniforme, la temperatura superficial exterior máxima será de 100 grados centígrados con el fin garantizar la seguridad de los operarios, y disponibilidad de una puerta aislante, hermética y ergonómica que facilite la carga y descarga de material.

Tomando en cuenta los factores mencionados y estableciendo una cronología preferencial de acuerdo con el proceso de diseño, se procede con el cálculo, dimensionamiento y selección de elementos diferenciando los siguientes aspectos: características de los materiales para las capas del revestimiento, cálculo térmico de los espesores de pared, dimensionamiento de la cámara interior, cálculo del estado transitorio, cálculo y selección de las resistencias calefactoras, análisis de fiabilidad de la estructura soportante y cálculo del eje principal del mecanismo de la puerta.

2.2. CONFIGURACIÓN DEL HORNO

La mayoría de materiales a utilizarse en la construcción de un horno están disponibles en presentaciones que favorecen una estructura cúbica o prismática rectangular, tales como los ladrillos prismáticos rectangulares, las planchas rectangulares y los elementos estructurales; debido a la facilidad constructiva, se selecciona la configuración cúbica.

El horno presentará esta configuración con paredes verticales y horizontales dispuestas hacia el exterior a partir de las dimensiones de la cámara.

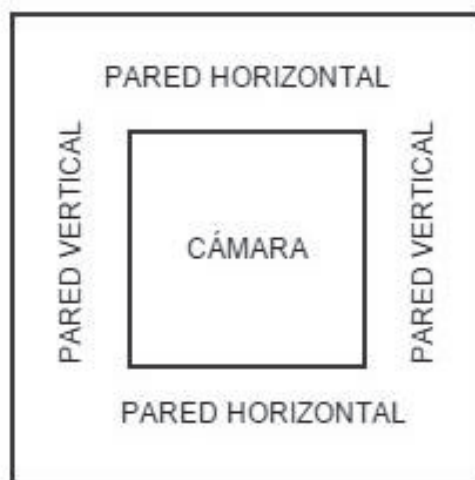


Figura 2.1. Configuración del horno.

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LAS CAPAS DEL REVESTIMIENTO

Cóncrax 1500 clase D

Es un concreto sílico - aluminoso de fraguado hidráulico y endurecimiento en dos etapas, diseñado para la construcción de revestimientos y paredes interiores de hornos, por su composición presenta resistencia a cloruros, sulfatos y ambientes ácidos; con este material se pueden construir placas para interiores de hornos, al ser elaboradas correctamente presentan un gran acabado superficial, mismo que permite una radiación uniforme en el interior de la cámara.

Sus características técnicas más importantes son: temperatura máxima de operación 1540 °C, alta resistencia mecánica, densidad media y baja conductividad térmica.

Ladrillo Refractario UA-23

Es un ladrillo refractario aislante de baja densidad utilizado en la construcción de las paredes para revestimientos de hornos de alta temperatura, su composición es en su mayoría sílico – aluminosa y las unidades se presentan en dimensiones de 2 ½ x 4 ½ x 9 pulgadas.

Sus características técnicas más importantes son: temperatura de operación hasta 1600 °C, alta resistencia a la compresión, densidad baja y baja conductividad térmica.

Mortero Refractario Superaerofrax

Es capaz de resistir la acción del fuego sin alterarse, está elaborado con cementos aluminosos, lo que les otorga una serie características adicionales, como el fraguado rápido, la resistencia a cloruros y sulfatos y la resistencia en ambientes ácidos.

Está diseñado tanto como mortero de enlucido como para montar cerámica refractaria, bloques de hormigón o terracota que van a estar sometidos a altas temperaturas, entre sus características técnicas destacan: temperatura máxima de operación hasta 1600 °C, resistente a los sulfatos y cloruros, resistente a los ácidos y espesor de aplicación máximo de 2 cm por capa.

(<http://www.interempresas.net/Jardineria/FeriaVirtual/Producto-Mortero-refractario-Sika-Rep-115-61433.html>)

Fibro cemento

El fibrocemento, es un material utilizado en la construcción, constituido por una mezcla de un aglomerante inorgánico hidráulico (cemento) o un aglomerante de silicato de calcio que se forma por la reacción química de un material silíceo y un

material calcáreo, reforzado con fibras orgánicas, minerales y/o fibras inorgánicas sintéticas.

Se emplea normalmente en la fabricación de elementos constructivos, como planchas lisas y onduladas para techumbres, tubos para agua a presión, tubos para drenaje, entre otros; las placas constituidas por este material se presentan lisas u onduladas en distintas longitudes, además se fabrican piezas especiales de las más variadas formas.

Sus principales características técnicas son: impermeabilidad, incombustibilidad, resistente a cambios de temperatura y baja conductividad térmica.

(<http://www.arkigrafico.com/que-es-el-fibroemento/>)

Fibra Cerámica

La fibra cerámica refractaria, se elabora a base de sílice y óxido de aluminio fundido, puede llevar otros óxidos (zirconio, hierro, magnesio) en cantidades minoritarias, estas fibras presentan una elevada resistencia a las altas temperaturas, donde las lanas de aislamiento (Lana Mineral y Fibra de Vidrio) no son eficaces.

Pueden ser sometidas a temperaturas que van desde los 1000°C hasta 1500°C sin modificar su estructura, soportando enfriamientos y calentamientos, choque térmico y otros fenómenos inducidos por las altas temperaturas; son surtidas en una gran variedad de presentaciones para cada caso específico.

Lista para trabajar sin necesidad de procedimientos adicionales como en el caso de los concretos refractarios, sus principales características técnicas son: baja conductividad térmica, resistencia al choque térmico y temperaturas de operación hasta 1500°C.

(<https://www.aislamientosyrefractarios.com/fibra-ceramica-1.html>)

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las propiedades técnicas de los materiales para el revestimiento.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales del revestimiento.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES					
MATERIALES	PROPIEDAD				
	Máxima Temperatura de Servicio (°C)	Conductividad Térmica (W/m.K)	Calor Específico (J/Kg.K)	Densidad (g/cm ³)	Referencia
Cóngrax 1500 Clase D	1540	1,12	1000	1,85	Catálogo Erecos
Ladrillo Refractario UA-23	1600	0,362	1050	0,73	Catálogo Erecos
Mortero Refractario	1600	1,4	900	1,2	Catálogo Erecos
Fibro cemento	700	0,23	860	1,5	http://www.viviendasrusticas.com/files/fibro-cemento.pdf
Chapa de acero	1530	56,7	460	7,6	(Cengel, 2007)
Fibra Cerámica	1500	0,17	1300	0,29	Catálogo NUTEC IBAR

2.4. CÁLCULO TÉRMICO DE LOS ESPESORES DE PARED

Para determinar los espesores de las capas de revestimiento, se efectúa el estudio de la transferencia de calor en estado estable a lo largo de la pared del horno, de acuerdo con los siguientes requerimientos: temperatura máxima de operación 1350 °C, temperatura superficial exterior de hasta 100 °C y temperatura ambiente promedio en la ciudad de Quito de 16 °C (temperatura obtenida de las publicaciones meteorológicas dadas por el INAMHI 2014).

2.4.1. DISPOSICIÓN DE LOS MATERIALES EN LAS CAPAS DE REVESTIMIENTO

Para elegir la disposición preferencial de los materiales en las capas del revestimiento se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones.

Los materiales de cada capa deberán soportar la temperatura máxima de operación correspondiente a su ubicación dentro de la pared de revestimiento.

Se pretende conseguir un buen acabado superficial en el interior de la cámara con el fin de lograr una radiación uniforme, para esto, se ubicarán las placas de Cóncrax como primera capa de revestimiento desde el interior.

Se toma en cuenta el criterio del libro “Hornos Industriales de Resistencias” (Astigárraga, 1995) de que en el aislamiento se emplean materiales de conductividades térmicas y densidades decrecientes, desde la cara caliente en el interior del horno, hasta la cara fría en exterior del mismo.

De acuerdo con los criterios mencionados, la disposición de los materiales está determinada por las siguientes propiedades: temperatura máxima de operación, conductividad térmica y densidad decreciente, a excepción de la primera capa correspondiente a las placas de Cóncrax cuyo criterio se explicó anteriormente.

De esta forma, las capas en la pared del horno estarán dispuestas de la siguiente manera: la primera capa desde el interior corresponde a las placas de Cóncrax, a continuación se ubicará la capa de ladrillo refractario, seguida de las planchas de fibrocemento, la capa de aire libre y finalmente la plancha de acero; la disposición elegida se indica en la figura 2.1.

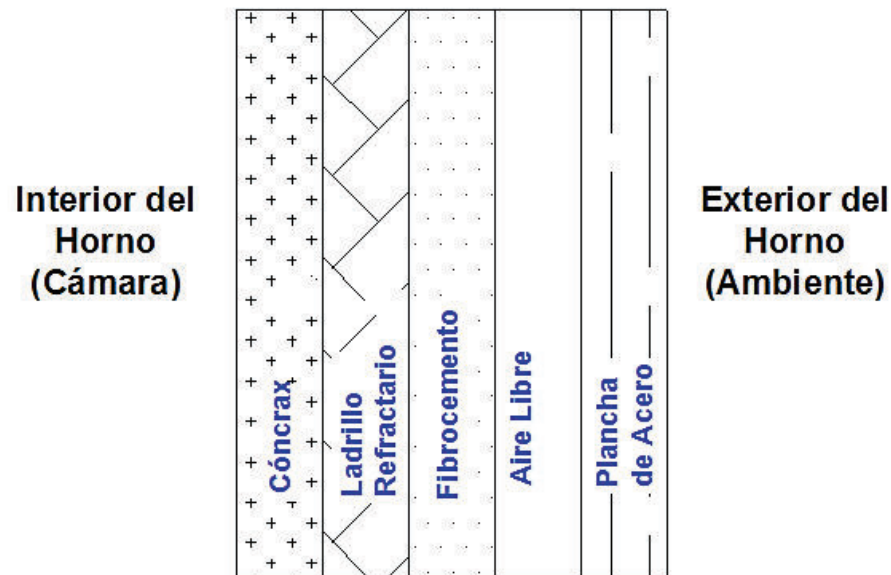


Figura 2.2. Disposición de los materiales del revestimiento.

2.4.2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES

Para efectuar el cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes del revestimiento se hacen las siguientes consideraciones.

Se realiza el análisis de la transferencia de calor unidimensional en estado estable en una pared compuesta.

Se desprecia la diferencia de temperatura entre el interior de la cámara y la superficie interior de las placas de Cóncrax, por lo tanto, se considera que la temperatura superficial interior del revestimiento en la cara de la placa de Cóncrax es de 1350°C.

Se considera una temperatura superficial exterior del revestimiento en la plancha metálica menor a 100 °C, misma que será el objetivo del cálculo, y la temperatura ambiente promedio en la ciudad de Quito de 16 °C (temperatura obtenida de las publicaciones meteorológicas dadas por el INAMHI 2014).

En la capa de aire libre se considera solamente la conducción utilizando la conductividad efectiva mencionada en el apartado 1.6 correspondiente a recintos cerrados y no se analiza la convección.

Se considera un circuito térmico en el que las resistencias de conducción correspondientes a las capas del revestimiento están dispuestas en serie, mientras que entre la superficie exterior del revestimiento y el ambiente se tienen dos resistencias en paralelo correspondientes a la convección y radiación.

De igual manera se tienen dos flujos de calor, uno correspondiente a la conducción en las capas del revestimiento y el otro correspondiente a la convección y radiación en el exterior del revestimiento.

En la figura 2.2 se muestra un esquema del modelo y se indican las variables que intervienen en el cálculo.

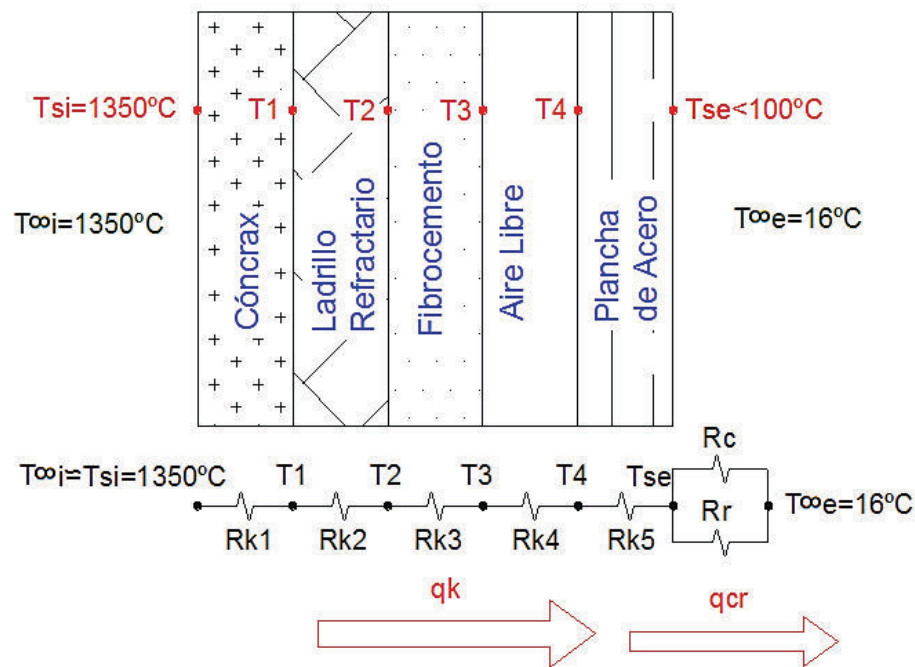


Figura 2.3. Esquema del modelo de transferencia de calor.

$T_{\infty i}$: Temperatura del interior de la cámara.

T_{si} : Temperatura superficial interior del revestimiento.

T_1 : Temperatura en la intercara entre la placa de Cóngrax y el Ladrillo Refractario.

T_2 : Temperatura en la intercara entre el Ladrillo Refractario y el Fibrocemento.

T_3 : Temperatura en la intercara entre el Fibrocemento y la capa de Aire Libre.

T_4 : Temperatura en la intercara entre la capa de Aire Libre.

T_{se} : Temperatura superficial exterior del revestimiento.

R_{k1} : Resistencia Térmica de conducción de la placa de Cóngrax.

R_{k2} : Resistencia Térmica de conducción del Ladrillo Refractario.

R_{k3} : Resistencia Térmica de conducción de la plancha de Fibrocemento.

R_{k4} : Resistencia Térmica de conducción de la capa de Aire Libre.

R_{k5} : Resistencia Térmica de conducción de la Plancha de Acero.

R_c : Resistencia Térmica de convección entre la superficie exterior y el ambiente.

R_r : Resistencia Térmica de radiación de la superficie exterior hacia el ambiente.

$T_{\infty e}$: Temperatura exterior del ambiente.

q_k : Flujo de calor perdido por conducción.

q_{cr} : Flujo de calor perdido por convección y radiación.

2.4.2.1. Consideraciones para el cálculo

Se parte de la consideración de que el flujo de calor perdido por conducción a través de las paredes q_k , es igual al flujo de calor perdido por convección-radiación desde la superficie exterior hacia el ambiente q_{cr} según (Astigárraga, 1995).

$$q_k = q_{cr}$$

[Ec. 2.1]

(Astigárraga, 1995)

El objetivo del cálculo es obtener una temperatura superficial exterior del revestimiento T_{se} menor a 100°C , para esto se deben variar los espesores de las capas del revestimiento de forma conveniente hasta que el valor de T_{se} sea lo más próximo.

Los espesores de las planchas de fibrocemento y de la plancha metálica no se varían y tienen una sola disposición, a lo largo de su espesor debido a que se consideran las medidas estándares en el mercado. Se varían los espesores de los ladrillos refractarios y de la capa de aire.

Los ladrillos se pueden variar de acuerdo a la disposición en la que se ubiquen, ya que sus dimensiones son de $2\frac{1}{2} \times 4\frac{1}{2} \times 9$ pulgadas, se pueden disponer a lo largo de cualquiera de las 3 dimensiones o haciendo combinaciones de dos ladrillos en las 3 disposiciones.

La capa de aire se puede variar convenientemente hasta obtener el objetivo de temperatura, siempre que el espesor cumpla la relación H/L para paredes verticales como se indicó en el apartado 1.6.1.

Los espesores determinados L_i de esa forma deben satisfacer la condición de temperatura superficial en el exterior del horno T_{se} . Se iniciará el proceso asumiendo una temperatura superficial exterior del revestimiento T_{sea} .

2.4.2.2. Proceso de cálculo

Para iniciar el cálculo se establecen los espesores para cada una de las capas del revestimiento de acuerdo a las condiciones planteadas anteriormente y se debe asumir una temperatura superficial exterior del revestimiento T_{sea} (temperatura en la cara fría de la plancha de acero); con esta temperatura y el valor conocido de temperatura superficial interior del revestimiento T_{si} (temperatura en la cara caliente de las placas de Cóncrax) se efectúa el cálculo del flujo de calor q_k , una vez calculado este flujo se utiliza la ecuación del calor perdido por convección-radiación q_{cr} para recalcular la temperatura superficial del revestimiento exterior T_{sec} , con este resultado se procede a calcular nuevamente el calor q_k y se repite el proceso de forma iterativa hasta que la temperatura calculada sea lo más próxima a la temperatura asumida. (Norton, 1949)

Si la temperatura obtenida T_{se} no es cercana al objetivo de 100°C, se procede a variar nuevamente los espesores de las capas de los materiales (ladrillo refractario y aire) y se asume una nueva temperatura para repetir el proceso de cálculo por completo, esto se realizará hasta que la temperatura obtenida T_{se} sea lo más cercana al objetivo.

A continuación se presenta el desarrollo de los modelos correspondientes a los flujos de calor que serán utilizados en el proceso de cálculo.

2.4.2.3. Calor perdido por conducción

De esta manera el calor perdido por conducción q_k para el cálculo está determinado por:

$$q_k = \frac{T_{si} - T_{se}}{\sum \frac{L_i}{k_i}}$$

[Ec. 2.2]

(Astigárraga, 1995)

Donde:

T_{si} : Temperatura superficial interior del horno.

T_{se} : Temperatura superficial exterior del revestimiento (asumida o calculada).

L_i : Espesor de cada capa de revestimiento del horno.

k_i : Conductividad térmica promedio de cada material.

Entonces el calor perdido por conducción está dado por la expresión:

$$q_k = \frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{L_4}{k_4} + \frac{L_5}{k_5}}$$

[Ec. 2.3]

L_1, k_1 : Espesor y conductividad térmica del Cónrax.

L_2, k_2 : Espesor y conductividad térmica del Ladrillo Refractario.

L_3, k_3 : Espesor y conductividad térmica del Fibrocemento.

L_4, k_4 : Espesor y conductividad térmica de la capa de Aire Libre.

L_5, k_5 : Espesor y conductividad térmica de la Plancha de Acero.

La conductividad térmica del aire se determina por medio de la relación de conductividad efectiva para recintos cerrados, haciendo referencia al apartado 1.6.1 cumpliendo con la relación H/L para paredes verticales.

$$k_{ef} = k * N_u$$

[Ec. 2.4]

(Cengel, 2007)

El número de Nusselt y las propiedades del aire se evalúan a la temperatura media T_p .

El espesor de la chapa metálica es relativamente delgado, por tanto se asume que $T_4 \approx T_{se}$, es una aproximación válida debido a la elevada conductividad del acero y el espesor delgado, para fines prácticos la caída de temperatura es despreciable, por tanto, la temperatura media de la capa de aire está dada por:

$$T_p = \frac{T_{se} + T_3}{2}$$

[Ec. 2.5]

(Cengel, 2007)

2.4.2.4. Calor perdido por convección-radiación

El calor que se pierde por convección-radiación q_{cr} del revestimiento exterior hacia los alrededores está determinado por:

$$q_{cr} = h_{cr} * (T_{se} - T_{\infty e})$$

[Ec. 2.6]

(Astigárraga, 1995)

h_{cr} : Coeficiente combinado de convección-radiación $h_{cr} = h_c + h_r$.

h_c : Coeficiente de convección evaluado a $T_p = \frac{T_{se} + T_{\infty e}}{2}$

h_r : Coeficiente de radiación, $h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_{alr}) * (T_s^2 + T_{alr}^2)$, para este caso se asume que $T_{alr} \approx T_{\infty}$

ε : 0,88: Emisividad de la superficie exterior.

σ : constante de Boltzman $5,67e-08$ [W/m²*K].

$T_{\infty e}$: Temperatura promedio anual en la ciudad de Quito determinada como

$$T_{\infty e} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$T_{maxQ} = 21.3^\circ\text{C}$

$T_{minQ} = 10^\circ\text{C}$

obtenidos de las publicaciones meteorológicas dadas por el INAMHI 2014.

$$T_{\infty e} \approx 16^\circ\text{C}$$

T_{se} : Temperatura superficial exterior del revestimiento (calculada).

El calor que se pierde al ambiente por convección y radiación es:

$$q_{cr} = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{R_{cr}}$$

[Ec. 2.7]

(Norton, 1949)

Donde R_{cr} es la resistencia de convección-radiación.

$$R_{cr} = \frac{1}{h_{cr}}$$

[Ec. 2.8]

Para continuar con el cálculo se procede a igualar las pérdidas de calor por conducción y por convección-radiación según la ecuación 2.1.

$$q_k = q_{cr}$$

$$q_k = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{R_{cr}}$$

[Ec. 2.9]

De la ecuación 2.7 se despeja la temperatura superficial exterior calculada T_{se} .

$$T_{se} = \frac{q_k}{h_{cr}} + T_{\infty e}$$

[Ec. 2.10]

La iteración finaliza cuando el valor de la temperatura superficial exterior del revestimiento calculada T_{sec} sea lo más próximo a la temperatura superficial exterior del revestimiento asumida T_{sea} .

2.4.2.5. Modelo Seleccionado

A continuación se presenta el modelo final luego de haber variado los espesores de las capas de Ladrillo Refractario y Aire Libre, en la tabla 2.2 se indican los espesores para cada material, su conductividad térmica y su resistencia térmica, el espacio del aire no se indica debido a que las propiedades varían conforme se realiza la iteración.

Tabla 2.2. Dimensiones y propiedades de los materiales.

MATERIAL	ESPESOR [m]	CONDUCTIVIDAD (W/m*K)	RESISTENCIA TÉRMICA [W/m^2]
Cóncrax 1500	0,01	1,12	0,009
Ladrillo UA23	0,1778 (9,0")	0,362	0,491
Fibro cemento	0,0127 (0,5")	0,23	0,055
Chapa acero	0,0015	56,7	2,6 E-05
RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL			0,555

Se establecen las dimensiones de la cámara interior en 0,4 metros por cada lado con un volumen de 0.064 m^3 , por lo tanto, la altura H y el espacio de aire L (espacio entre el fibrocemento y la plancha de acero) de acuerdo a los espesores obtenidos son 0,8 m y 0,2 metros respectivamente.

En la tabla 2.3 se muestra el resultado final, en la octava iteración converge la solución con un error del 1%, obteniéndose los valores que son de interés para el diseño del horno.

Tabla 2.3. Cálculo del calor perdido por conducción.

N°	Aire de la capa interior						Parte exterior												
	Tsa [°C]	Tsa [K]	$\beta\beta/\nu^2$ [1/(K°m³)]	Pr	RaL	Nusselt	k1 [W/m²K]	kef [W/m²K]	Rt [m²²K/W]	qk [W/m²]	Tpm [K]	$\beta\beta/\nu^2$ [1/(K°m³)]	k2 [W/m²K]	hcr [W/m²²K]	Tsc [K]	T1 [K]	T2 [K]	T3 [K]	(T3+Tsc)/2 [K]
1	100	373	8,05E+06	0,71	1,83E+07	15,67	0,0429	0,67236	0,8528	1465,77	331	8,05E+07	0,02776	13,225	399,83	1609,91	889,98	809,05	604,44
2	126,83	399,83	5,96E+06	0,71	1,39E+07	14,50	0,04466	0,64756	0,8642	1415,40	344,42	6,79E+07	0,0287	14,597	385,96	1610,36	915,18	837,02	611,49
3	112,96	385,96	5,71E+06	0,71	1,46E+07	14,72	0,04506	0,66341	0,8568	1443,78	337,48	7,41E+07	0,02821	13,887	392,97	1610,11	900,98	821,26	607,11
4	119,97	392,97	5,87E+06	0,71	1,43E+07	14,62	0,04481	0,65528	0,8605	1429,37	340,98	7,09E+07	0,02846	14,247	389,33	1610,24	908,19	829,26	609,30
5	116,33	389,33	5,79E+06	0,71	1,45E+07	14,68	0,04993	0,73283	0,8282	1489,50	339,16	7,26E+07	0,02833	14,061	394,93	1609,70	878,12	795,87	595,40
6	121,93	394,93	6,29E+06	0,71	1,43E+07	14,64	0,04415	0,64619	0,8648	1420,00	341,97	7,00E+07	0,02853	14,347	387,97	1610,32	912,88	834,47	611,22
7	114,97	387,97	5,72E+06	0,71	1,45E+07	14,69	0,04504	0,66155	0,8577	1440,01	338,49	7,32E+07	0,02828	13,990	391,93	1610,14	902,87	823,35	607,94
8	118,93	391,93	5,85E+06	0,71	1,43E+07	14,64	0,04484	0,65643	0,8600	1431,46	340,46	7,14E+07	0,02842	14,193	389,85	1610,22	907,14	828,10	608,98
9	116,85	389,85	5,80E+06	0,71	1,44E+07	14,67	0,04491	0,65876	0,8589	1435,67	339,43	7,23E+07	0,02835	14,087	390,92	1610,18	905,04	825,76	608,34
10	117,92	390,92	5,82E+06	0,71	1,44E+07	14,65	0,04488	0,65752	0,8595	1433,48	339,96	7,19E+07	0,02839	14,144	390,35	1610,20	906,13	826,98	608,67
11	117,35	390,35	5,81E+06	0,71	1,44E+07	14,66	0,04490	0,65825	0,8592	1434,70	339,68	7,21E+07	0,02837	14,113	390,65	1610,19	905,52	826,30	608,48
12	117,65	390,65	5,82E+06	0,71	1,44E+07	14,66	0,04489	0,65801	0,8593	1434,16	339,83	7,20E+07	0,02838	14,130	390,50	1610,19	905,79	826,60	608,55

Tsa: Temperatura superficial exterior asumida

Tsc: Temperatura superficial exterior asumida

Nota: Fuente: Propia.

Las propiedades para el aire se obtienen a partir de la interpolación de los valores de la tabla del anexo 1.

Los resultados obtenidos al final del proceso de cálculo iterativo son: el calor perdido por una pared vertical es 1434,16 [W/m²], la temperatura exterior es 117,5 [°C], el coeficiente de transferencia de calor por radiación y convección es 14,13 [W/m²*K], los otros resultados se pueden observar en la tabla 2.3. Cabe resaltar que la temperatura superficial exterior obtenida en el cálculo es ligeramente mayor a la temperatura objetivo con la cual se planteó el cálculo debido a que al incrementar el espesor de aislante no se consigue una reducción de temperatura significativa. Se considera que esta temperatura sigue siendo segura para el operario.

2.4.3. RESULTADOS Y PERFIL DE TEMPARATURA

Los resultados finales de las temperaturas calculadas para cada superficie entre los materiales y previamente ilustradas en la figura 2.3 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Temperaturas Calculadas

	Temperatura [°C]
T_{si} (interior)	1350
T1	1337,2
T2	632,8
T3	553,6
T4	117,6
T[∞]_e (exterior)	16

A continuación se muestra el perfil de variación de las temperaturas desde superficie interior de la cámara a 1350°C hasta la capa exterior.

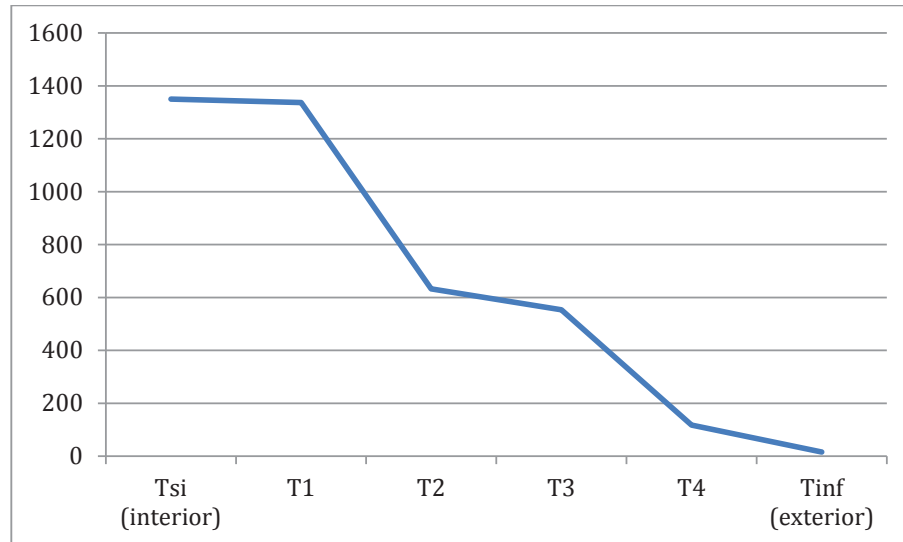


Figura 2.4. Perfil de temperatura en las paredes del revestimiento.

2.4.4. CALOR TOTAL PERDIDO A TRAVÉS DE LAS PAREDES

Una vez que se han dimensionado los espesores de las capas del revestimiento se procede a calcular el calor perdido a través de las paredes para el cálculo de la potencia.

2.4.4.1. Calor perdido a través de las paredes verticales

El calor perdido a través de las paredes verticales depende del calor de conducción calculado anteriormente q_k y el área promedio de transferencia de calor A_m , se calcula utilizando la ecuación:

$$Q_1 = q_k * A_m$$

[Ec. 2.11]

(Astigárraga, 1995)

El área de transferencia de calor para hornos pequeños y medianos se determina como la media geométrica entre el área de la cámara y el área de la última capa de la pared compuesta (Astigárraga, 1995).

$$A_m = \sqrt{A_i * A_e}, \quad \text{si} \quad \frac{A_e}{A_i} > 2$$

[Ec. 2.12]

(Astigárraga, 1995)

Dónde:

A_m : área promedio de transferencia de calor.

A_i : área de la cámara interior, para una sola pared es 0,16 m².

A_e : área exterior, para una sola pared es 0,488 m².

Por lo tanto, el área total para determinar el calor perdido por las cuatro paredes verticales según la ecuación 2.12 es:

$$A_m = 1,12 \text{ m}^2$$

Entonces según la ecuación 2.11 el calor perdido a través de las paredes verticales Q_1 tiene un valor de:

$$Q_1 = 1603 \text{ [W]}$$

2.4.4.2. Calor perdido a través de las paredes horizontales

El calor se pierde además por las paredes horizontales, es decir, la base y el techo de la cámara, para estos casos el análisis de la transferencia de calor hace referencia a otros modelos.

El calor perdido por la superficie horizontal superior Q_2 está dado por:

$$Q_2 = h_{cr} * A_m * (T_{sc} - T_{\infty})$$

[Ec. 2.13]

(Astigárraga, 1995)

Donde

$$h_{cr} = \frac{Nu * k}{L}$$

[Ec. 2.14]

(Kreith, 2011)

Para los valores determinados de número de Nusselt, conductividad térmica y espesor de pared se tiene:

$$h_{cr} = 7,37 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Para este caso el número de Nusselt y el de Grashof se calculan de acuerdo a las siguientes relaciones.

$$Nu = 0,27 * Ra_L^{\frac{1}{4}} = 0,27 * (Gr * Pr)^{1/4}$$

[Ec. 2.15]

(Kreith, 2011)

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sc} - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2}$$

[Ec. 2.16]

(Kreith, 2011)

La longitud característica L para la pared horizontal superior es de 0,8 m.

Las propiedades son evaluadas a la temperatura promedio $T_p = \frac{T_{sec} - T_{\infty}}{2} = 340 K$

Al reemplazar los valores en la ecuación 2.13 correspondiente al calor perdido por la pared horizontal superior Q_2 se obtiene el resultado de:

$$Q_2 = 209,86 [W]$$

El calor perdido por la pared horizontal inferior Q_3 está dado al igual que en el caso anterior, por la ecuación 2.13.

$$Q_3 = h_{cr} * A_m(T_{sc} - T_{\infty})$$

Donde el número de Nusselt se calcula de acuerdo a la ecuación 2.15.

$$h_{cr} = \frac{Nu * k}{L}$$

Para los valores determinados de número de Nusselt, conductividad térmica y espesor de pared se tiene:

$$h_{cr} = 2,18 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Nuevamente las propiedades se evalúan a la temperatura de película T_p , la longitud característica es la misma que para el caso anterior.

La longitud característica L para la pared horizontal inferior es de 0,8 m.

El número de Nusselt varía pero el de Grashof es el mismo de la ecuación 2.16.

$$Nu = 0,15 * Ra_L^{1/3} = 0,15 * (Gr * Pr)^{1/3}$$

[Ec. 2.17]

(Kreith, 2011)

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sc} - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2}$$

Al reemplazar los valores en la ecuación 2.13 correspondiente al calor perdido por la pared horizontal inferior Q_3 se obtiene el resultado de:

$$Q_3 = 61,9 [W]$$

Por lo tanto, el calor total perdido a través de las paredes del revestimiento Qk hacia el ambiente es:

$$Qk = Q1 + Q2 + Q3$$

[Ec. 2.18]

$$Qk = 1874,8[W]$$

2.4.5. CÁLCULO DEL CALOR TRANSMITIDO A LA CARGA

La transferencia de calor hacia la carga se determinará en condiciones de régimen estacionario de funcionamiento y considerando que en estas condiciones la convección es despreciable, por lo tanto, el calor se transmite hacia la carga solamente por radiación.

$$Q_r = A_{sc} * \sigma * F_{1-2} * (T_i^4 - T_c^4)$$

[Ec. 2.19]

(Astigárraga, 1995)

Donde

Q_r : Calor transmitido a la carga.

A_{sc} : Área superficial de la carga.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67E-08 [W/m^2 \cdot K^4]$

F_{1-2} : Factor de forma.

T_i : Temperatura de la pared radiante en Kelvin, 1623 [K].

T_{ca} : Temperatura de la carga en Kelvin, se considera un gradiente de temperatura de 20 °C, por lo tanto T_c es 1603 [K.]

La disposición de la carga en el interior de la cámara es como se muestra en la figura 2.5, en la cual la carga está completamente cubierta por la superficie radiante.

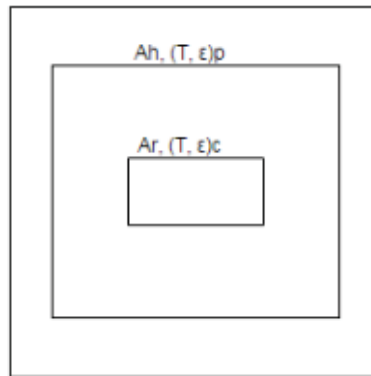


Figura 2.5. Configuración de la carga para calcular el factor de forma.

El factor para la configuración geométrica mostrada en la figura 2.3 se calcula por la siguiente relación:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{A_{sc}}{A_h} \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right)$$

[Ec. 2.20]

(Kreith, 2011)

Donde

ε_c : Emisividad de la carga, como las piezas a realizarse el tratamiento se cubre con una superficie protectora de carbón dentro de un recipiente por lo que la emisividad es 0.8.

ε_p : Emisividad de la pared, para el material refractario 0.9.

A_h : Superficie radiante, para el caso actual son 6 paredes de 0,16 m² cada una por lo que el área total es 0.96 m².

A_{sc} : Área superficial de la carga.

En hornos pequeños y medianos el área superficial de la carga difícilmente supera el 50% del área superficial radiante (Astigárraga, 1995), por lo tanto según la ecuación 2.20, el factor de forma es:

$$F_{1-2} = 0.766$$

El calor finalmente según la ecuación 2.19 es:

$$Q_r = 7[kW]$$

2.4.6. CÁLCULO DEL CALOR TOTAL ACUMULADO

El calor acumulado al llevar cada uno de los materiales desde la temperatura ambiente hasta la temperatura promedio entre la cara caliente y fría se determina por la siguiente relación:

$$Q_{acc} = \sum_i \rho_i * \forall_i * c_{pi} * \left(\frac{T_{cc} + T_{cf}}{2} - T_{amb} \right)$$

[Ec. 2.21]

(Astigárraga, 1995)

Donde

Q_{acc} : Calor total acumulado en las paredes del revestimiento, en la cámara y la carga.

ρ_i : Densidad de cada uno de los materiales.

c_{pi} : Calor específico de cada uno de los materiales.

\forall_i : Volumen que ocupa cada material.

T_{cc} : Temperatura en la cara caliente para cada material.

T_{cf} : Temperatura en la cara fría para cada material.

T_{amb} : Temperatura ambiente, 16 °C.

Las temperaturas de la cara caliente y fría para cada material se las obtiene de la tabla 2.3, mientras que las propiedades como la densidad y el calor específico se

las puede obtener de la tabla 2.1. Para el cálculo del volumen de cada uno de los materiales se realiza de acuerdo al esquema que se muestra en la siguiente figura 2.6, considerando el espesor respectivo para cada una de las paredes.

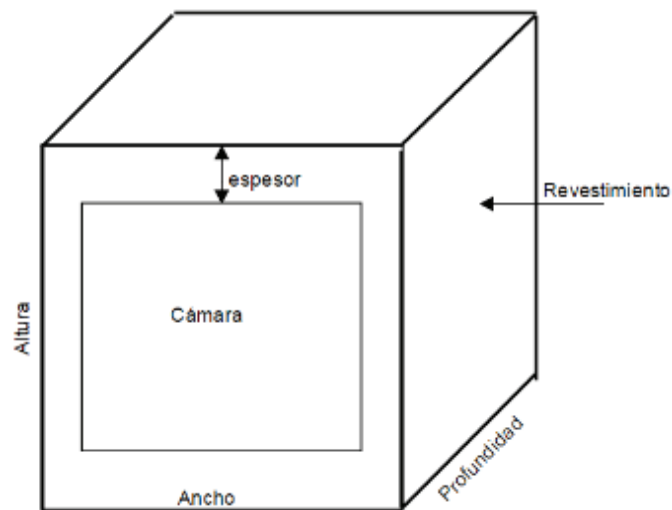


Figura 2.6. Esquema para el cálculo del volumen.

La tabla 2.5 se muestra el cálculo del calor acumulado en las paredes del revestimiento Q_{acc1} .

Tabla 2.5. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento.

Material	Volumen [m ³]	Calor específico [J/Kg*K]	Densidad [m ³]	T _p [°C]	Calor acumulado [J]
Cóngrax 1500	1,79E-02	1000	1850	1327,60	4,39E+07
Ladrillo UA 23	1,91E-01	1050	730	968,99367	1,42E+08
Fibro cemento	2,40E-02	860	1500	577,20	1,79E+07
Aire	0,4324	1051,27	0,565	608,55	1,56E+05
Fibra cerámica	2,22E-02	1300	288	717,83	5,97E+06
Plancha de Acero	4,47E-03	460	7600	50,825	7,94E+05
Qacc1					2,11E+08

En la tabla 2.6 se muestra el cálculo del calor acumulado o transmitido a la cámara y a la carga Q_{acc2} .

Se debe considerar el calor acumulado en el interior de la cámara y se considera un volumen para la carga del 75% el volumen de la cámara.

Tabla 2.6. Cálculo del calor transmitido a la cámara y la carga.

Material	Volumen [m ³]	Calor específico [J/Kg*K]	Densidad [m ³]	T _p [°C]	Calor acumulado [J]
Cámara (aire)	0,064	0,269	1139	1334,00	2,62E+04
Carga (acero)	0,048	460	1760	1334,00	5,18E+07
Qacc2					5,19E+07

Con los valores obtenidos en la tabla 2.5 y la tabla 2.6 se obtiene el calor total acumulado Q_{acc} .

$$Q_{acc} = 2,62 * 10^8 [J]$$

Para asegurar un calentamiento uniforme en el interior de la cámara se considera una velocidad de calentamiento de 3 °C por minuto, con este valor se alcanzará la temperatura máxima en 450 minutos y el flujo de calor para calentar las paredes del revestimiento, la cámara y la carga se obtiene al dividir el calor acumulado por este tiempo.

$$\dot{Q}_{acc} = \frac{Q}{t} [J/s]$$

[Ec. 2.22]

(Cengel, 2007)

$$\dot{Q}_{acc} = 9,72[KW]$$

2.5. CÁLCULO DEL ESTADO TRANSITORIO

Una vez finalizado el cálculo de los espesores de las capas del revestimiento horno en el estado estable, con los resultados obtenidos se procede a realizar el análisis del comportamiento del sistema en estado transitorio.

2.5.1. CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO TRANSITORIO

Para el análisis del estado transitorio se considera que las propiedades físicas de los materiales son constantes, por lo que se considera un promedio para el análisis, un espesor equivalente de la pared del revestimiento que es el espesor total del determinado durante el diseño de las paredes del revestimiento, una temperatura uniforme tanto para la pared equivalente como para el interior de la cámara, la transferencia de calor puede ocurrir por conducción, convección y radiación de acuerdo al rango de temperatura de trabajo en la cámara del horno, para el presente estudio debido a que la temperatura sobrepasa los 1000 °C es necesario considerar la radiación.

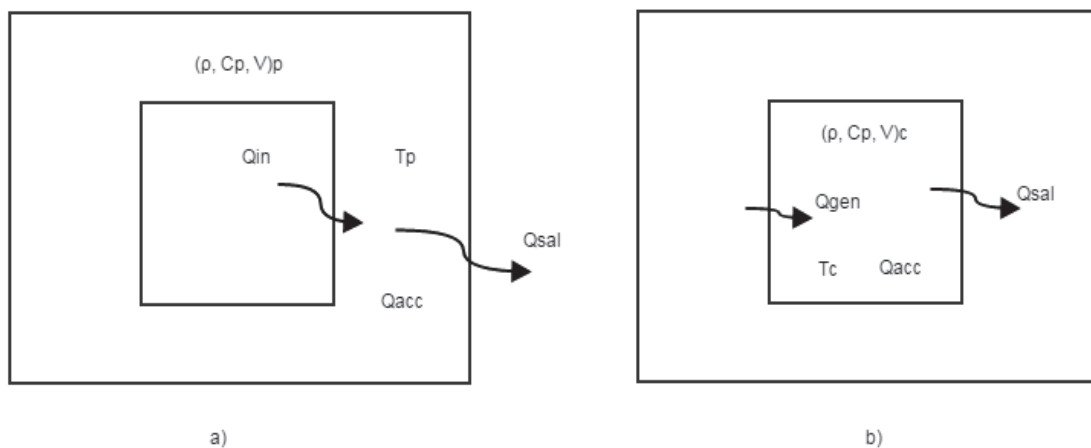


Figura 2.7. Sección transversal del horno.

Durante el funcionamiento de un horno calentado por resistencia eléctrica se muestra que la energía se pierde tanto en la cámara del horno como en otros componentes del horno tales como las paredes del revestimiento (Zghair, 2006).

Para el siguiente análisis se realizará un balance de energía en la cámara y en las paredes de forma complementaria, por lo tanto, el conjunto de ecuaciones aplicadas en el funcionamiento del horno incluyen la primera ley de la termodinámica Ec. 2.23.

$$Q_{en} + Q_{gen} - Q_{sal} = Q_{acc}$$

[Ec. 2.23]

Los términos Q_{en} y Q_{sal} representan el flujo de calor interno y externo respectivamente, los cuales son proporcionales al área superficial como resultado de la convección Ec. 2.24 y radiación Ec. 2.25, el área superficial de radiación es la mitad del área de convección, para el caso de la radiación el coeficiente de transferencia de calor por radiación está dado por la Ec. 2.14.

$$Q_c = h_c * A_c * (T_p - T_c)$$

[Ec. 2.24]

$$Q_r = h_r * A_r * (T_p - T_c)$$

[Ec. 2.25]

El término Q_{gen} en la Ec. 2.23 es el calor relacionado con la conversión de la potencia eléctrica P en calor por el efecto Joule que se calcula mediante la Ec. 2.26, donde I es la corriente a través del elemento calefactor y R la resistencia del elemento calefactor.

$$P = I^2 * R$$

[Ec. 2.26]

El término Q_{acc} de la Ec. 2.23 es el calor acumulado en el medio (revestimiento y cámara) y se calcula mediante la Ec. 2.27, donde ρ , C_p y V , son la densidad, calor específico a presión constante y el volumen del medio, para el caso de la pared la densidad y el calor específico es la suma de cada componente del revestimiento respectivamente.

$$Q_{acc} = \rho * C_p * V \frac{dT}{dt}$$

[Ec. 2.27]

Aplicando el balance de energía dado por la Ec. 2.23 a la cámara del horno con referencia a la Figura 2.5-b, se tiene:

$$P - h_c * A_c * (T_p - T_c) - h_r * A_r * (T_p - T_c) = \rho_c * C_{p_c} * V_c \frac{dT_c}{dt}$$

[Ec. 2.28]

La Ec. 2.28 representa el estado transitorio, reduciendo a un solo coeficiente de transferencia de calor conjugado de radiación y convección se obtiene la siguiente expresión:

$$P - h_{cr} * A_{cr} * (T_p - T_c) = \rho_c * C_{p_c} * V_c \frac{dT_c}{dt}$$

[Ec. 2.29]

Al considerar el estado estable en la Ec. 2.29 se tiene lo siguiente:

$$P_e - h_{cr} * A_{cr} * (T_{pe} - T_{ce}) = \rho_c * C_{p_c} * V_c \frac{dT_{ce}}{dt} = 0$$

[Ec. 2.30]

En donde los términos con el subíndice *e* corresponden al estado estable. Substrayendo la ec. 2.29 de la ec. 2.30 y utilizando una comilla sobre los símbolos para indicar la diferencia los términos del estado estable y el transitorio se tiene finalmente:

$$Q' - h_{cr} * A_{cr} * (T'_p - T'_c) = \rho_c * C_{p_c} * V_c \frac{dT'_c}{dt}$$

[Ec. 2.31]

Dividiendo la ecuación 2.31 para el término $(h_{cr} * A_{cr})$, tomando la transformada de Laplace y despejando para la temperatura de la cámara T_c :

$$T'_c(s) = \frac{Q'(s)}{\tau_1 s + 1} + \frac{T'_p(s)}{\tau_1 s + 1}$$

[Ec. 2.32]

Al aplicar la ecuación 2.23 a la pared, al referirse a la Figura 2.5-a y seguir el mismo procedimiento finalmente se llega a obtener la siguiente ecuación:

$$T'_p(s) = \frac{K_1}{\tau_2 s + K_1 + 1} T'_c(s) + \frac{1}{\tau_2 s + K_1 + 1} T_{amb}(s)$$

[Ec. 2.33]

Reemplazando la ecuación 2.33 en la ecuación 2.32 obtenemos la variación de la temperatura en el interior de la cámara con el tiempo.

$$T'_c(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 K_1 + \tau_1 + \tau_2)s + 1} Q''(s) + \frac{1}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 K_1 + \tau_1 + \tau_2)s + 1} T_{amb}(s)$$

[Ec. 2.34]

Donde las constantes se determinan por medio del conjunto de ecuaciones 2.35.

$$\tau_1 = \frac{\rho_c * Cp_c * V_c}{A_{cr} * h_{cr}}$$

$$\tau_2 = \frac{\rho_p * Cp_p * V_p}{(A_p * h_{cr})_{exterior}}$$

$$K_1 = \frac{A_{cr} * h_{cr}}{(A_p * h_{cr})_{exterior}}$$

$$K = K_1 + 1$$

$$\tau = \frac{\tau_2}{K}$$

[Ec. 2.35]

Para validar el modelo matemático dado por la Ec. 2.34 se considerará el diseño de los componentes del horno y las dimensiones de diseño de la cámara, las propiedades físicas de los materiales y las dimensiones se obtuvo en el dimensionamiento del revestimiento. El volumen y el área tanto de la cámara como de la pared compuesta están dados por el conjunto de ecuaciones 2.36, donde l , w , h y e son el largo, el ancho, la altura y el espesor de la pared compuesta respectivamente.

$$V_c = l * w * h$$

$$V_p = (l + 2e)(w + 2e)(h + 2e) - V_c$$

$$A_c = 2(l * h + l * w + w * h)$$

$$A_r = l * h + l * w + w * h$$

$$A_{cr} = A_c + A_r$$

$$A_p = 2[(l + 2e)(h + 2e) + (l + 2e)(w + 2e) + (w + 2e)(h + 2e)]$$

[Ec. 2.36]

Se realiza un programa en el software Matlab/Simulink para simular la Ec. 2.34 con un volumen de cámara $V_c = 40*40*40 \text{ cm}^3$ y un espesor de pared de revestimiento $e = 42.67 \text{ cm}$ conforme las dimensiones del horno obtenidas del cálculo en estado estable realizado anteriormente.

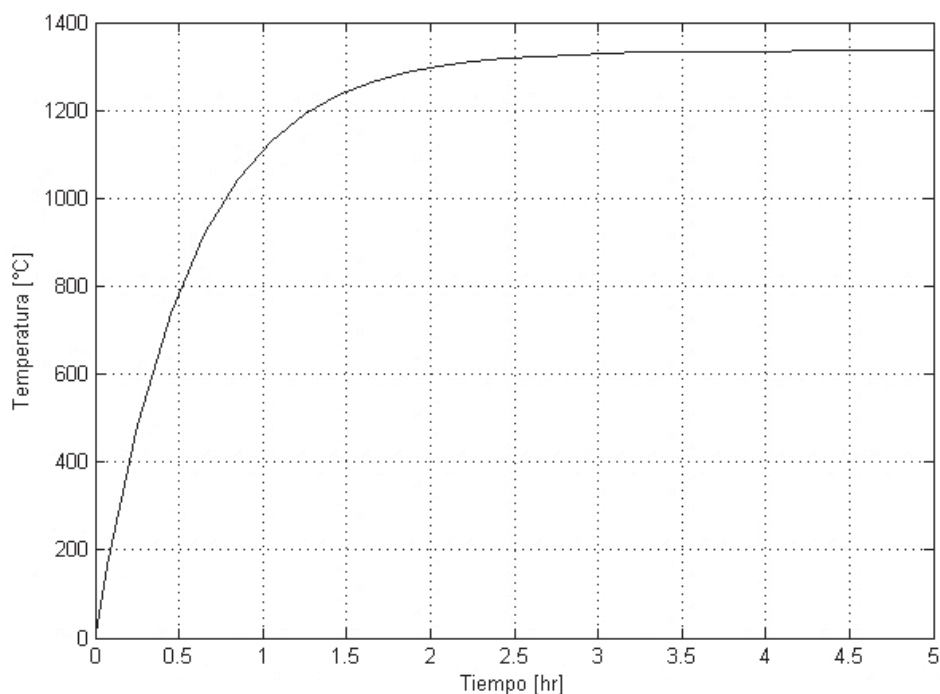


Figura 2.8. Relación entre la Temperatura (T) y el tiempo (t) del horno.

En la figura 2.8 se puede observar la variación de la temperatura con el tiempo, la respuesta muestra que el sistema es sobre amortiguado, el tiempo necesario para llegar a la temperatura de 1350 °C es de alrededor de 2 horas y media.

2.5.2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

La potencia que las resistencias eléctricas deben suministrar, además de suplir la energía dirigida al tratamiento térmico, también debe entregar la energía correspondiente a las pérdidas de calor a través de las paredes del horno, es decir, la energía para calentar todas las capas del horno y el aire en el interior de la cámara.

Por lo tanto la potencia total requerida para es:

$$P = \dot{Q}_{acc} + Q_k$$

[Ec. 2.37]

Donde:

P : es la potencia total requerida para el horno

\dot{Q}_{acc} : es el calor total acumulado por unidad de tiempo.

Qk : es el flujo de calor que se pierde hacia el ambiente.

Por lo tanto la potencia total tiene un valor de

$$P = 11,6 [KW]$$

En el diseño posterior se trabajará a partir de 12 KW.

2.5.3. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL HORNO

Para determinar la eficiencia del horno se considera el calor que requiere por una hora.

$$\eta = \frac{P[Kw - hr]}{Qr [Kw - hr]}$$

[Ec. 2.38]

(Astigárraga, 1995)

Donde P es la potencia del horno y Qr el calor transmitido a la carga que se calculó anteriormente. Reemplazando los valores de las variables se obtiene una eficiencia de:

$$\eta = 60\%$$

2.6. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

El calentamiento por resistencias eléctricas se fundamenta en el efecto joule, en donde la potencia eléctrica absorbida por los elementos resistivos es disipada al medio en forma de calor.

$$Q = I^2 \times R \times t$$

Donde:

Q : Calor disipado

R : Resistencia del elemento calefactor.

I_c : Intensidad de corriente a través del elemento calefactor.

t : Tiempo

[Ec. 2.39]

(Astigárraga, 1995)

2.6.1. CONSIDERACIONES Y ECUACIONES A UTILIZARSE EN EL CÁLCULO

La potencia máxima que se puede alcanzar en el interior de la cámara de un horno de calentamiento por resistencias depende de la disposición de las mismas y de la temperatura máxima.

La figura 4 del Anexo 5 muestra el valor de dicha potencia máxima recomendada para cuatro tipos de elementos calefactores, al referirnos a la curva (a) de la figura y con el valor de la potencia del horno que ya es conocida (12KW) y la temperatura máxima 1350 °C se obtiene que el área mínima que debe estar cubierta por las resistencias eléctricas es de 0,55 m² aproximadamente.

Las fórmulas que se usan generalmente para determinar el diámetro del alambre de una sola resistencia son:

$$R_{20} = \rho_R * \frac{4 * L_R}{\pi * d^2}$$

[Ec. 2.40]

(KANTHAL, 2003)

La resistencia de un conductor R_{20} (resistencia del elemento calefactor a 20°C) de diámetro d , es proporcional a su longitud L_R e inversamente proporcional a la sección transversal. La constante de proporcionalidad ρ_R es la resistividad del

material y es dependiente de la temperatura. Las unidades de la resistividad en el SI está dada en $[\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}]$.

Como la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal se considera el coeficiente de temperatura C_t que se define como la relación entre la resistencia a una cierta temperatura R_t y la resistencia a $20\text{ }^\circ\text{C}$ R_{20} y su valor se encuentra en tablas para varias aleaciones.

$$C_t = \frac{R_t}{R_{20}}$$

[Ec. 2.41]

(KANTHAL, 2003)

El área superficial radiante A_{sr} de las resistencias en $[\text{cm}^2]$ es:

$$A_{sr} = \pi * d * L_R * 10$$

[Ec. 2.42]

(KANTHAL, 2003)

Un dato muy importante es la carga específica del elemento de calefacción p $[\text{W}/\text{cm}^2]$, definida como la relación entre la potencia disipada por el conductor y el área superficial radiante que, al igual que para la potencia máxima en las mismas disposiciones del conductor se puede determinar su valor para diferentes aleaciones:

$$p = \frac{P_d}{A_{sr}}$$

[Ec. 2.43]

(KANTHAL, 2003)

Combinando las anteriores ecuaciones se llega a la relación para calcular el diámetro del alambre d :

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 * P * \rho}{\pi^2 * p * R_{20} * 10}}$$

[Ec. 2.44]

(KANTHAL, 2003)

2.6.2. DISPOSICIÓN Y CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS

De la figura para la potencia máxima se determinó el área mínima que debe cubrirse con las resistencias, el valor es de 0,55 m². De acuerdo a esto y al valor fijado para las dimensiones de la cámara y considerando que siempre es recomendable que las resistencias se dispongan en las paredes laterales del horno, justamente son estas donde se colocarán las resistencias.

Debido a que los sistemas de calentamiento trifásicos son los más eficientes cuando funcionan con cargas balanceadas, la conexión de las resistencias se hace en delta balanceado con una alimentación trifásica de 220 V.

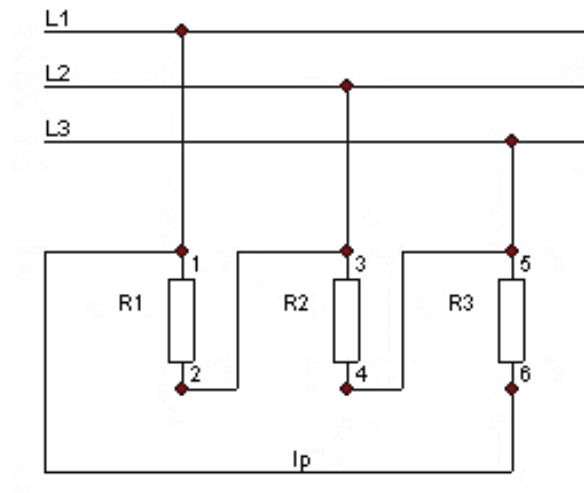


Figura 2.9. Esquema de conexión en delta de tres resistencias a 220 V trifásico.

Entonces ya con todos los parámetros especificados se procede a calcular la potencia disipada por cada elemento resistivo considerando que el sistema es

balanceado, es decir, que todas las resistencias son iguales, por lo tanto, para un sistema trifásico la potencia disipada por una resistencia es:

$$P_t = 1.73 * V_L * I_L$$

[Ec. 2.45]

(KANTHAL, 2003)

Donde:

P_t : Potencia total del horno, 12 [KW]

V_L : Voltaje entre fases, es igual a V_P que se muestre en la figura, 220 [V]

I_L : Intensidad corriente en cada línea, es igual a 1,73 I_P

$$I_L = 1.73 * I_P$$

[Ec. 2.46]

(KANTHAL, 2003)

I_P : Intensidad de corriente que pasa por cada resistencia

Despejando para I_L de la ecuación 2.25

$$I_L = \frac{P_t}{1.73 * V_L}$$

[Ec. 2.47]

(KANTHAL, 2003)

Reemplazando los valores numéricos se tiene:

$$I_L = 31,53[A]$$

$$I_P = \frac{I_L}{1.73} = 18,22[A]$$

El valor de la resistencia está dado por la ecuación:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{3 * V_L^2}{P_t}$$

[Ec. 2.48]

(KANTHAL, 2003)

$$R_1 = 12,1[\Omega]$$

La potencia disipada por cada elemento

$$P = (I_p)^2 * R_1$$

[Ec. 2.49]

(KANTHAL, 2003)

$$P = 4[KW]$$

Para el cálculo del diámetro del alambre de resistencia se necesita determinar el tipo de aleación para la resistencia.

La aleación seleccionada tomando en cuenta la temperatura que se necesita alcanzar en la cámara del horno, es el Kanthal-A1 que tiene una resistividad de $1,05 [\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}]$ y la carga específica obtenida de la figura para la disposición de la curva (a) es de $2 [\text{W}/\text{cm}^2]$, por lo tanto, el diámetro del alambre al reemplazar los valores en la ecuación 2.44 es:

$$d = 1,9[\text{mm}]$$

El diámetro del alambre que se selecciona es de 2 mm (disponible en el mercado).

A continuación se procede con el cálculo de la carga térmica de la resistencia cm^2/Ω , para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$cm^2/\Omega = \frac{I^2 * C_t}{p} = \frac{P^2 * C_t}{V^2 * p}$$

[Ec. 2.50]

(KANTHAL, 2003)

Reemplazando los valores correspondientes de las propiedades del Kanthal A1 y según la gráfica del Anexo 5 de la curva (a) se tiene que el mínimo valor de la carga térmica de la resistencia es 2 [W/cm²], por lo tanto se obtiene:

$$cm^2/\Omega = 173,33$$

De la tabla del Anexo 6 se observa que el valor correspondiente del diámetro para el valor calculado es de 2,2 mm; pero el diámetro existente en distribución es de 2mm, por lo tanto, se escoge este valor.

Una vez calculada la carga térmica de la resistencia y conocido el valor del diámetro del alambre; se proceden a calcular los valores de longitud total del alambre, diámetro de las espiras y el paso entre espiras, que son aspectos fundamentales en la construcción de las resistencias. La longitud total del alambre por cada resistencia está dada por la siguiente ecuación:

$$L_T = \frac{P}{\pi * d * p}$$

[Ec. 2.51]

(KANTHAL, 2003)

Pero se puede obtener el valor de una forma más rápida:

$$L_T = \frac{R_1}{\Omega/m}$$

[Ec. 2.52]

(KANTHAL, 2003)

$$L_T = 31,76 [mm]$$

A continuación se procede a calcular el diámetro de las espiras D , en el Anexo 5 para determinar la carga térmica se obtiene los valores recomendados para el cálculo del diámetro de cada espira:

$$D = (5 - 8) * d$$

[Ec. 2.53]

(KANTHAL, 2003)

Además se tiene una fórmula adicional para el cálculo del paso entre espiras S :

$$s = (2 - 3) * d$$

[Ec. 2.54]

(KANTHAL, 2003)

Tomando los valores intermedios se tiene que el diámetro de la espira D y el paso s tienen los siguientes valores.

$$D = 6 * d = 12 [mm]$$

$$s = 3 * d = 6 [mm]$$

Finalmente el manual del KANTHAL presenta fórmulas para el cálculo del número total de espiras, longitud de la bobina con las espiras comprimidas y longitud de la bobina con las espiras extendidas; estos valores posteriormente serán de utilidad en la construcción de las resistencias.

Número de espiras (N):

$$N = \frac{L_T}{\pi * (D + d)}$$

[Ec. 2.55]

(KANTHAL, 2003)

$$N = 727,6[\text{espiras}]$$

Longitud de la espira comprimida (L_w):

$$L_w = N * d$$

[Ec. 2.56]

(KANTHAL, 2003)

$$L_w = 1455[\text{mm}]$$

Longitud de la espira extendida (L_e):

$$L_e = N * s$$

[Ec. 2.57]

(KANTHAL, 2003)

$$L_e = 4365[\text{mm}]$$

2.7. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL

Los sistemas de control automático son aquellos que están constituidos por un conjunto de sistemas físicos conectados o relacionados entre sí, de tal manera que regulen su actuación por sí mismos, es decir sin la intervención de factores externos (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presente durante su operación.

En la actualidad, desde un mecanismo hasta una planta industrial presenta una parte actuadora que corresponde al sistema físico que realiza la acción y una parte de mando o control generadora de las órdenes de realización o no realización de una acción específica.

Lógicamente el sistema de control reemplaza a la acción del ser humano por medio de un circuito eléctrico, electrónico o en sistemas modernos por medio de un ordenador o la combinación de los mismos.

En los procesos industriales, las actividades en el hogar y para el desarrollo científico e investigación los sistemas de control en la actualidad juegan un papel muy importante mejorando nuestra calidad de vida.

2.7.1. SISTEMAS DE CONTROL DE HORNOS ELÉCTRICOS

Los sistemas de control automático por medio de un PLC se pueden resumir mediante un diagrama de bloques en el cual se muestra la relación entre los diferentes elementos que componen el circuito de control y potencia.

En la figura 2.10 se muestra la relación entre la señal de entrada que es ingresada por el usuario y que determina la rampa de temperatura para cada proceso. Para realizar el control se utiliza un PLC, la salida On/Off que emite el PLC a la salida tipo relé permite controlar un contactor dependiendo si se requiere prender o apagar las resistencias. La temperatura se mide mediante una termocupla que es la señal de realimentación, el valor proporcionado por elemento sensor se compara con el valor de entrada para que el PLC realice la acción de corrección.

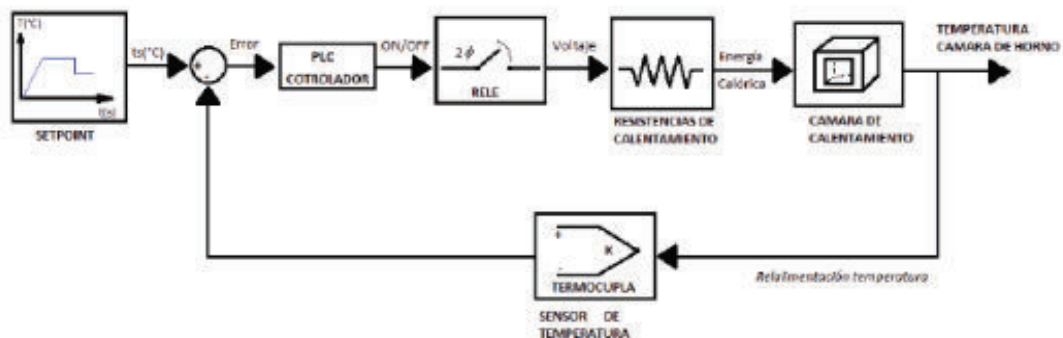


Figura 2.10. Diagrama de bloques de un control automático para hornos de resistencia.

Generalmente el control de temperatura de un horno es el control PID. Cuando el valor medido de la temperatura es diferente de la temperatura fijada, la orden de entrada para el calentamiento o el enfriamiento es controlado para minimizar el error.

El controlador PID por lo general utiliza la siguiente ecuación para el lazo de control.

$$u = P * [(Ts - To) + D \frac{d}{dt}(Ts - To) + I \int (Ts - To)dt]$$

Ec. [2.58]

(Purushothaman, 2008)

Donde u es la salida del controlador, T_s es la temperatura fijada (set point), T_o es la temperatura del horno medida, el valor del error $E = (T_s - T_o)$; P, D e I son respectivamente la ganancia proporcional, el factor de amortiguamiento y la ganancia integral. Durante el funcionamiento del control PID una de las cosas más importantes es fijar los valores de las constantes P, D, e I.

Al fijar estas constantes como la suma ponderada de los términos proporcional, integral y derivativo produce una salida del controlado que impulsa constantemente la variable del proceso en la dirección requerida para eliminar el error. Existen muchos métodos que pueden usarse para determinar el valor de las constantes P, D, e I, uno de los métodos es la aproximación de Ziegler y Nichols, el cual es un método práctico de estimación de los valores K, T y d experimentalmente (Purushothaman, 2008).

En la que K es la ganancia del proceso que representa la magnitud de los efectos del control en la variable del proceso, T es la constante de tiempo del proceso que representa la severidad del retraso en el proceso, y la d es el tiempo de inactividad o tiempo muerto representa otro tipo de retraso presente en muchos procesos.

Con el controlador en el modo manual (sin realimentación), un cambio se introduce en la salida del controlador y se analiza la reacción del proceso. La ganancia del proceso P puede aproximarse al dividir el cambio neto de la variable del proceso para el valor del cambio generado en el controlador; para determinar

el valor de la constante d se calcula la máxima pendiente de la curva y se utiliza la inversa de esta pendiente para determinar el valor de la constante T .

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1.2T}{K * d} \\ I &= \frac{0.6T}{K * d^2} \\ D &= \frac{0.6T}{K} \end{aligned} \right\}$$

[Ec. 2.59]

Con el conjunto de Ec. 2.59 y la prueba en vacío se determinará las constantes del controlador PID, esto se lo deja para más adelante.

2.7.2. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

En el equipo de regulación de temperatura se distinguen tres partes fundamentales: Elemento de medición y control el cual recibe la señal del termopar y envía una señal de actuación, elemento detector de la señal o termopar y elemento regulador, el cual recibe la señal y actúa sobre la entrada de corriente en los hornos calentados por resistencia.

2.7.2.1. Elemento de medición y control

El laboratorio de tratamientos térmicos actualmente cuenta con un control automático para controlar los parámetros principales del régimen de cada uno de los tratamientos térmicos que se realizan en el laboratorio como son: Velocidad de calentamiento, tiempo de permanencia y temperatura de calentamiento. Además permite la adquisición de datos y establecer rampas de permanencia cuando se requiera, el control se realiza a través de un PLC SIMATIC s7 1200 AC/DC/Relay de Siemens.

La instalación del sistema de control a través del PLC fue parte del proyecto de titulación realizada por los Sres. William De la Vega y Sergio Enríquez. En el presente capítulo se implementará el sistema de control siguiendo procedimientos establecidos en el proyecto para la programación del PLC.

Las características del PLC 214-1BG31-0XB0 de Siemens son: Número de entradas digitales 14, con alimentación de 24 V DC, estas entradas se utilizan para los pulsadores de paro y reinicio y diez salidas digitales tipo relé, soporte de 10 A, estas salidas se utilizan para encender los hornos y las luces piloto de los hornos.

Además se tienen: 2 entradas análogas, la alimentación general del PLC entre 85-264V AC, software de programación TIA Portal V12, software de programación HMI es Wincc, frecuencia de trabajo entre 47-69 Hz y memoria de trabajo 50 KB. En el anexo 16 se muestran más características técnicas referentes al PLC.

La señal de la termocupla que se emplea para medir la temperatura del horno es recibida por el módulo de expansión que está diseñado para aceptar termocuplas del tipo N, R, S, J, T, K, C y TXK-XK (L). Estos módulos van ubicados junto al PLC y la conexión de la termocupla se lo hace teniendo en cuenta la polaridad de los terminales como se indica en la siguiente figura 2.11.

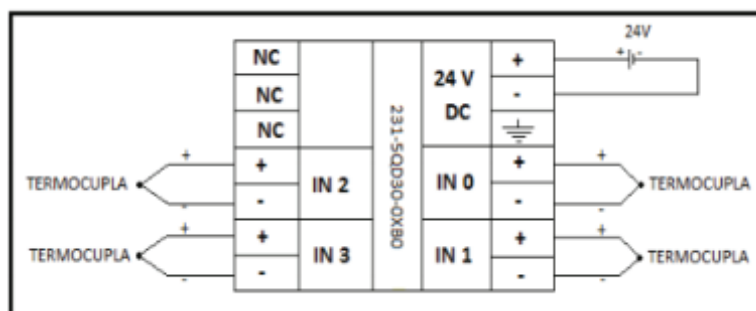


Figura 2.11. Conexión de termocuplas en los módulos 231-5QD30-0BX0

2.7.2.2. Elemento de medición (termocupla)

La selección de la termocupla se lo hace considerando que la temperatura de trabajo está por encima de los 1200 °C y las entradas de sensor admitidas por el equipo de medición.

Por lo tanto, de la tabla del Anexo 15 se selecciona una termocupla del tipo K que es una aleación de Cromel-Alumel como la más adecuada para la medición de la

temperatura del horno. El termopar tipo K es recomendable en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo entre 500 °C y 1450 °C (Creus, 1997).

2.7.2.3. Elemento regulador

El elemento regulador es el encargado de apagar o encender las resistencias según la señal que reciba del PLC permitiendo o cortando el paso de la corriente eléctrica el estado se indica por las luces piloto. Para la selección del elemento regulador se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

De acuerdo a la categoría de empleo o el tipo de aplicación, se selecciona un contactor tripolar AC1 para hornos de resistencias con cargas no inductivas o débilmente inductivas con un voltaje de alimentación de 220V fuente trifásica, frecuencia de trabajo 60 Hz, potencia nominal de la carga 12 KW y servicio intermitente clase 1 con un número elevado de maniobras por hora 120 M/h.

Además se considera un número de polos auxiliares 2NC + 2NO, tensión de alimentación 220V y 60 Hz y la bobina de excitación con una alimentación entre 120-220V, 60 Hz. Para mayor detalle revisar el Anexo 10.

2.7.3. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

Los elementos de protección son los encargados de proteger al circuito de sobrecargas ya sea en el sistema de alimentación o en el sistema de control, estos elementos están seleccionados de acuerdo a los requerimientos técnicos como lo son valores de voltaje y corriente principalmente, además de otras características importantes que se mencionarán para cada uno de los elementos.

2.7.3.1. Interruptor termo magnético

Es un elemento que se encarga de abrir el sistema si detecta una sobre corriente durante un determinado tiempo de acuerdo a la curva de disparo característica, protegiendo de esta manera a los elementos que conforman el circuito de potencia del horno.

Los criterios para la selección del elemento de protección son los siguientes: El voltaje de alimentación 220V fuente trifásica, la corriente en la línea es de 32A y frecuencia de trabajo 60 Hz, la curva de disparo es del tipo B para cargas puramente resistivas y una capacidad de corte entre 6-40 A. (Anexo 13)

2.7.3.2. Relé 120 Vac

Este elemento sirve de protección para la llegada de señal desde el PLC al dispositivo de mando para realizar la acción requerida, las características requeridas son: El tipo de relé requerido: Electromagnético, con un voltaje de alimentación a la bobina de 120V AC, corriente máxima en los contactos 5A, temperatura de trabajo: -55 °C-70 °C, resistencia del inductor de 4.5 K Ω y número de pines 14. Las demás características así como dimensiones y formas de conexión se muestran en el anexo 12.

2.7.4. ELEMENTOS DE MANDO Y SEÑALIZACIÓN

Los elementos de mando y señalización muestran el estado de funcionamiento del horno se lo hace por medio de luces piloto de dos colores diferentes y un selector de tres posiciones deshabilitada una de ellas que servirá como medida de protección en el caso de un paro de emergencia.

El selector de 3 posiciones para el encendido y apago manual del circuito de potencia, que cuenta con: dos contactos normalmente abiertos (2NO), tres posiciones mantenidas, 415 V y 10 A de tensión máxima y corriente nominal de trabajo respectivamente.

Luces piloto de 120 V y 10 W de color verde y rojo. La luz piloto verde es para indicar que el horno está encendido y la luz piloto roja muestra el estado en el cual el horno no está en funcionamiento. (Anexo 11)

2.7.5. SELECCIÓN DEL CALIBRE DEL CABLE ELÉCTRICO

La selección del calibre del alambre está en función de la corriente que el conductor es capaz de conducir, el tipo de protección y la temperatura de trabajo ya que a mayor temperatura la capacidad de conducción de la corriente varía.

La alimentación de los elementos de resistencia se los realiza por medio de tres cables N° 10 AWG ver Anexo 14, uno por cada línea, que son suficientes para la corriente que se necesita para los elementos y para el cableado de control se utiliza alambre N° 18 AWG. Finalmente para la alimentación se utiliza un enchufe con una capacidad de 50 A, 125/250 V.

2.7.5.1. Circuito de fuerza

El circuito de fuerza además de alimentar con la energía eléctrica a las resistencias también protege al circuito de cualquier anomalía como son sobrecorrientes y sobrevoltajes.

El circuito está alimentado por tres líneas L_1 , L_2 y L_3 , entre cada fase se tiene un voltaje de 220 V, cada línea se conecta primero a un interruptor termo-magnético tripolar que se abre el circuito después de un cierto tiempo dado por la curva de disparo si detecta corrientes mayores hasta 1,5 la corriente nominal.

A continuación se encuentra el contactor es el elemento actuante, desconecta o conecta el circuito según la señal recibida desde el PLC. Finalmente están los elementos de resistencias que son los encargados de proporcionar la potencia requerida por el horno de acuerdo a la ley de Joule. En la figura 2.12 se muestra el esquema del circuito de fuerza.

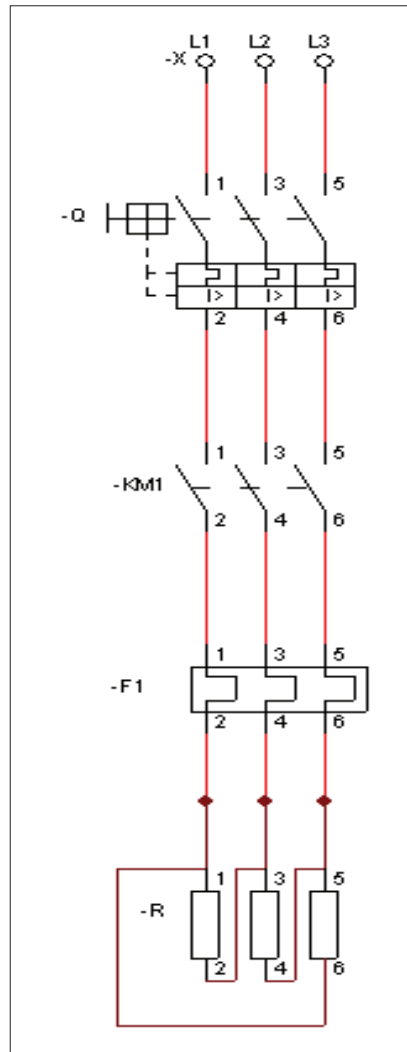


Figura 2.12. Circuito de fuerza del horno.

2.7.6. CIRCUITO DE CONTROL

Una vez realizado el circuito de potencia se procede con el diseño del circuito de control de acuerdo a lo señalado en el esquema de la figura 2.13.

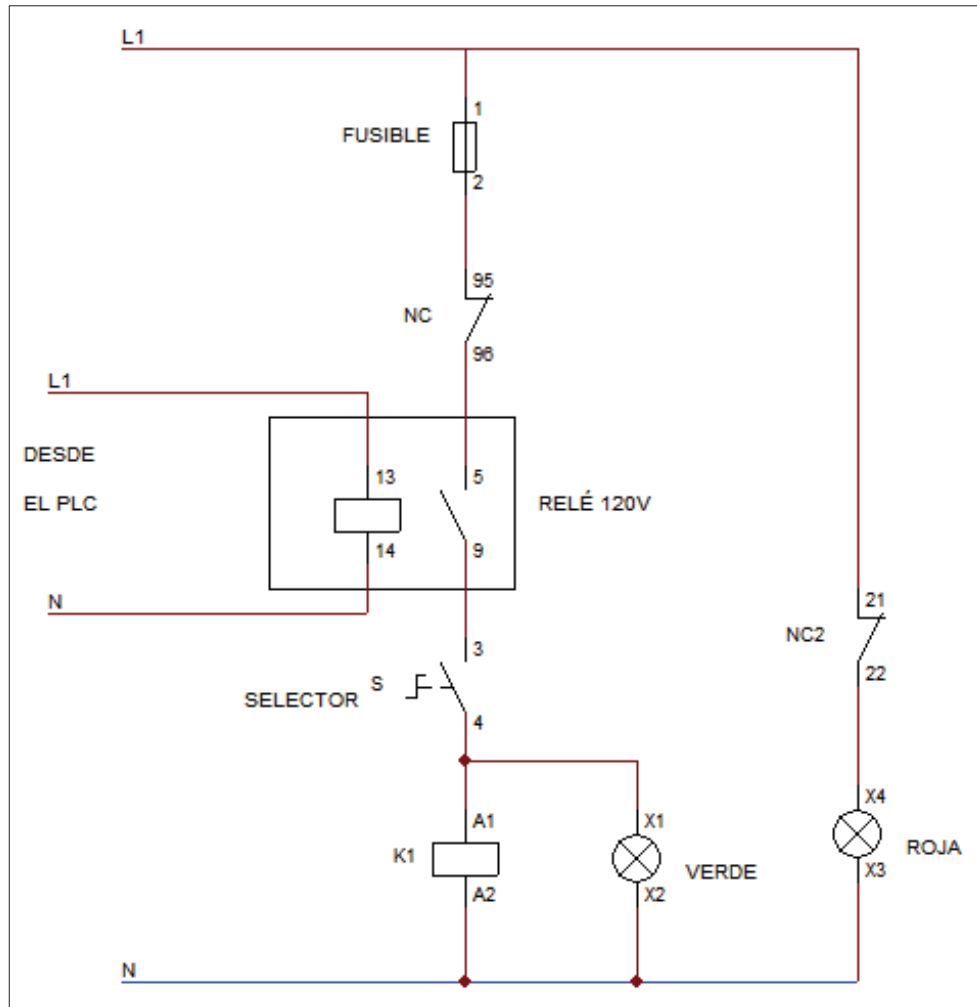


Figura 2.13. Circuito de control del horno.

El funcionamiento del circuito de control es el siguiente:

Cuando se conecta a la fuente de alimentación con el neutro conectado al terminal A2 de la bobina del contactor y la línea al fusible que enciende la luz piloto roja cuando el selector se encuentra en la posición de apagado, posición 0.

Cuando al selector se lo gira a la posición 1 girando la perilla en dirección de las agujas del reloj, se cierra el circuito con lo cual energiza la bobina del contactor y se enciende la luz piloto verde al mismo tiempo que se apaga la roja, pero no se inicia al calentamiento debido a que los contactos del relé de 120V se encuentra abiertos.

Luego la señal del PLC llega al relé de 120V y lo acciona cerrando el contacto normalmente abierto que está conectado en serie con los contactos normalmente cerrados del contactor y con los contactos normalmente abiertos del selector que una vez girado la perilla se cierran lo que permite el paso de la corriente y se inicie el proceso de calentamiento.

2.8. ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD DE LA ESTRUCTURA SOPORTANTE

La estructura soportante está constituida en sus miembros principales por ángulos de lados iguales L 40x40x5, como se muestra en la figura 2.14.

El peso del cuerpo del horno tomando en cuenta el revestimiento y la estructura metálica será de 240 Kg aproximadamente considerando además el peso de una carga calculado a partir del 75% del volumen de la cámara, éste se distribuye de manera uniforme en la estructura.



Figura 2.14. Esquema de la estructura soportante

2.8.1. SIMULACIÓN EN SAP 2000 V17

Para comprobar que la estructura soportará el peso del cuerpo del horno, se utiliza el software de análisis estructural SAP 2000 V17.

Al ser una estructura sencilla, se elige el tipo de estructura armazón 3D, se ubican las restricciones fijas en los cuatro puntos de apoyo de la estructura, se asigna el tipo de perfil en cada elemento y se procede a establecer las cargas en los miembros que soportarán directamente el peso del horno.

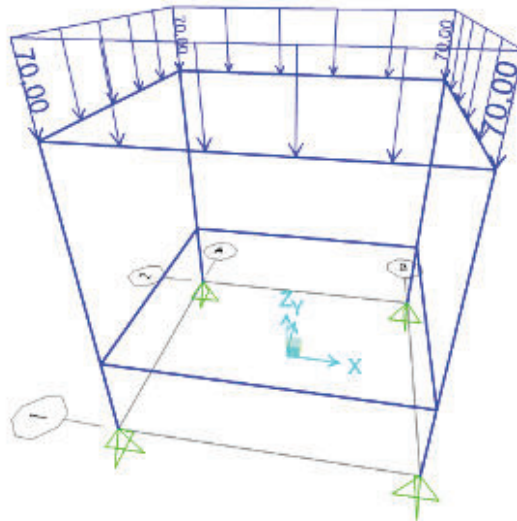


Figura 2.15. Aplicación de la carga en SAP 200 V17

Una vez asignadas las condiciones del análisis se procede con la simulación obteniendo los siguientes resultados.

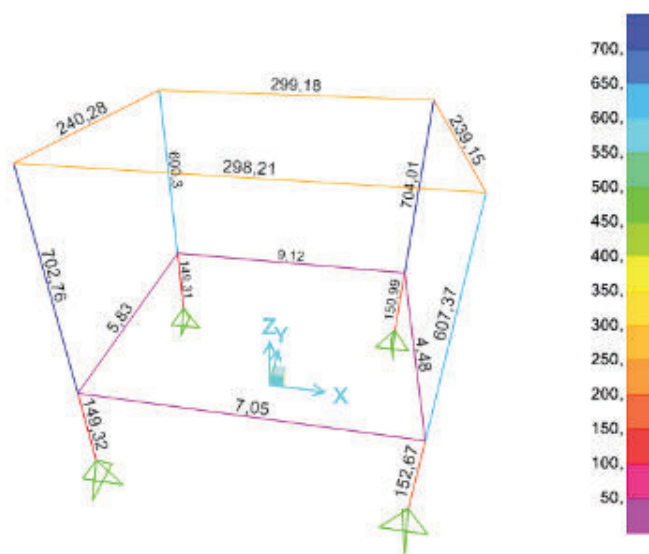


Figura 2.16. Resultados del trabajo virtual de los elementos en SAP 2000 V17.

Se observa que la parte inferior de las columnas de la estructura es la que soporta el mayor estrés, sin embargo la estructura no presenta ningún inconveniente para soportar el cuerpo del horno y trabaja con un factor de seguridad de 3,5.

2.9. DISEÑO DEL MECANISMO DE LA PUERTA

Para el diseño del mecanismo de la puerta se consideran como aspectos importantes las dimensiones y el peso de la puerta, las dimensiones de la cámara, su ubicación respecto al piso y las dimensiones generales del horno, de tal manera que este mecanismo permita la operación correcta del horno y facilite el trabajo del usuario.

2.9.1. DIMENSIONES Y PESO DE LA PUERTA

Tomando en cuenta que la ventana de la cámara tendrá unas dimensiones de largo y ancho 400 mm, y se tiene un espacio de 100 mm aproximadamente desde el revestimiento interior hasta la plancha metálica; el largo y ancho de la puerta serán de 510 mm.

Para determinar su espesor se considera que el material utilizado para el aislamiento, que permita un cierre hermético, con una baja densidad y una conductividad preferencial, será la fibra cerámica.

De esta manera se consigue que la puerta sea liviana y cumpla con la condición de que la temperatura superficial exterior sea menor a 100°C, además se utilizará plancha metálica como base estructural obteniéndose un espesor total de la puerta de 110 mm.

Ancho = 510 mm

Largo = 510 mm

Espesor = 110 mm

Tomando en cuenta las dimensiones establecidas y los materiales utilizados, se procede a calcular el peso de acuerdo con las densidades de la fibra cerámica y la plancha metálica, en la figura 2.17 se presenta un esquema de la puerta.

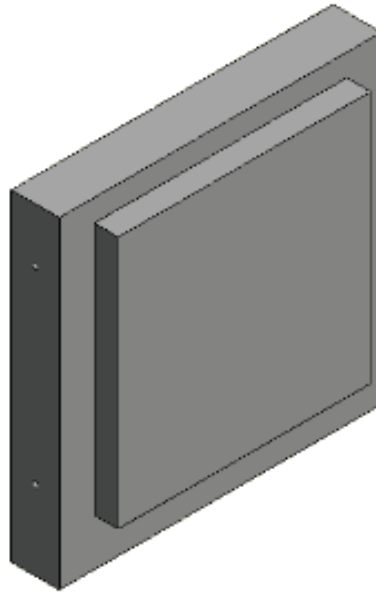


Figura 2.17. Esquema de la puerta

De acuerdo con las consideraciones mencionadas el peso total de la puerta es de 87,33 N, valor que se utilizará posteriormente en el cálculo del eje principal del mecanismo.

2.9.2. DIMENSIONAMIENTO DEL EJE PRINCIPAL

Se realiza el diagrama de cuerpo libre del eje en la posición crítica de diseño, es decir, cuando los eslabones del mecanismo que soportan a la puerta se encuentran en posición horizontal, en esta posición el peso de la puerta es el máximo respecto a la posición de los eslabones (perpendiculares a la pared delantera del horno).

En la figura 2.18 se muestra un esquema de la ubicación del eje principal en el mecanismo.

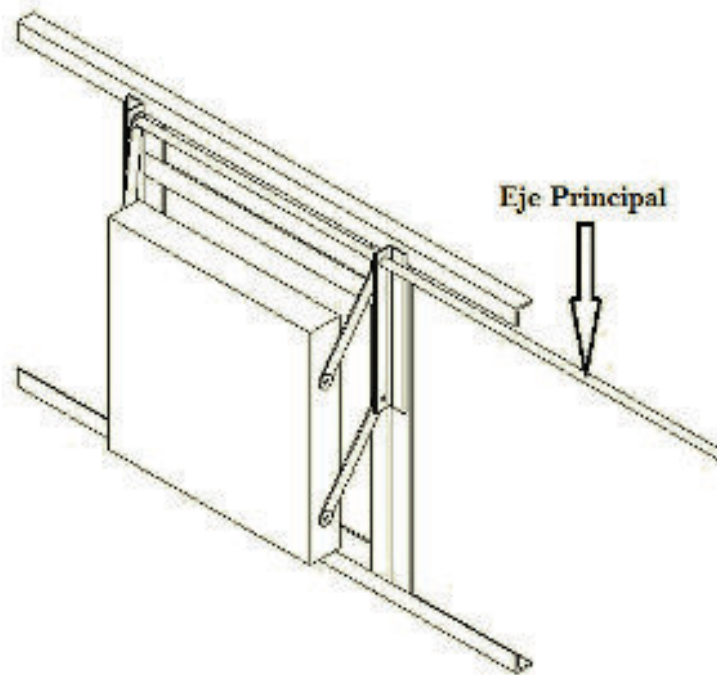


Figura 2.18. Esquema del eje principal en el mecanismo

El peso de la puerta $W_p = 87,33 N$ es la carga principal a considerarse para dimensionar el eje y la posición crítica es cuando los eslabones están en posición horizontal.

Se hace un análisis estático considerando el peso de la puerta y el máximo esfuerzo en la posición crítica, considerando un factor de seguridad de 2, el diámetro seleccionado para el eje será

$$d_e = 2 [cm]$$

2.9.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESLABONES DEL MECANISMO

Las dimensiones se establecen de acuerdo con la posición de los apoyos, el tamaño de la puerta y la ventana del horno; se elige un mecanismo de cuatro barras, de doble manivela en el que todos eslabones tienen la misma longitud.

Para el diseño del mecanismo se considera el recorrido que debe hacer la puerta, en su posición más baja debe situarse exactamente en la ventana de la cámara y en su posición más alta debe dejarla descubierta.

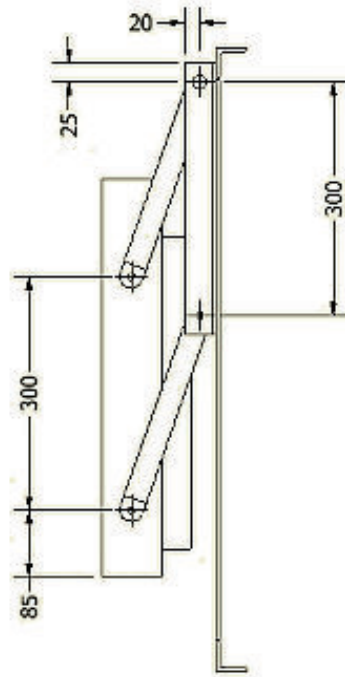


Figura 2.19. Dimensionamiento de los eslabones del mecanismo

Para asegurar el movimiento correcto del mecanismo se realiza una simulación en el software Inventor 2013.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL HORNO

En el presente capítulo se describirá el procedimiento seguido en el dimensionamiento, construcción y montaje de todos los elementos que conforman el horno a saber: el mecanismo de la puerta, las paredes de material refractario, las placas porta-resistencias y los elementos calefactores además de la cubierta exterior con el recubrimiento superficial para impedir su deterioro debido a las condiciones ambientales principalmente la oxidación.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Una vez finalizados los cálculos referentes al diseño de los elementos que integran el horno, así como la selección de los materiales y los elementos calefactores que lo constituyen, se procede con la siguiente etapa que corresponde al dimensionamiento y la construcción.

Para seguir un orden cronológico en la construcción de las partes principales que conforman el horno primero se realiza el dimensionamiento y construcción de la estructura metálica, el siguiente paso es la construcción de las paredes del revestimiento térmico, luego se continúa con el dimensionamiento y construcción de las placas porta-resistencias y finalmente se realiza la construcción y el montaje de la cubierta exterior con chapa metálica y la puerta.

3.2. DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA.

Se establecen las dimensiones de la estructura que servirá de esqueleto para el revestimiento del horno, de acuerdo con los espesores de las capas de aislamiento calculados en el apartado 2.4 y mostrados en la tabla 2.2, además de

las dimensiones establecidas para la cámara. Según lo especificado las medidas de la estructura metálica son Alto = 800 mm, Largo = 1265 mm y Ancho = 610 mm, tal como se muestra en la figura 3.1.

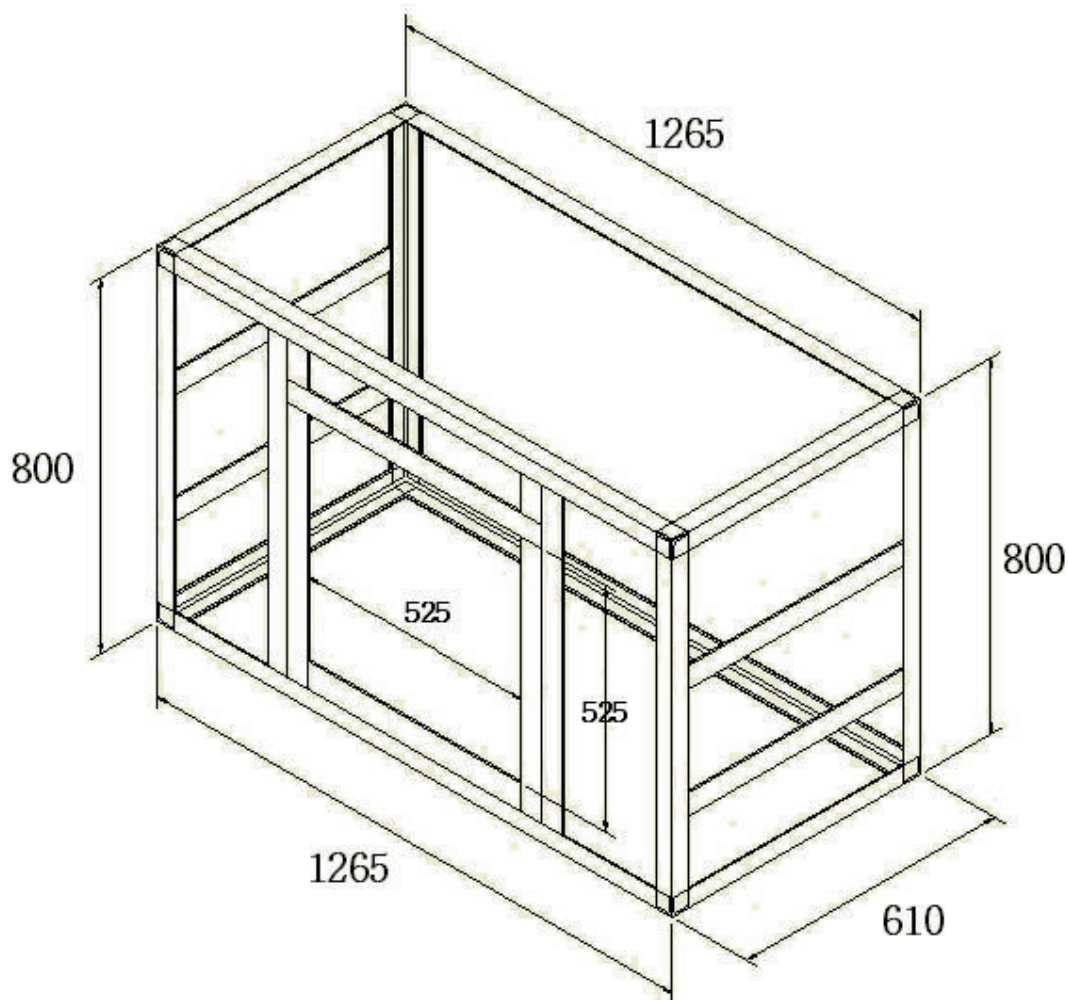


Figura 3.1. Dimensiones de la estructura metálica.

Una vez establecidas las dimensiones que tendrá la estructura, se procede a la construcción de la misma. Para esto, se readecuó la estructura de un horno que se encontraba en condiciones de desecho en el laboratorio, misma que estaba constituida en sus miembros principales por ángulo estructural tipo L 400x400x5 mm y platinas de 500x5 mm.



Figura 3.2. Estructura metálica de un horno en condiciones de desecho.

El primer paso es cortar la antigua estructura dejando el marco delantero que puede apreciarse en la figura 3.2 y la base, los marcos laterales se cortan completos para luego unirlos una vez que se ha armado la nueva base y el marco delantero. En las nuevas uniones se utilizó ángulos y platinas con las mismas características y dimensiones de la estructura original.

El proceso de soldadura utilizado es la soldadura GMAW para la unión de los perfiles y platinas con CO_2 como gas protector y un alambre de diámetro 0.8 mm como material de aporte siguiendo las recomendaciones del fabricante para los valores de voltaje y velocidad de alimentación del alambre (Anexo 8).

Se elige el proceso GMAW por ser un proceso semiautomático lo que facilita su utilización sin tener que recurrir a mano de obra calificada, además es un proceso limpio, es decir, que no produce escoria y presenta elevada resistencia mecánica del cordón de soldadura lo que garantiza la fiabilidad de la estructura.

Durante el armado de cada una de las partes se hace mucho énfasis en el control de la perpendicularidad así como también del nivel pues es de mucha importancia porque de ello dependerá el buen funcionamiento del mecanismo de la puerta.

Terminado el proceso de suelda se pule las superficies con una amoladora para eliminar sobremontas en los cordones de soldadura y salpicaduras que es algo inevitable durante el proceso. En la figura 3.3 se presenta una secuencia resumida del proceso detallado en los párrafos anteriores

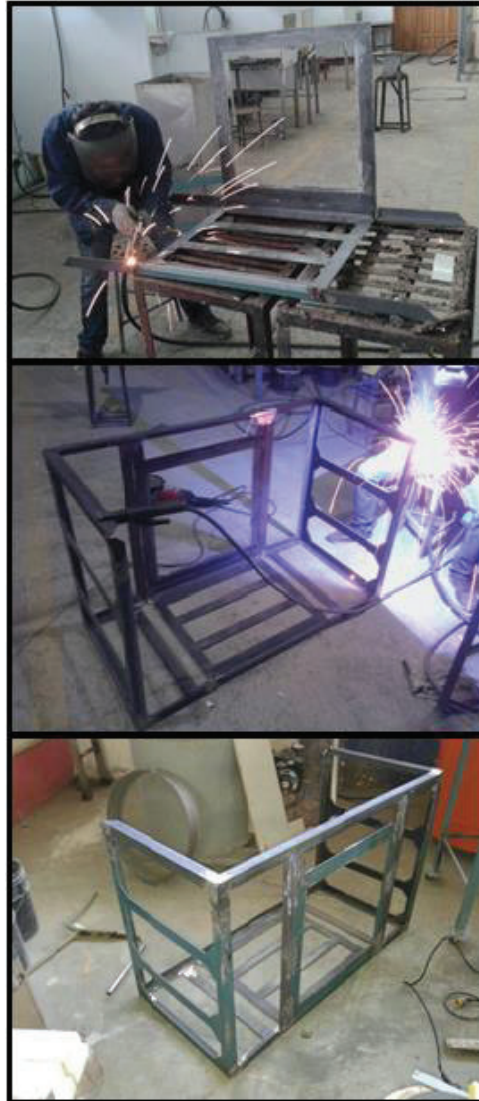


Figura 3.3. Armado de la estructura metálica.

Como nota adicional se menciona que mientras se realizó el armado de la estructura metálica se utilizaron todos los equipos de protección personal para cada uno de los procesos con el fin de minimizar los riesgos durante un accidente.

3.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS PAREDES DEL REVESTIMIENTO TÉRMICO

Se inicia con la base de la solera, en primer lugar se coloca la placa de fibrocemento sobre la estructura y a continuación la capa base de ladrillo refractario como se indica en la figura 3.4.



Figura 3.4. Construcción de la solera del horno.

Para cada uno de los ladrillos se controla el nivel, alineación y perpendicularidad con respecto a la base de la estructura metálica que se encuentra paralela al piso, tanto para la solera como para las paredes. La disposición de los ladrillos en cada capa es como la que se muestra en la figura 3.5, esta configuración se elige de tal forma que la capa exterior del ladrillo refractario se traslape con la capa de ladrillo interior logrando un mejor aislamiento.

Las exigencias que se debe tener en cuenta al momento colocar los ladrillos y asegurar su estabilidad es que deben mojarse porque un ladrillo seco absorbe la humedad del mortero lo que puede producir fragilidad en la construcción además de aplicar presión para que tenga buena adherencia con el mortero, las hiladas deben estar alineadas y horizontales y las juntas verticales deben ir alternadas sin continuidad.



Figura 3.5. Construcción de las paredes del horno.

Para el techo los ladrillos se disponen de tal manera que el agrietamiento no sea unidireccional transversal y/o longitudinalmente, esto con el fin de evitar el uso de guías metálicas para soportar los ladrillos que por su elevada conductividad térmica facilitarían el flujo de calor hacia afuera de la cámara. La construcción del techo se realiza como un módulo independiente de la construcción de las paredes para luego ser dispuesto en su lugar.



Figura 3.6. Disposición de los ladrillos en el techo del horno.

Como en los pasos anteriores todos los ladrillos se unen con mortero refractario y cubriendo con una capa de un grosor de 5 mm para obtener mejor fijación luego se deja secar al aire por dos días. Una vez secado se cubre nuevamente con una fina capa de mortero pero esta vez con el fin de tener una superficie sin muchas imperfecciones y con un mejor acabado superficial para que las placas porta-resistencia que constituirán la cámara no tenga mucho juego debido a la superficie no uniforme y se le deja secar al aire por un día más.



Figura 3.7. Construcción del techo del horno.

Finalizado todo este proceso se procede a montar la parte del techo controlando que las superficies se encuentren a nivel y alineadas como se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8. Montaje del techo del horno

Se completa los ladrillos que hacen falta dejando finalmente la presentación como se muestra en la figura 3.9. El techo mostró buena estabilidad sin la presencia de fisuras o grietas, las planchas de fibrocemento se pegan a las paredes exteriores del ladrillo con una delgada capa de cemento refractario, con las paredes en su lugar se tienen las medidas reales para continuar con el dimensionamiento de las placas porta-resistencia.



Figura 3.9. Paredes del ladrillo refractario

3.4. DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLACAS PORTA-RESISTENCIA

Se parte de las dimensiones interiores de la cámara. El objetivo es conseguir una cámara interior de dimensiones 400 x 400 x 400 mm. Por tanto de acuerdo con las dimensiones obtenidas después de haber construido el revestimiento de ladrillo, las placas deberán ser de un espesor de 25 mm.

Las dimensiones de las placas serán de 470 x 470 para lograr un montaje con el revestimiento de ladrillo con un juego de 5 mm como máximo esto con el fin de evitar que al momento de colocar las placas no tenga que ejercerse demasiada presión que ocasionaría que se fisure sobre todo la placa superior también se debe obtener el área mínima de radiación que se determinó en el capítulo 2 que es 0.55 m².

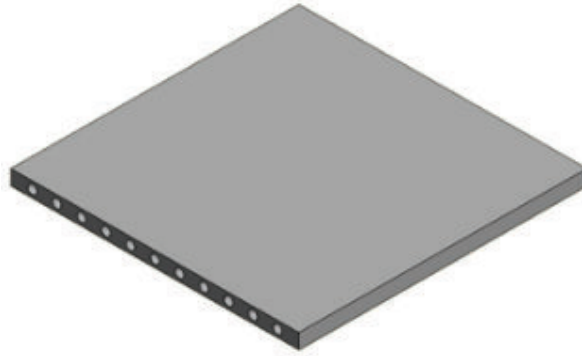


Figura 3.10. Esquema de las placas porta-resistencia.

Para su construcción se utilizó moldes de acrílico y tubos de PVC con el diámetro exterior que más se aproxima al diámetro de las espiras, tres de las 5 placas llevarán las resistencias en la disposición que se muestra en la figura 3.10, para las otras dos los moldes son más sencillos.

El material utilizado para la construcción es el Cóncrax 1500, el proceso se inicia con el armado de los moldes de acrílico luego se prepara la mezcla del Cóncrax 1500 con agua hasta formar una masa que tenga una consistencia pastosa y finalmente se disponen los tubos de PVC para obtener la forma requerida. En la figura 3.11 se muestra la consistencia que debe tener la mezcla.



Figura 3.11. Preparación de la mezcla de Cóncrax 1500 y agua.

Se vierte la mezcla sobre el molde que previamente fue cubierta con una ligera capa de aceite para que cuando se fragüe no se pegue a la superficie del acrílico y sea más fácil el desmoldeo, se debe tener cuidado con la cantidad de aceite que se use porque muy poco puede hacer que el material se adhiera a las paredes del acrílico durante el secado y un exceso puede generar demasiadas porosidades por la afinidad nula que presenta al contacto con el agua.

Primero se vierte la mezcla hasta alcanzar la altura inferior de los agujeros en los que van colocados los tubos de PVC y se esparce de manera uniforme sobre la superficie del molde para eliminar las porosidades y se realiza presión para obtener mejor grado de compactación, se disponen los tubos de PVC impregnados también de aceite y se vierte la segunda porción de mezcla hasta llenar completamente el molde se realiza nuevamente presión pero no excesiva porque puede desalinearse los tubos.

Se coloca la tapa del molde que se sujeta con pernos a la tapa de la base y finalmente se coloca un peso de unos 25 Kg uniformemente distribuidos sobre la tapa para luego dejar secar al aire por 24 horas y luego de eso se retiran los tubos de PVC y se retira del molde las placas.



Figura 3.12. Desmoldeo de las placas porta-resistencias.

Se debe tener mucho cuidado al momento de retirar los tubos PVC de las placas para no causar que el material se fisure o se rompa debido a que es muy frágil una vez secado por 24 horas y retirado del molde se seca a 120 °C por 24 horas de acuerdo a la recomendación dada por el fabricante para eliminar el resto de la humedad que no se elimina por el primer proceso de secado.



Figura 3.13. Secado de las placas porta-resistencias.

Finalizado todo este proceso se disponen las resistencias en las placas, las resistencias fueron adquiridas con los requerimientos de diseño calculados en el capítulo 2 como es el diámetro del alambre, el paso entre espiras y el diámetro de espira directo del distribuidor, ver figura 3.14.



Figura 3.14. Resistencias eléctricas de calentamiento.

Para colocar las resistencias en el interior de las cavidades de las placas se disponen de dos varillas de diámetro menor que el diámetro interior de la espira para guiar el paso de las mismas, se realiza todo el trabajo con mucho cuidado para no dañar las placas debido a que un daño en este punto significaría repetir todo desde el inicio porque las placas no se pueden reparar, ver figura 3.15.



Figura 3.15. Disposición de las resistencias en las placas

El proceso se realiza para cada una de las placas en la figura 3.16 se puede observar la presentación final de las placas con las resistencias en su interior.



Figura 3.16. Placas con las resistencias eléctricas.

3.5. CONSTRUCCIÓN DE LA CUBIERTA EXTERIOR CON CHAPA METÁLICA

Para la cubierta exterior los pasos seguidos es cortar y doblar la chapa metálica de 0,9 mm de espesor en varias piezas que conformarán el techo, las paredes laterales y la parte inferior del horno. El proceso se continúa como se muestra en la figura 3.17 para las paredes laterales y el techo, las uniones se los realiza mediante puntos de soldadura.



Figura 3.17. Montaje de la chapa metálica.

Los factores a tomar en cuenta como se lo ha hecho durante cada etapa de construcción es que se debe controlar la alineación de cada pedazo de chapa metálica, en este punto se puede notar la importancia del control seguido en la construcción de la estructura principal, como se puede observar en la figura 3.18 en la cual ya prácticamente todo está en su sitio.



Figura 3.18. Montaje de la cubierta metálica superior.

Con la cubierta metálica exterior en su sitio se realizan agujeros en la parte posterior de la cámara por donde pasarán los terminales de las resistencias para las conexiones eléctricas, estos agujeros se cubren con tubos cerámicos para aislar las resistencias del cuerpo del horno, figura 3.19.



Figura 3.19. Ubicación de tubos cerámicos para los terminales de las conexiones eléctricas de las resistencias.

Finalmente se colocan las placas con las resistencias dispuestas en su interior como se muestra en la figura 3.20, con las placas en su sitio se tienen las medidas reales del interior de la cámara lo que permite continuar con el siguiente paso que es la construcción de la puerta.

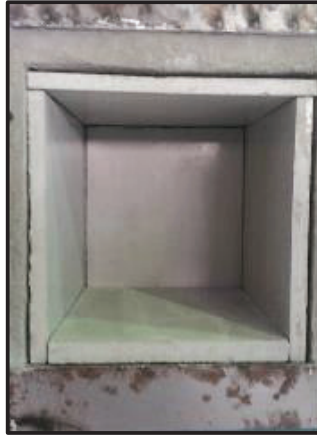


Figura 3.20. Instalación de las placas con las resistencias en la cámara del horno.

3.6. CONSTRUCCIÓN E INSTALACION DE LA PUERTA

El objetivo es tener una puerta liviana para que sea fácil de abrir y cerrar, por lo que el material seleccionado como aislante de la puerta es fibra cerámica, para determinar el espesor se considera los resultados obtenidos al inicio del capítulo 2 para lo cual se considera el flujo de calor perdido por conducción por unidad de área a través de la pared compuesta.

$$q_k = \frac{T_i - T_{sc}}{L/k}$$

[Ec. 1.15]

(Incropera, 1999)

Donde:

q_k : Calor perdido por conducción, 1434.16 [W/m²].

T_{si} : Temperatura máxima de diseño, 1350 °C.

T_{sc} : Temperatura superficial exterior calculada 117.65 °C.

L_{fc} : Espesor de la fibra cerámica

k_{fc} : Conductividad térmica de la fibra cerámica, 0.17 [W/m*K].

Reemplazando los valores y despejando la ecuación para L_{fc} , se obtiene un valor de 0.146 [m], para el cálculo no se considera la influencia de la chapa metálica por su alta conductividad térmica y su pequeño espesor. A continuación se procede a cortar y doblar la plancha para la puerta y se coloca las capas de la fibra cerámica, como se muestra en la figura 3.21, la unión entre capas de fibra cerámica se realiza con mortero refractario.



Figura 3.21. Diseño de la puerta y ubicación de la fibra cerámica.

Con las medidas obtenidas al final del capítulo 2 se procede a construir el mecanismo de apertura y cierra de la puerta y finalmente al montaje de todo el sistema, es importante controlar la alineación del eje para que no presente dificultad alguna al momento de abrir y cerrar la puerta.



Figura 3.22. Montaje de la puerta y su mecanismo.

Con la puerta y el mecanismo en su lugar se coloca el contrapeso al extremo del eje con un peso al determinado en el diseño del mecanismo para este se tiene un tubo de 2,5 pulgadas de diámetro el cual se lo llena de concreto para que tenga el peso requerido.

También se coloca la última capa de fibra cerámica para sellar la cámara herméticamente. Por último se ubica la caja donde se colocará los elementos de regulación como se indica en la figura 3.23 y se realiza un agujero en el techo por donde se realizará la instalación de la termocupla ver figura 3.24.



Figura 3.23. Instalación de la caja de elementos de regulación



Figura 3.24. Ubicación de la termocupla.

Finalmente se limpia la superficie exterior con grata para dejar la superficie lista para pintar. La pintura de la superficie se lo realiza primero aplicando una capa de anticorrosivo se deja secar y una vez seca se aplica la primera mano de pintura de aluminio para altas temperaturas que es ideal para este tipo de superficies, además con la pintura se obtiene el factor de emisividad considerado en el diseño, el horno con todos sus componentes en su lugar y pintado se muestra en la figura 3.25.



Figura 3.25. Horno con todos sus componentes instalados.

Como una observación final, el funcionamiento del mecanismo de la puerta no presentó problemas, es de fácil apertura y la puerta es liviana lo que hace fácil la operación de apertura y cierre.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez finalizada la construcción del horno y la instalación del sistema de control, se procede a la realización de las pruebas de funcionamiento del dispositivo. Se efectúan una prueba en vacío que será de utilidad para determinar las constantes del controlador PID de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.7 y posteriormente se realizarán cuatro diferentes procesos de tratamiento térmico, el recocido del acero AISI 1045, el temple del acero AISI 1045, el revenido del acero AISI 1045 y el temple del acero STAVAX (AISI 420), los tres primeros debido a que son los tratamientos que se realizan en las prácticas del laboratorio y el último para comprobar la utilidad del horno.

4.2. PRUEBA EN VACÍO

Durante la prueba en vacío la temperatura ambiente es de 19 °C y es la misma en el interior de la cámara antes de dar inicio a la prueba, se decide tomar medidas cada minuto para obtener una curva suave, con el funcionamiento del horno a la potencia y velocidad de calentamiento máximas desde la temperatura ambiente, el horno llegó a la temperatura de 1257 °C a los 180 minutos después de haber iniciado el calentamiento por lo que se obtuvo 181 datos. Los valores se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos de la prueba en vacío.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	19	66	730,3	132	1097
1	20,2	67	737,4	133	1101
2	26,3	68	744,5	134	1104
3	34,5	69	751,6	135	1108
4	43,7	70	759,2	136	1111
5	52,1	71	765,4	137	1115
6	59,5	72	772,4	138	1119
7	66,7	73	779,1	139	1122
8	75,6	74	785,8	140	1126
9	85,9	75	794,1	141	1129
10	97,3	76	799	142	1132
11	107,8	77	804,6	143	1136
12	117,7	78	811,6	144	1139
13	128,5	79	817,3	145	1143
14	137,6	80	824,1	146	1146
15	147,2	81	829,7	147	1149
16	157,8	82	835,8	148	1153
17	166,4	83	841,7	149	1156
18	172,9	84	848,1	150	1159
19	184,2	85	853,8	151	1163
20	195,2	86	859,9	152	1166
21	213,6	87	866,8	153	1169
22	234,4	88	872	154	1172
23	258,1	89	878,2	155	1176
24	277,6	90	884,2	156	1179
25	298,6	91	890,2	157	1182
26	317,3	92	896,1	158	1185
27	332,2	93	901,8	159	1189

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
28	347,6	94	907,5	160	1192
29	364,2	95	913,2	161	1195
30	378,5	96	919,3	162	1198
31	393,2	97	924,8	163	1201
32	408	98	930,9	164	1205
33	418,6	99	935,9	165	1208
34	430,4	100	941,5	166	1211
35	445,6	101	947,1	167	1214
36	453,3	102	952,7	168	1218
37	467,9	103	958,1	169	1221
38	477,3	104	964	170	1224
39	489,6	105	969,6	171	1227
40	504,3	106	974,5	172	1231
41	517,2	107	980	173	1234
42	528,6	108	985,4	174	1237
43	540,3	109	990,8	175	1240
44	549,4	110	996,3	176	1244
45	560,1	111	1002	177	1247
46	570,3	112	1007	178	1250
47	579,7	113	1012	179	1254
48	589,1	114	1018	180	1257
49	597,8	115	1023		
50	605,9	116	1028		
51	614,5	117	1033		
52	622,7	118	1038		
53	630,9	119	1043		
54	639,2	120	1047		
55	647,1	121	1052		
56	655,2	122	1056		

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
57	662,9	123	1061
58	670,7	124	1065
59	679,2	125	1069
60	686,2	126	1074
61	693,6	127	1078
62	700,9	128	1082
63	708,3	129	1086
64	716,2	130	1090
65	723	131	1093

Con los datos de la tabla 4.1. se exporta los datos a Matlab para obtener la gráfica en la cual se puede observar la variación de la temperatura con el tiempo real.

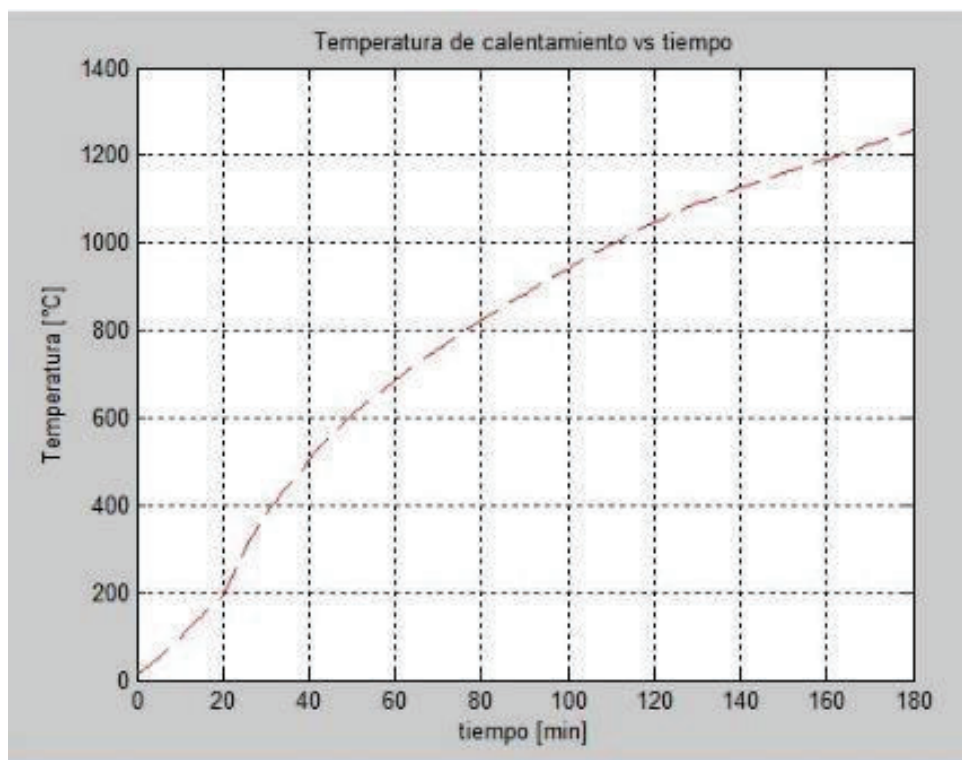


Figura 4.1. Variación de la temperatura con el tiempo durante la prueba en vacío.

4.3. MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLANTA (HORNO)

Con los datos de la tabla 4.1 se realiza un análisis mediante el programa Matlab para obtener las constantes del controlador PID, para lo cual primero calculamos la velocidad de calentamiento del horno que se determina restando la temperatura a un tiempo t_{n+1} de la temperatura en un tiempo t_n .

Ejemplo:

$$V1 = \text{Temperatura (en } t_2) - \text{Temperatura (en } t_1)$$

Al aplicar este procedimiento se obtiene una tabla donde se presenta el comportamiento del horno. Para obtener estos valores se realizó el calentamiento a la potencia máxima y sin ninguna carga en el interior de la cámara del horno, de los datos se puede observar que el tiempo para que alcance los 1257 °C aproximadamente de 3 horas a partir del inicio del calentamiento. Los valores que se presentan en la tabla 4.2 se utilizan para diseñar el control del horno.

Tabla 4.2. Comportamiento del Horno

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]
0	19	-
1	20,2	1,2
2	26,3	6,1
:	:	:
:	:	:
50	605,9	8,1
51	614,5	8,6
52	622,7	8,2
:	:	:

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]
:	:	:
100	941,5	5,6
101	947,1	5,6
102	952,7	5,6
:	:	:
:	:	:
150	1159	3
151	1163	4
152	1166	3
:	:	:
:	:	:
177	1247	3
178	1250	3
179	1254	4
180	1257	3

La tabla completa se la puede observar en el Anexo 18.

A partir de los datos obtenidos se calcula la velocidad máxima de calentamiento del horno. El procedimiento es el siguiente:

Se calcula la velocidad promedio del total de los datos, luego se determina un promedio para las velocidades de calentamiento a temperaturas menores de 700 °C cuando la convección dentro de la cámara es un factor importante, después se calcula el valor entre 700 °C y 1000 °C aquí la radiación empieza a ser importante pero no es el factor dominante y finalmente un promedio para las velocidades cuando la temperatura es mayor a 1000 °C cuando la radiación es el factor dominante en el interior de la cámara.

La velocidad máxima de calentamiento obtenida mediante este procedimiento es de 7 °C/min. En la tabla 4.3 se muestra el resumen del cálculo de la velocidad de calentamiento, estos valores permiten seleccionar el rango de velocidades de calentamiento según el rango de temperaturas que se requiera durante un proceso específico, pero se recomienda que la velocidad de calentamiento que se ingrese al programa no sobrepase al valor máximo calculado.

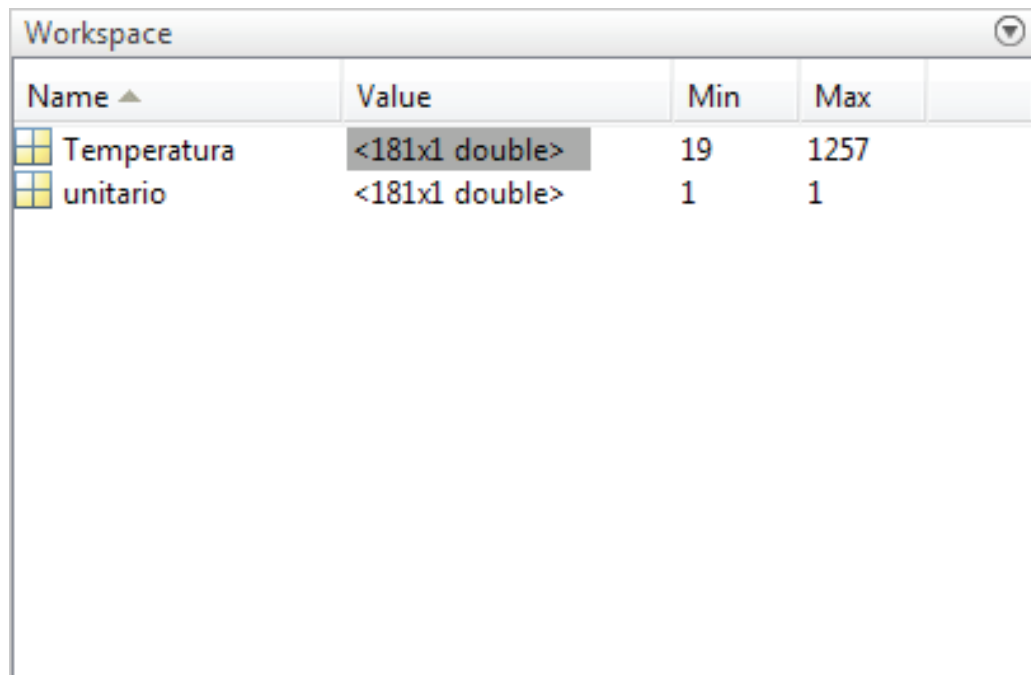
Tabla 4.3. Velocidad de calentamiento promedio.

Suma total de Velocidades de calentamiento [°C/min]	1238
Velocidad promedio total [°C/min]	6,88
Velocidad promedio para temperaturas hasta 700°C [°C/min]	11,06
Velocidad promedio para temperaturas entre 700°C y 1000 °C [°C/min]	6,18
Velocidad promedio para temperaturas mayores a 1000°C [°C/min]	3,72
Velocidad máxima de calentamiento [°C/min]	7

Con los datos de la Tabla 4.3 adquiridos en la prueba de calentamiento en vacío del horno y mediante la ayuda de un Toolbox de Matlab se obtendrá un modelo aproximado del comportamiento de la planta.

4.4. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA (HORNO) USANDO EL TOOLBOX DE MATLAB

Se crea en Matlab dos vectores con los datos tomados de la prueba de calentamiento, un vector corresponde a los 181 registros de temperatura y el segundo es un vector unitario de la misma dimensión que el vector anterior como se muestra en la figura 4.2.



The screenshot shows the Matlab Workspace window with the following data:

Name ▲	Value	Min	Max
Temperatura	<181x1 double>	19	1257
unitario	<181x1 double>	1	1

Figura 4.2. Creación de vectores en Matlab.

Se ejecuta el comando IDENT en la ventana de comandos de Matlab el cual nos permite obtener el modelo matemático de la planta. En esta ventana se importa los vectores anteriormente creados y se elige la opción “Process Models” que abre otra ventana donde permite seleccionar el modelo que se ajuste al comportamiento del horno como se indica en la figura 4.3.

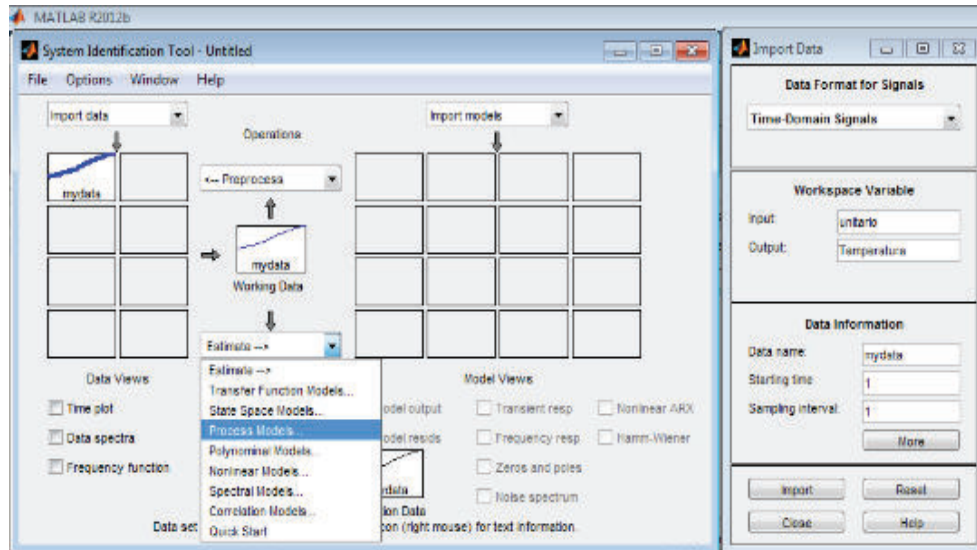


Figura 4.3. Ventana del Toolbox de Matlab al ejecutar el comando ident.

En la ventana del “Process Models” se continúa probando varios modelos en los cuales se puede seleccionar modelos con varios polos, ceros y si es necesario integradores. En la figura 4.4 se puede apreciar que los modelos con dos polos y el modelo con dos y un cero tienen un encaje del 96.5% que presenta un comportamiento bastante parecido al de la planta.

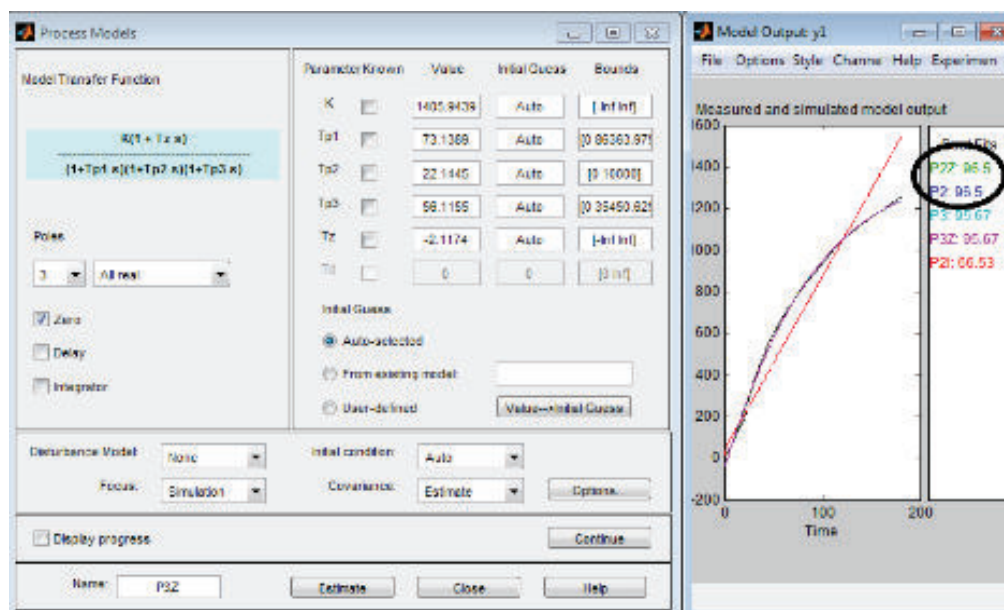


Figura 4.4. Diferentes modelos del comportamiento del horno.

Al seleccionar un modelo se muestra una ventana con la función de transferencia para el modelo seleccionado, en la figura 4.5, se muestra la función de transferencia para el modelo de dos polos.

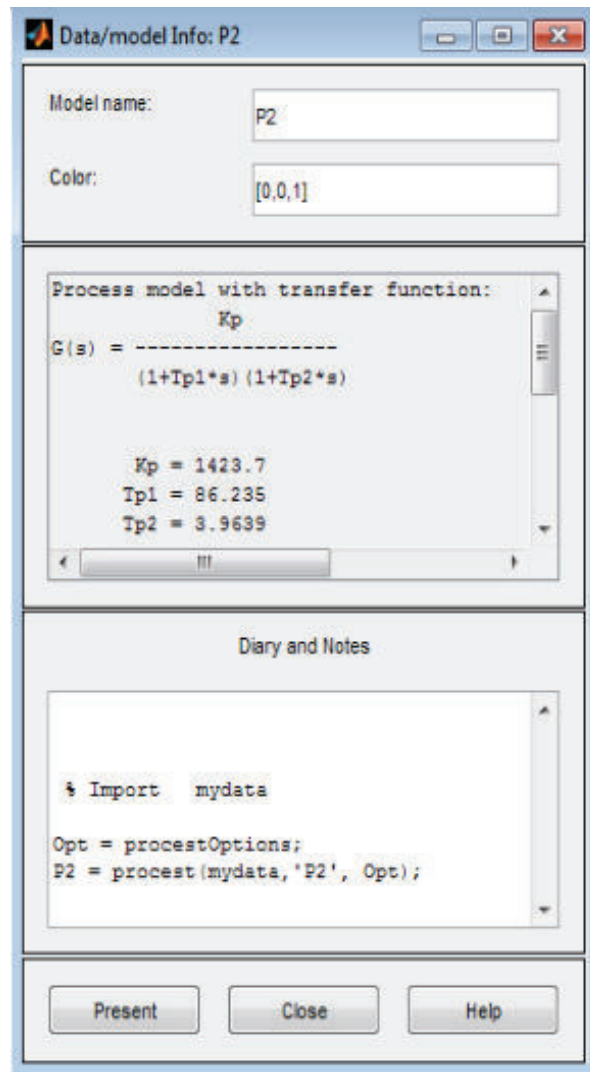


Figura 4.5. Función de transferencia para el modelo de dos polos.

La función de transferencia obtenida al aproximar por el modelo de dos polos será la utilizada para determinar las constantes debido a que la respuesta de estos sistemas es generalmente lenta como lo es la temperatura durante el funcionamiento del horno.

4.5. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL CONTROLADOR PID

Se aplica la primera regla debido a que el modelo de la planta no tiene integradores ni polos complejos conjugados además la curva de respuesta a una función escalón tiene forma de s, se le puede comprobar mediante la simulación de la planta (Ogata, 2010).

Los valores para las constantes del controlador PID conforme a lo dicho son:

$$K_p = 1.2 * \tau / L_T$$

$$\tau_i = 2L_T$$

$$\tau_d = 0.5L_T$$

Ec. [4.1]

Conforme a la ecuación 2.59 y donde $L_T = K * d$, con K igual a la unidad y las constantes del control dado por las ecuaciones 4.2.

$$P = K_p$$

$$I = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$D = K_p \tau_d$$

Ec. [4.2]

Donde L_T es el retardo de tiempo y τ es la constante de tiempo que se determinan trazando una tangente en el punto de inflexión y determinando las intersecciones entre los ejes del tiempo y la asíntota de la curva [Ogata 2010, pág. 570]. El programa se lo realiza usando Matlab, figura 4.6.

```

PID_ZN.m x
3     % DE ZIEGLER-NICHOLS
4 -   g1=tf([1423.7],[86.235 1]);
5 -   g2=tf([1],[3.9639 1]);
6 -   G1=g1*g2;
7     %APLICANDO LA PRIMERA REGLA DE ZIEGLER-NICHOLS
8 -   pp=pole(G1);
9 -   dt=0.05;
10 -  t=0:dt:600;
11 -  y=step(G1,t)';
12 -  dy=diff(y)/dt;
13 -  [m,p]=max(dy); % punto de inflexión
14 -  d2y=diff(dy)/dt; % segunda derivada
15 -  yi=y(p);
16 -  ti=t(p);
17     %CALCULO DEL RETARDO L
18 -  L=ti-yi/m;
19     %CÁLCULO DEL PERIODO T
20 -  T=(y(end)-yi)/m+ti-L;
21 -  plot(t,y,'b',[0 L L+T t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')
22 -  grid on
23 -  title('Respuesta escalón')
24 -  xlabel('tiempo [s]')
25 -  ylabel('Amplitud')
26     % CONSTANTES DE TIEMPO PARA EL CONTROLADOR PID
27 -  Kp = 1.2*T/L;
28 -  Ti = 2*L;
29 -  Td = 0.5*L;
30 -  P = Kp
31 -  I = Kp/Ti
32 -  D = Kp*Td

```

Figura 4.6. Programa para calcular las constantes del controlador PID según la regla de Ziegler-Nichols.

Además con el mismo código se obtiene la respuesta a una entrada de escalón unitario donde se puede observar la asíntota horizontal y la pendiente con el valor máximo, los puntos en los que interseca la recta de pendiente máxima con el eje horizontal y con la asíntota horizontal son los puntos para los valores de L_T y τ , el valor de K es el punto de intersección de la asíntota horizontal con el eje vertical, ver figura 4.7.

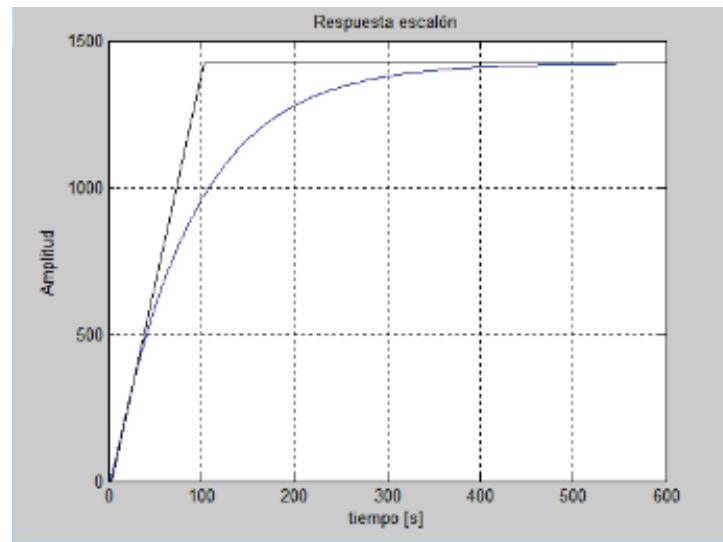


Figura 4.7. Determinación gráfica de los valores de L_T , τ .

Los valores entregados para las constantes son:

Tabla 4.4. Valores de las constantes para el controlador PID

CONTROLADOR PID	
K_p	40,4342
T_i	5,9314
T_d	1,4829

La arquitectura del control queda de la siguiente manera, figura 4.8.

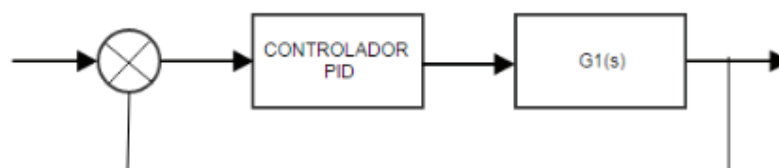


Figura 4.8. Arquitectura del control PID y el horno.

Reemplazando los valores tanto para el controlador PID como la función de transferencia con el modelo de dos polos se tiene, figura 4.9.

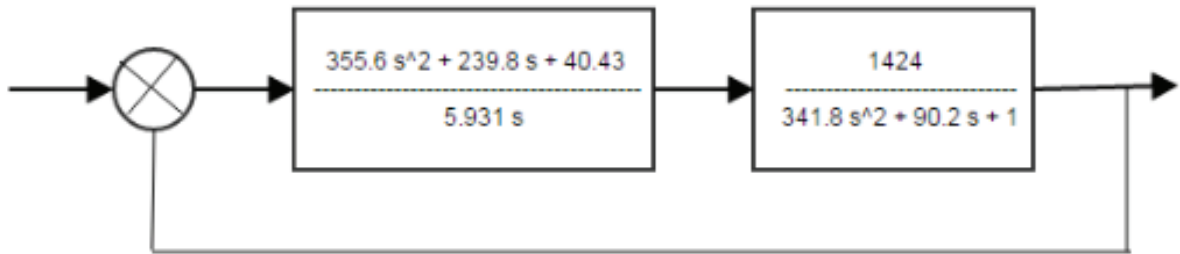


Figura 4.9. Arquitectura del control PID y del horno con los valores de las funciones de transferencia.

Aplicando la operación entre bloques se obtiene finalmente la función de transferencia del controlador y la planta, figura 4.10.

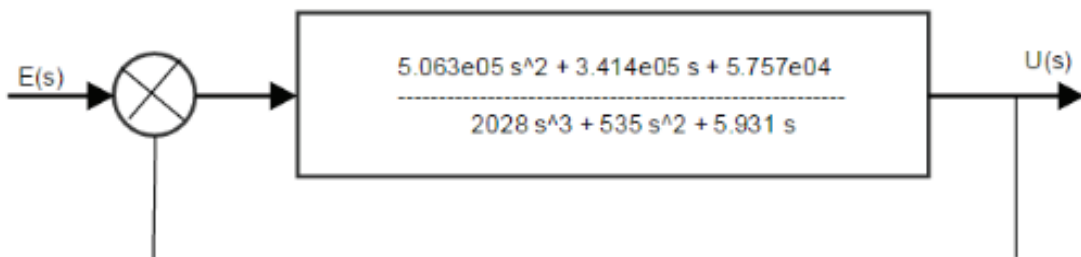


Figura 4.10. Función de transferencia del conjunto controlador-horno.

Para obtener el comportamiento del conjunto controlador-horno, escribimos la función de transferencia como muestra la ecuación 4.3.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{5.063e05 s^2 + 3.414e05 s + 5.757e04}{2028 s^3 + 5.069e05 s^2 + 3.415e05 s + 5.757e04}$$

Ec. [4.3]

Al ingresar la ecuación anterior al entorno de Matlab obtenemos la ecuación 4.4.

>> FT=PID*G1

$$FT = \frac{5,063 * 10^{-05} * s^2 + 3,414 * 10^{-05} * s + 5,757 * 10^{-05}}{2028 * s^3 + 535 * s^2 + 5,931 * s}$$

Ec. [4.4]

Realimentando con un valor unitario a la función de transferencia y la entrada como una función escalón unitario se obtiene la respuesta del sistema.

FTR=feedback(FT,1); step(FTR)

Como se puede observar en la figura 4.11, el sistema presenta una respuesta sobreamortiguada y tiene una respuesta rápida.

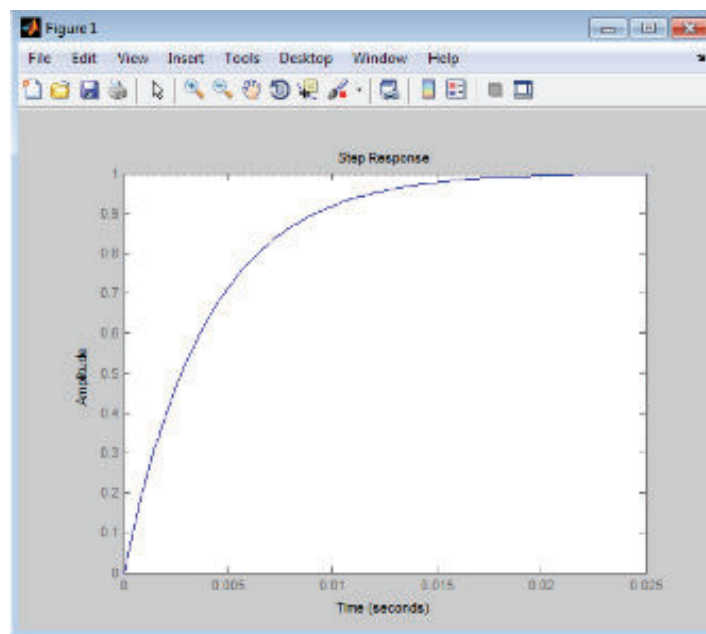


Figura 4.11. Respuesta a un escalón unitario del sistema Horno-controlador.

A continuación se ingresan los valores de las constantes de la tabla 4.4 al programa que ya está instalado en el laboratorio y se procede a verificar el funcionamiento del control para poder realizar los tratamientos térmicos propuestos al inicio del capítulo.

Como última nota de la prueba en vacío se presenta una imagen donde se puede apreciar el interior de la cámara cuando la temperatura es la alcanzada durante la prueba, figura 4.12.



Figura 4.12. Interior de la cámara durante la prueba en vacío.

No es recomendable alcanzar la temperatura planteada de 1350 °C debido al gradiente existente entre el interior de la cámara y las resistencias debido a que la radiación no es directa hacia la cámara sino que hay una disipación de calor en las placas de Cóncrax.

4.6. RECOCIDO DEL ACERO AISI 1045

El acero AISI 1045 es hipoeutectoide, por lo tanto se le realiza un recocido completo, su régimen consiste en los siguientes parámetros.

Tabla 4.5. Régimen de recocido del Acero AISI 1045

Régimen del Proceso	
Temperatura de Calentamiento	820 °C
Velocidad de Calentamiento	7 °C/min
Tiempo de permanencia	35 min
Velocidad de Enfriamiento	Dentro del horno (100°C/h)

Los valores temperatura – tiempo de este proceso se pueden ver completos en la tabla del ANEXO 18.

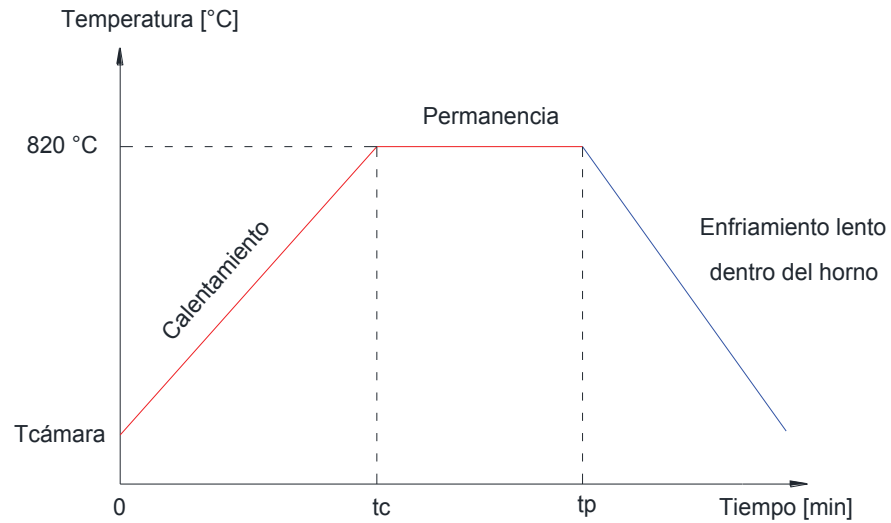


Figura 4.13. Régimen teórico de recocido del acero AISI 1045



Figura 4.14. Recocido Acero AISI 1045

Los valores temperatura – tiempo de este proceso se pueden ver completos en la tabla del ANEXO 18.

4.7. TEMPLE DEL ACERO AISI 1045

Se realiza un temple con los siguientes parámetros.

Tabla 4.6. Régimen de temple del Acero AISI 1045

Régimen del Proceso	
Temperatura de Calentamiento	820 °C
Velocidad de Calentamiento	7 °C/min
Tiempo de permanencia	35 min
Velocidad de Enfriamiento	Dentro del horno (100°C/h)

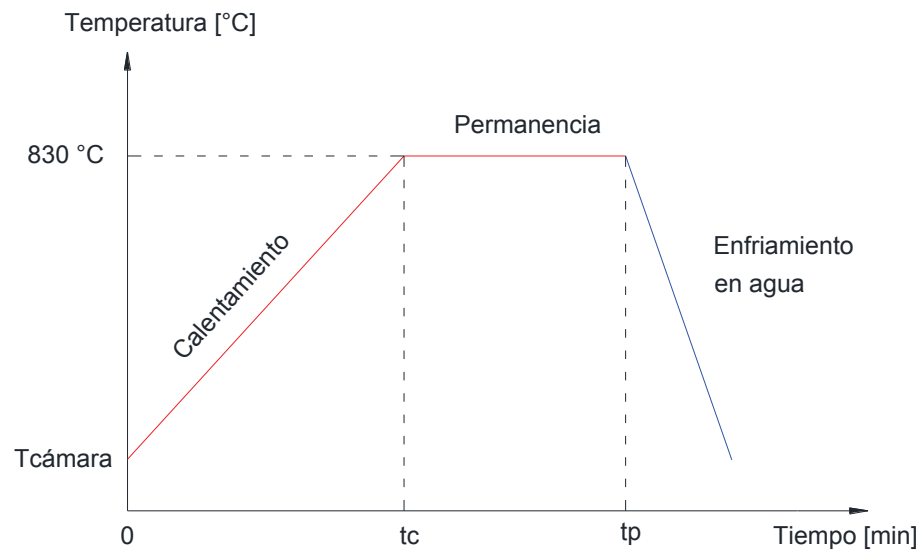


Figura 4.15. Régimen de temple acero AISI 1045

Los valores temperatura – tiempo de este proceso se pueden ver completos en la tabla del ANEXO 18.

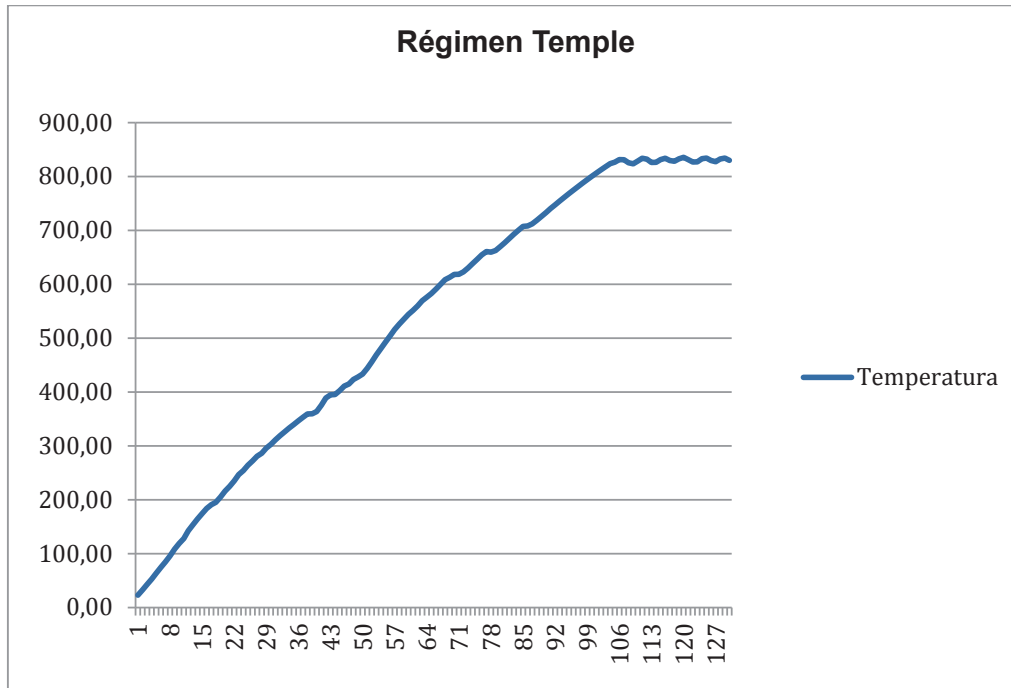


Figura 4.16. Régimen real del temple

4.8. REVENIDO DEL ACERO AISI 1045

Se le aplica un revenido de alta temperatura con los siguientes parámetros.

Tabla 4.7. Régimen de revenido del Acero AISI 1045

Régimen del Proceso	
Temperatura de Calentamiento	500 °C
Velocidad de Calentamiento	7 °C/min
Tiempo de permanencia	30 min
Velocidad de Enfriamiento	Al aire

Los valores temperatura – tiempo de este proceso se pueden ver completos en la tabla del ANEXO 18.



Figura 4.17. Revenido acero AISI 1045.

4.9. TEMPLE DEL ACERO STAVAX

EL acero STAVAX (AISI 420), es un material utilizado en moldes de inyección de plásticos, es un acero inoxidable especial y tiene un alto rango de temperatura de transformación austenítica entre 1000 y 1050 °C. Sus características y parámetros para el temple se presentan en el ANEXO 18.

Debido a su rango de transformación austenítica y al ser el único acero de estas características disponible en el mercado nacional, se utiliza como material óptimo para justificar el alcance del rango de trabajo de este horno.

Tabla 4.8. Régimen de temple del Acero STAVAX (AISI 420)

Régimen del Proceso	
Temperatura de Calentamiento	1050°C
Velocidad de Calentamiento	7 °C/min
Tiempo de permanencia	35 min
Velocidad de Enfriamiento	Dentro del horno (100°C/h)

Según el manual de aceros Böhler se le debe realizar un precalentamiento a 800°C por un tiempo de permanencia de 30 min.

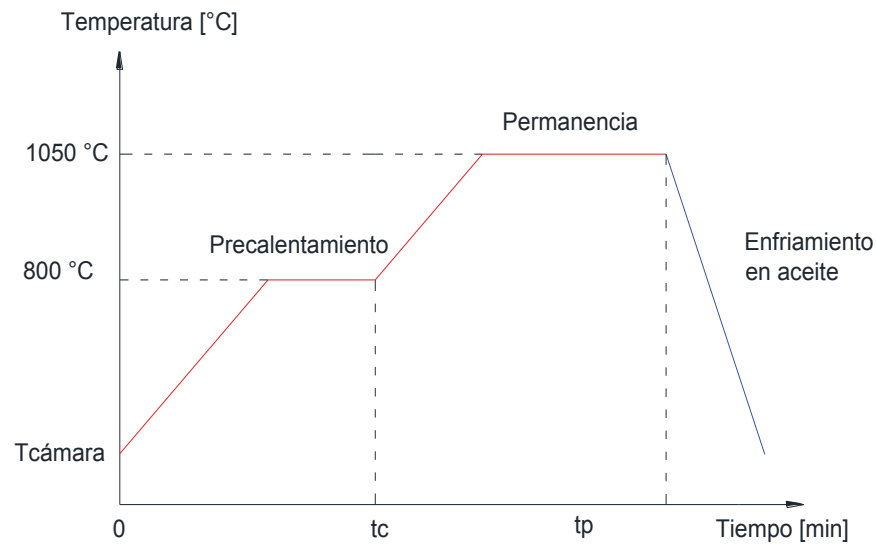


Figura 4.18. Régimen teórico de temple acero STAVAX (AISI 420)

Se preparan dos probetas, una será templada y la otra será templada y revenida, según las recomendaciones del catálogo Böhler del ANEXO 17.



Figura 4.19. Preparación de las probetas de acero STAVAX.

La tabla de temperatura – tiempo dada por el software de control, se presenta completa en el ANEXO 18.

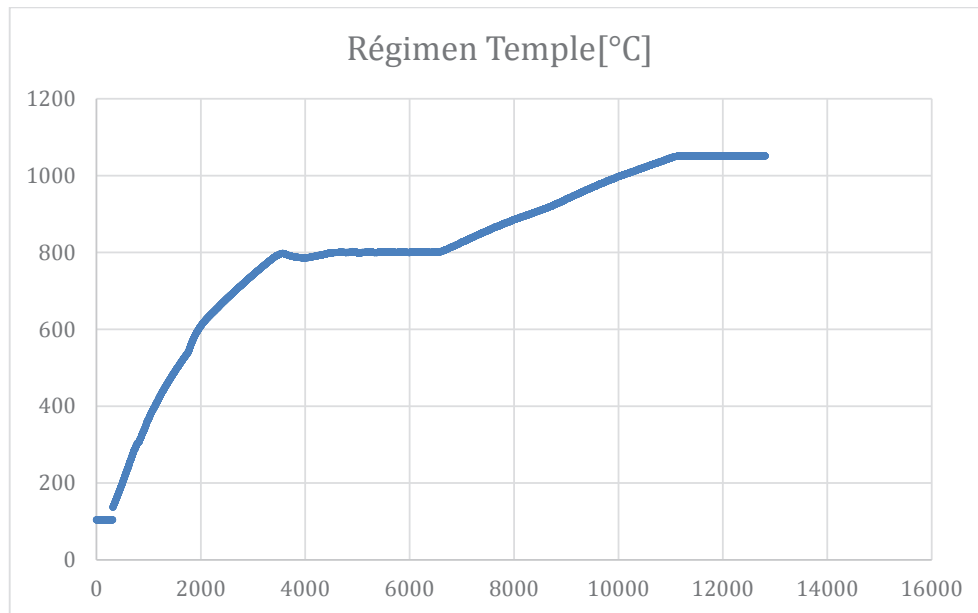


Figura 4.20. Régimen real temple acero STAVAX.

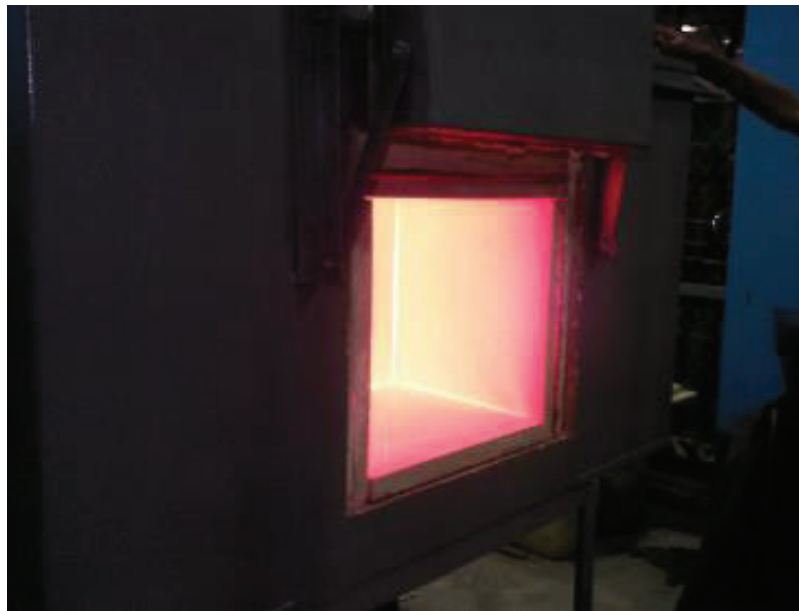


Figura 4.21. Tratamiento del acero STAVAX (AISI 420)

4.10. ANÁLISIS METALGRÁFICO Y DE DUREZAS

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento del horno, para aseverar el correcto desempeño del equipo, se efectúa un análisis de los resultados obtenidos.

4.10.1. ACERO AISI 1045

A las probetas de acero AISI 1045 se efectúan medidas de dureza y se realizan metalografías para comparar los resultados con el atlas metalográfico. Las probetas se pulieron según la norma y posteriormente se observaron con el microscopio.

Probeta Testigo

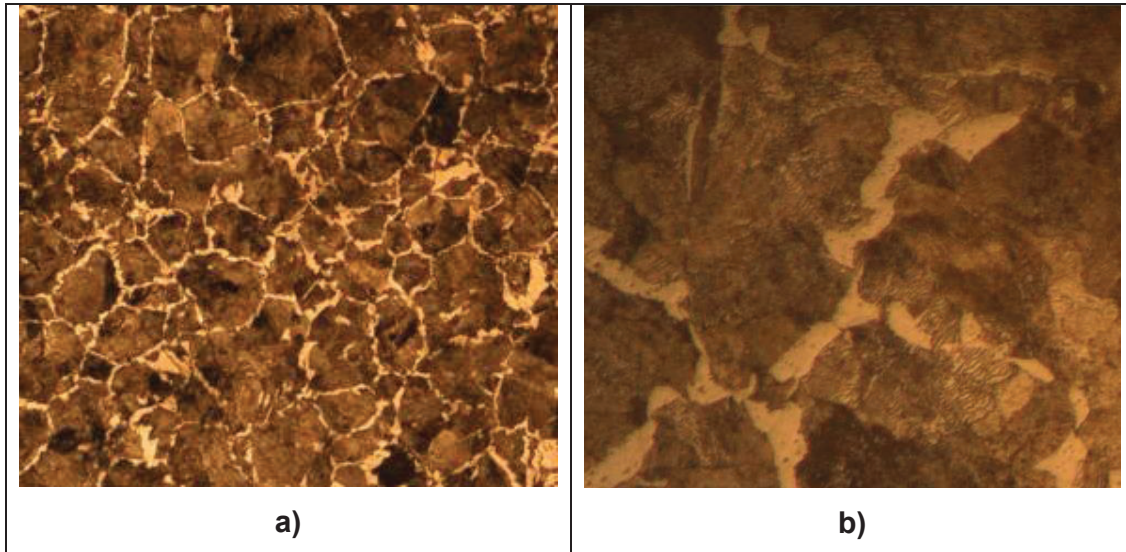


Figura 4.22. Metalografía del acero AISI 1045, probeta testigo, Nital 2%, a) 100 X
b) 500 X

Probeta Templada

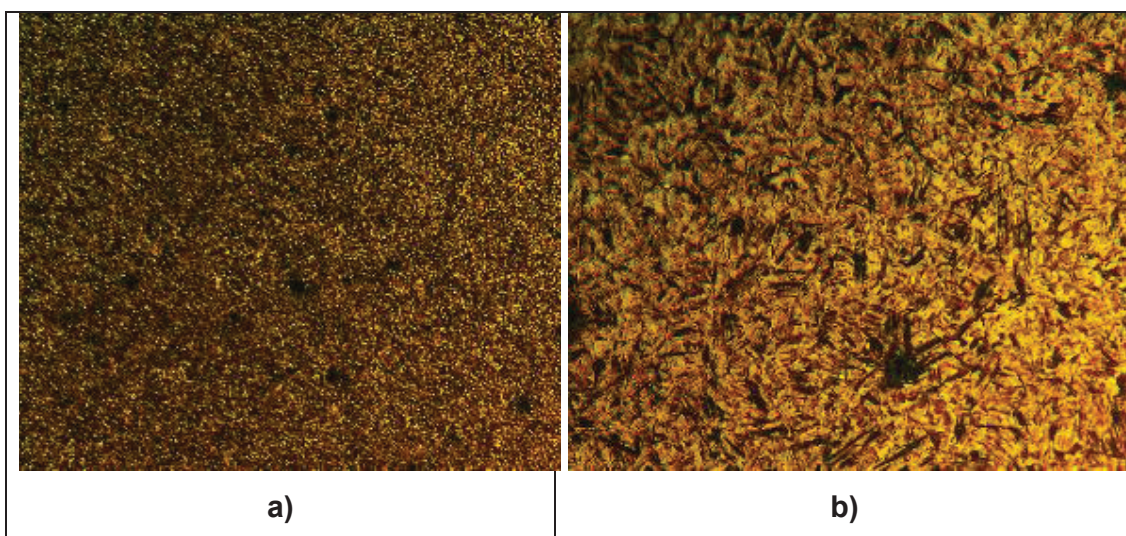


Figura 4.23. Metalografía del acero AISI 1045, probeta templada, Nital 2%, a) 100 X
b) 500 X

La microestructura es de una matriz martensítica en láminas lo que es característico de los aceros con un porcentaje menores al 0,6% C, y probablemente con algo de bainita.

Probeta de Recocido Completo

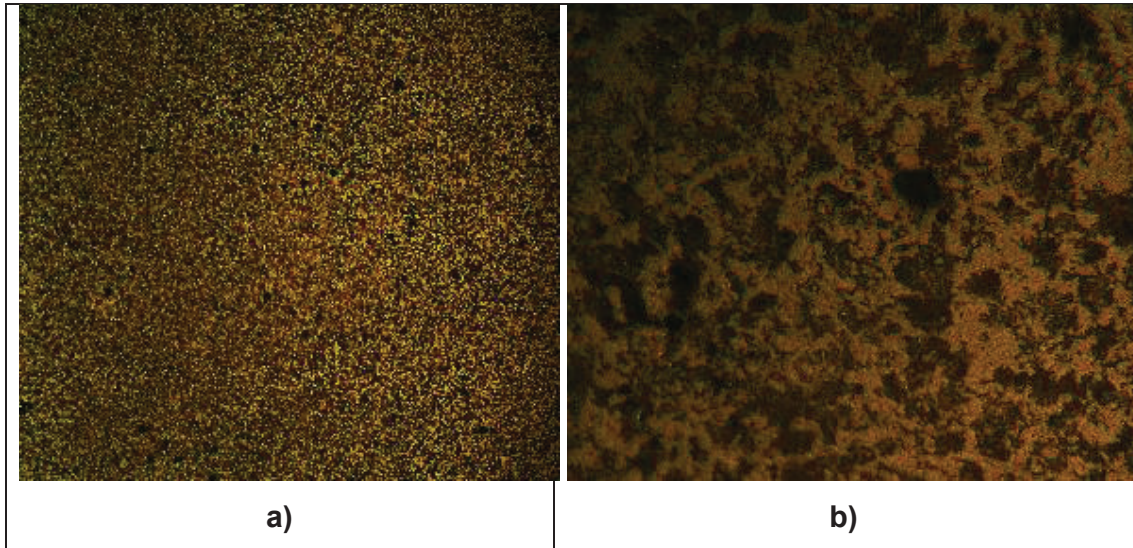


Figura 4.24. Metalografía del acero AISI 1045, probeta de recocido completo, Nital 2%, a) 100 X b) 500 X

Al igual que a anterior se puede observar una matriz de ferrita zonas más claras con algo de perlita entre las zonas clara y oscura, y carburos; no es muy claro pero en las metalografías se pudo también evidenciar la presencia de inclusiones metálicas.

Medidas de dureza acero AISI 1045

Luego de los ensayos de dureza se llegó a determinar las durezas en escala Rockwell B para las probetas luego de los tratamientos térmicos de recocido completo.

Tabla 4.9. Durezas del acero AISI 1045, recocido completo.

Probeta	Dureza HRB					Promedio
Recocido Completo	74	84	83	84	82	81

Tabla 4.10. Durezas del acero AISI 1045, Temple.

Probeta	Dureza HRC					Promedio
Temple	58	57	56	57	54	56

4.10.2. ACERO STAVAX (AISI 420)

A las probetas de acero STAVAX (AISI 420), solamente se efectúan medidas de dureza debido a que en el atlas metalográfico no existen aceros con composiciones similares.

Medidas de dureza Acero STAVAX (AISI 420)**Probeta Testigo****Tabla 4.11.** Durezas del acero STAVAX (AISI 420), Testigo.

Probeta	Dureza HRB					Promedio
Testigo	215	212	216	214	216	215

Probeta Templada**Tabla 4.12.** Durezas del acero STAVAX (AISI 420), Temple.

Probeta	Dureza HRC					Promedio
Temple	54	57	58	56	58	57

4.10.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las metalografías obtenidas para el acero AISI 1045 se analizaron comparándolas con el atlas metalográfico del ASM Handbook 9, según la composición del acero.

Considerando la dureza promedio del acero AISI 1045 que tiene un valor de 84 en la escala Rockwell B, con el recocido completo se obtuvo la dureza inicial del material, el material es más suave, por lo que el tratamiento realizado tiene los resultados esperados.

Los resultados de dureza obtenidos con el Acero STAVAX están dentro de los rangos que se indican en el catálogo del anexo 17, se tienen pequeñas variaciones en algunas medidas, esto se debe a que la pieza no alcanza la misma temperatura en toda la probeta.

La temperatura máxima teórica de diseño de la cámara fue de 1350°C, mientras que la temperatura máxima experimental obtenida fue de 1257°C, existiendo una diferencia de 6,8% que se puede atribuir a las consideraciones realizadas en el modelo matemático y los aspectos constructivos del horno. Esta diferencia en la temperatura no influye en el funcionamiento del horno, lo que se demostró en los tratamientos térmicos realizados en las pruebas.

La temperatura superficial exterior medida durante el funcionamiento alcanzó un valor promedio de 90°C, mientras que en el cálculo se obtuvo 117°C, diferencia que se puede relacionar a las resistencias térmicas de contacto y al material de unión de los ladrillos refractarios. Esta temperatura de 90°C es segura para el operario y se cumple con el objetivo de obtener una temperatura menor a 100°C.

La curva de variación real de la temperatura de la cámara del horno con el tiempo (figura 4.2.1) difiere en ciertos aspectos a la curva teórica obtenida del análisis transitorio (figura 2.5.2). El tiempo en el que el horno alcanza la temperatura máxima en el análisis transitorio bajo las consideraciones tomadas tiene un valor menor al valor obtenido en la práctica, siendo esta diferencia de aproximadamente una hora. La forma de la curva temperatura-tiempo simulada y

real corresponden a sistemas sobreamortiguados y se observa una pendiente ligeramente mayor en el caso de la simulación. Las diferencias se explican debido a que en el análisis teórico se optó por analizar la radiación de manera lineal mediante el coeficiente de transferencia de calor por radiación, no se consideró un análisis más riguroso del comportamiento de cada material del revestimiento y el contacto entre los mismos además se consideró las propiedades físicas como constantes para cada material.

CAPÍTULO V

MANUAL DE OPERACION

5.1. DESCRIPCIÓN

5.1.1. USO DEL HORNO

El horno AT-EPN001 se ha diseñado para tratar térmicamente aleaciones metálicas cuyas transformaciones de fase se den en el rango de temperaturas de entre 1000 y 1300 grados centígrados.

5.1.2. COMPONENTES DEL HORNO

A. Estructura metálica de soporte y transporte.

Soporta el peso del cuerpo del horno y facilita su movilización.

B. Cámara

Es el espacio interior que soporta la carga térmica y es donde se tratarán los materiales. Está delimitada por las placas porta resistencias y la solera.

i. Placas Porta Resistencias

Albergan las resistencias de calentamiento y permiten una radiación uniforme en la cámara.

ii. Solera

Es la base de la cámara y sobre esta se apoyan las piezas a tratarse, tiene una buena resistencia a la compresión.

C. Puerta

Permite el acceso a la cámara, y facilita la carga y descarga del material.

D. Revestimiento interior

Proporciona el aislamiento térmico de la cámara, evitando las pérdidas de calor hacia el exterior.

E. Revestimiento exterior

Reduce el contacto directo con el aislamiento y la cámara del horno.

F. Panel de protección y acceso a las conexiones eléctricas

Permite el acceso a las conexiones eléctricas y evita el contacto directo del usuario con las mismas.

G. Panel de Control

Permite el acceso a los elementos de control, y alberga los elementos de regulación y señalización (Luces Piloto).

H. Panel de acceso a la termocupla

Permite la revisión y mantenimiento de la termocupla.



Figura 5.1. Componentes del horno

5.1.3. ESPECIFICACIONES DEL HORNO

En esta sección se muestran las dimensiones generales del horno, las especificaciones generales y las especificaciones eléctricas. Se debe aclarar que debido a la simplicidad de la estructura en general y la configuración de los elementos que componen el horno no es necesario desarrollar planos constructivos y de montaje.

A. Dimensiones

Tabla 5.1. Dimensiones del Horno

DIMENSIONES		
Dimensión total		
Altura Total	Incluida la estructura soporte y ruedas de movilización, desde el piso	1,60 m
Profundidad Total	Incluida la cubierta de conexiones, contrapeso y la compuerta cerrada.	1,20 m
Largo Total	Incluido el panel de control y el contrapeso de la compuerta	1,70 m
Dimensión de la cámara		
Largo	Incluidas placas porta-resistencia y solera.	0,4 m
Ancho		0,4 m
Profundidad		0,4 m

B. Especificaciones Generales

Tabla 5.2. Especificaciones Generales del Horno

ESPECIFICACIONES GENERALES	
Peso	260 Kg
Volumen	3,26 m ³
Potencia nominal	12 kW
Temperatura máxima de operación	1300 °C
Velocidad de calentamiento	7 °C/min

C. Especificaciones Eléctricas

Tabla 5.3. Especificaciones Eléctricas del Horno

ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS	
Voltaje del circuito de control	110 V
Voltaje de la carga	220 V
Amperaje nominal	36 A
Frecuencia	60 Hz

5.2. OPERACIÓN

5.2.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLES



Figura 5.2. Ubicación del selector de encendido

Selector de encendido

Permite activar el paso de la corriente hacia la carga. Sin embargo el horno no se enciende mientras no reciba la señal del PLC.

5.2.2. OPERACIÓN NORMAL

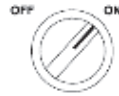
El tiempo de tratamiento y la temperatura de calentamiento para el horno se ingresan en el software de control. Una vez seteados los parámetros en el programa, no se deben ajustar durante la operación normal.

Procedimiento de Encendido

Girar la perilla del selector del horno a la posición "ON"



Encender el PLC.



Abrir el Software de Control en la computadora del laboratorio.

Configurar los siguientes parámetros según el régimen del proceso a realizarse en el software de control.

1. Temperatura de Calentamiento
2. Tiempo de permanencia
3. Tiempo de muestreo de adquisición de datos

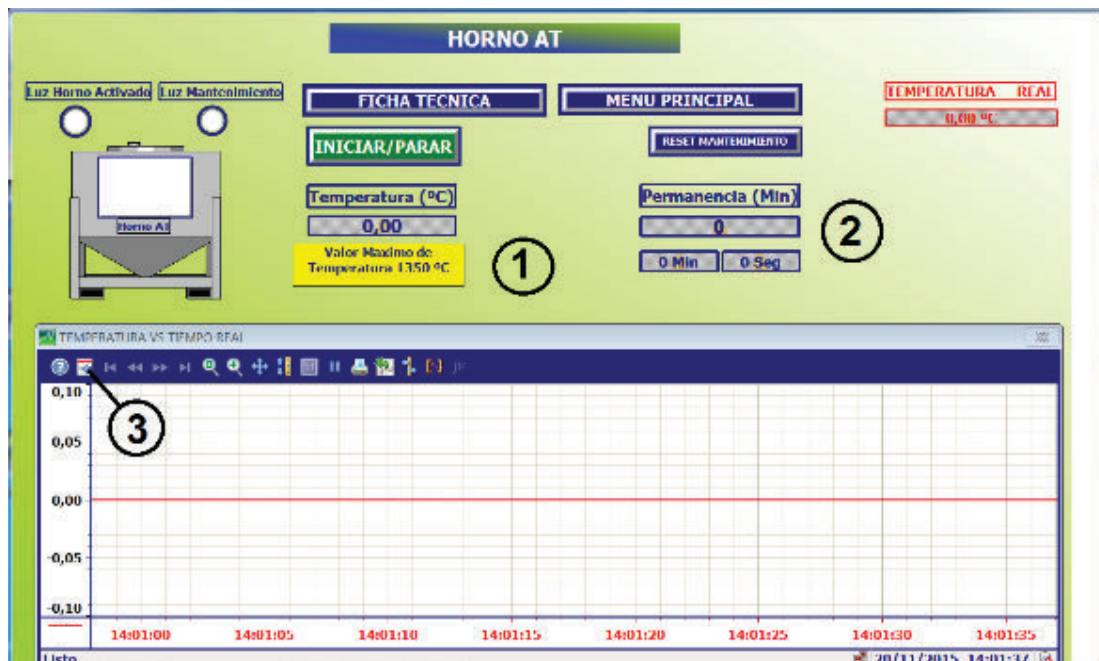


Figura 5.3. Interfaz de usuario del software de control

Una vez configurados los parámetros se inicia el proceso pulsando el botón “INICIAR/PARAR”.

Una vez finalizado el proceso, el programa presenta el aviso “Tratamiento Finalizado con Éxito”

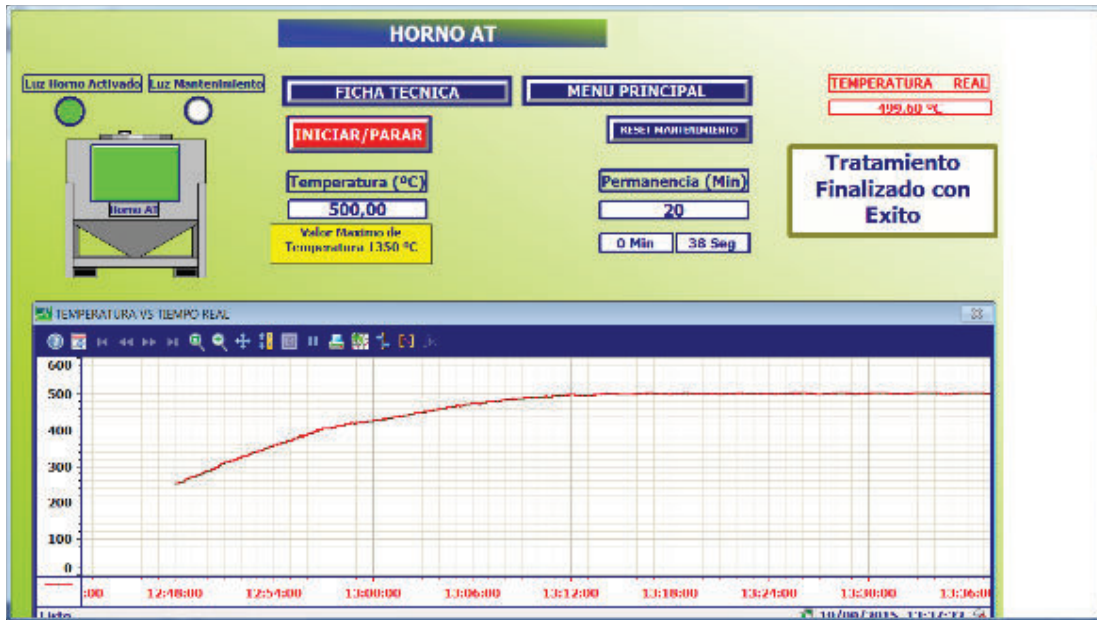


Figura 5.4. Interfaz mostrando el Tratamiento Finalizado

Para terminar el proceso se debe volver a pulsar el botón “INICIAR/PARAR”.

Información adicional respecto al software de control se encuentra en el proyecto de titulación referente a la automatización general de los hornos del Laboratorio de Tratamientos Térmicos elaborado por los Sres. William De la Vega y Sergio Enríquez.

5.2.3. DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS

En caso de que el horno no caliente, se procede a verificar lo siguiente:

Verificar que el selector tanto del PLC como del horno se encuentre en la posición de encendido. Si el problema persiste, se debe revisar las conexiones eléctricas y probar continuidad en el circuito de control y en las resistencias utilizando un multímetro.

En caso de que la discontinuidad se presente en las resistencias, se debe desconectar los terminales y verificar individualmente la continuidad en cada una de las resistencias utilizando un multímetro. Si alguna presenta discontinuidad se debe cambiar.

Si la discontinuidad se presenta en cualquiera de los elementos de regulación se debe proceder a cambiarlos, ya que indican que han llegado al fin de su vida útil o que hubo una sobrecarga en el sistema que produjo la falla.

En caso de que la temperatura real presentada en el programa sea mucho mayor a la temperatura máxima del horno, se debe revisar la conexión de la termocupla al PLC.

5.3. MANTENIMIENTO

EL software de control por defecto presenta una advertencia de mantenimiento por cada tres procesos realizados en el horno, sin embargo, se recomienda un mantenimiento de limpieza de la cámara luego de cada proceso de tratamiento térmico.

Se recomienda un mantenimiento mensual de la termocupla en el que se debe revisar la unión de par de terminales en el interior de la cámara, pues una mala conexión puede provocar valores erróneos de voltaje y por consiguiente de temperatura.

Se recomienda un mantenimiento trimestral del panel de control y las conexiones eléctricas de todo el sistema, en el que se debe realizar una limpieza del polvo para evitar el daño de los equipos y además revisar y ajustar de ser necesario, las conexiones entre los elementos, debido a que con la operación pierden su ajuste.

Además se debe revisar: la estabilidad de la fibra cerámica de la puerta que se debilita por el uso, si presenta un color amarillo debe reemplazarse y el estado de la pintura sobre todo en la superficie frente a la puerta cuando está levantada, debido a que por la radiación que emite la fibra cerámica caliente provoca su deterioro.

Se recomienda el reemplazo de las placas cuando presentan grietas debido a que no pueden repararse y pueden producir el colapso de la cámara inutilizando el horno.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido un horno para tratamientos térmicos calentado por resistencias eléctricas, con una potencia de 12 KW, una eficiencia del 60%, una velocidad de calentamiento máxima de 7 °C/min y una temperatura máxima de 1350°C; con este rango de temperaturas se abarcan los tratamientos para todos los aceros existentes en el mercado nacional.

Luego de realizar las pruebas de funcionamiento del horno y analizar los valores de diseño y experimentales para las distintas variables (Temperatura, tiempo, dimensiones) se observa que existe una correlación entre el modelo matemático utilizado en el diseño de todos los elementos que constituyen el horno y el comportamiento real del sistema.

Para los elementos calefactores, se seleccionó el alambre de resistencia tipo KANTHAL A1 de aleación, de acuerdo con la potencia obtenida de 12 KW, y con este se construyeron tres bobinas de 12 ohmios, conectadas en un delta equilibrado para que cada una disipe un tercio de la potencia total.

Cada uno de los materiales seleccionados para la construcción de los elementos del horno se ha desempeñado de forma correcta durante las pruebas de funcionamiento.

De acuerdo con la bibliografía consultada no se encontró una metodología que indique el proceso de construcción de elementos con el material Cóncrax, por lo que se desarrolló un procedimiento para la fabricación de placas del mismo en moldes de acrílico. Con esto se obtuvieron placas con un acabado superficial que permite una radiación uniforme en la superficie interior de la cámara.

Se seleccionaron los elementos de regulación del circuito eléctrico para proteger al sistema de sobrecargas, y adicionalmente se realizó un análisis de la respuesta para la selección del tipo de control a implementarse.

Se seleccionó el control tipo PID y se determinaron los parámetros para su implementación en el horno, posteriormente durante las pruebas de funcionamiento el sistema de control se desempeñó de manera óptima.

6.2. RECOMENDACIONES

Durante la operación no es recomendable alcanzar la temperatura máxima de 1350°C en el interior de la cámara, debido que por el gradiente de temperatura entre las resistencias y el aire interior, los elementos calefactores trabajan de manera forzada alcanzando su temperatura límite de diseño, esto puede ocasionar su falla y acortar su tiempo de vida.

En la construcción de las placas de Cónrax, controlar la proporción de agua y cemento (Cónrax 1500) durante la mezcla para que no se presente agrietamientos ni fisuras durante las dos etapas de secado, además la superficie del molde se debe cubrir con una fina capa de un lubricante generalmente aceite o diésel para facilitar el desmolde. También se debe colocar un peso sobre la tapa del molde para lograr un buen grado de compactación del material.

Durante el vaciado del material en los moldes de acrílico es recomendable en la primera etapa verterlo de manera continua para eliminar la porosidad y realizar una serie de pequeños agujeros en la tapa del molde para que durante el fraguado se elimine fácilmente la humedad.

En las conexiones de los terminales de las resistencias se debe utilizar pernos de acero inoxidable de un diámetro adecuado según la corriente en la línea con el fin de evitar un sobrecalentamiento en los terminales de conexión que produce que el alambre de alimentación se oxide y se rompa.

Disponer horizontalmente las resistencias eléctricas o si se dispone verticalmente llenar los espacios por donde pasan las resistencias con el mismo material con el que se elabora las placas portadoras de las resistencias para evitar que durante el calentamiento por efectos de dilatación térmica las espiras lleguen a toparse lo que causará que el cable de la resistencia se rompa por el aumento de la corriente.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTIGÁRRAGA, J. (1995). Hornos Industriales de Resistencias. Colombia: Mc Graw Hill.
- AVNER, H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. México: Mc Graw Hill.
- BARREIRO, A. (1984). Tratamientos Térmicos de los Aceros. España: 1984.
- CENGEL, Y. (2007). Transferencia de Calor y Masa. México: McGraw Hill.
- CREUS, A. (1997). Instrumentación Industrial. México D.F.: AlfaOmega.
- HOLMAN, J. (1999). Transferencia de Calor. México: Continental S.A.
- INCROPERA, F. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Prentice Hall.
- KREITH, F. (2011). Principios de Transferencia de Calor. México: Cengage Learning.
- MOLERA, P. (1991). Tratamiento Térmico de los Metales. Barcelona: Marcombo S.A.
- NORTON, F. (1949). Refractories. New York: McGraw - Hill.
- RUIZ, R. (2007). Tratamientos Térmicos. Quito: EPN.
- WELTY, J. (1994). Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería. México: Limusa.
- OGATA, K. (2010). Ingeniería de Control Moderna. Madrid: Pearson
- KANTHAL. (2003). Kanthal Handbook. Suiza: Primatryck
- MANHINNEY, T. (1971). Hornos Industriales. Bilbao:Urmo1971

REFERENCIAS DE INTERNET

<http://www.ntsudamericana.com/images/stories/PDF/ntn%20bearing%20units%20hand%20book.pdf>

http://www.seatsinc.com/images/technical_drawings/trimline.pdf

<http://www.whitman.edu/mathematics/calculus/>

<http://roestv.wordpress.com/2011/11/03/descargar-windows7-ultimate/>

<http://mtixtl.com/machineflyer/Handbook.pdf>

<http://heatingelements.hitempproducts.com/Asset/The-Kanthal-Furnace-Mini-Handbook---Metric-version-.pdf>

http://processmodeling.org/model_ht/furnace3.html

<http://materialidad2010.files.wordpress.com/2010/05/11601.pdf>

<http://www.arquimaster.com.ar/articulos/articulo410.htm>

<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.REFRACTARIOS.PROPIEDADES.Termicas.pdf>

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7609/Capitulo3.pdf>

<http://expodime.cucei.udg.mx/sep2009/memorias/hornoelectrico.pdf>

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1398/1/15T00485.pdf>

TESIS

ANDRADE, Construcción de un horno de resistencias eléctricas para tratamiento térmico en Baño de Sales, EPN 1988

HERRERA Y VÁSQUEZ, Diseño, programación e instalación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno Linberg para el laboratorio de tratamientos térmicos, EPN 2011

DE LA VEGA, ENRIQUEZ, Diseño e implementación de un sistema de control automático para seis hornos del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional, EPN 2015

HERRERA, Diseño e Implementación de un Sistema para Automatización de Dos Hornos para Tratamiento Térmico pertenecientes al Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, EPN 2015

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla de propiedades del aire seco a presión atmosférica.

Thermodynamic Properties of Gases

TABLE 28 Dry air at atmospheric pressure

Temperature, T	Density, ρ		Coefficient of Thermal Expansion, $\beta \times 10^3$	Specific Heat, c_p	Thermal Conductivity, k	Thermal Diffusivity, $\alpha \times 10^6$	Absolute Viscosity, $\mu \times 10^6$	Kinematic Viscosity, $\nu \times 10^6$	Prandtl Number, Pr	$\frac{g\beta}{\nu^2} \times 10^{-8}$
	$^{\circ}\text{C}$	(kg/m^3)								
	$\times 6.243 \times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 0.5556$	$\times 2.388 \times 10^{-4}$	$\times 0.5777$	$\times 3.874 \times 10^4$	$\times 0.6720$	$\times 3.874 \times 10^4$	$\times 1.573 \times 10^{-2}$	$\times 1.573 \times 10^{-2}$
$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	$(\text{lb}_m/\text{ft}^3)$	$(1/R)$	$(\text{Btu}/\text{lb}_m \text{ } ^{\circ}\text{F})$	$(\text{Btu}/\text{h ft } ^{\circ}\text{F})$	(ft^2/h)	$(\text{lb}_m/\text{ft s})$	(ft^2/h)	$(\text{lb}_m/\text{ft}^3)$	$(1/R \text{ ft}^3)$
32	273	0	3.66	1011	0.0237	19.2	17.456	13.9	0.71	1.85
68	293	20	3.41	1012	0.0251	22.0	16.240	15.7	0.71	1.36
104	313	40	3.19	1014	0.0265	24.8	19.123	17.6	0.71	1.01
140	333	60	3.00	1017	0.0279	27.6	19.907	19.4	0.71	0.782
176	353	80	2.83	1019	0.0293	30.6	20.790	21.5	0.71	0.600
212	373	100	2.68	1022	0.0307	33.6	21.673	23.6	0.71	0.472
392	473	200	2.11	1035	0.0370	49.7	25.693	35.5	0.71	0.164
572	573	300	1.75	1047	0.0429	68.9	29.322	49.2	0.71	0.0709
752	673	400	1.49	1059	0.0485	89.4	32.754	64.6	0.72	0.0350
932	773	500	1.29	1076	0.0540	113.2	35.794	81.0	0.72	0.0193
1832	1273	1000	0.79	1139	0.0762	240	48.445	181	0.74	0.00236

Source: K. Raznjević, *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, McGraw-Hill, New York, 1976.

ANEXO 2

Cálculos de potencia en circuitos trifásicos

Chromalox Technical Documents

Información Técnica

Información técnica

Fundamentos eléctricos y cálculos trifásicos

La Ley de Ohm

La relación entre la emisión de vatiaje (calor) y el voltaje aplicado de los elementos de calentamiento de resistencia eléctrica se determina por una regla física precisa definida como la Ley de Ohm, la cual establece que la corriente en un elemento de calentamiento resistivo es directamente proporcional al voltaje aplicado. La Ley de Ohm se expresa tradicionalmente como:

$$I = \frac{E}{R}$$

Donde: I = Amperes (Corriente)
E = Voltaje
R = Ohms (Resistencia)

La misma ecuación usando la abreviación convencional para el voltaje es:

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

Donde: I = Amperes (Corriente)
V = Voltaje
R = Ohms (Resistencia)

Un valor eléctrico desconocido puede calcularse usando los otros dos valores conocidos en una de las variaciones de la ley de Ohm mostrada a la derecha.

Relaciones de voltaje y vatiaje

Un elemento de resistencia eléctrica sólo produce un valor de vatiaje dado a un valor de voltaje dado. Esto es común para elementos de calentamiento eléctrico y conjuntos que van a ser conectados en un amplio rango de voltajes de operación. Dado que la salida de vatiaje varía directamente con la rata del cuadrado del voltaje, el vatiaje actual puede ser calculado para cualquier voltaje aplicado. La relación es expresada por la ecuación presentada abajo,

$$W_A = W_R \times \left(\frac{V_A}{V_R}\right)^2$$

Donde: W_A = Vatiaje existente
 W_R = Vatiaje nominal
 V_A = Voltaje aplicado
 V_R = Voltaje nominal

Ecuaciones trifásicas (balanceadas)

La ley de Ohm como se estableció arriba, se aplica a los elementos de resistencia eléctrica operados en circuitos monofásicos. La ley de Ohm puede ser modificada para calcular valores trifásicos adicionando un factor de corrección para las relaciones del voltaje de fase. Las ecuaciones trifásicas pueden aplicarse a cualquier circuito delta o estrella. Los términos usados en las ecuaciones son identificados abajo:

- V_L = Voltaje de línea
- V_F = Voltaje de fase
- I_L = Corriente de línea (A)
- I_F = Corriente (A)
- W_T = Vatiaje total
- R_1, R_2, R_3 = Resistencia del elemento
- W_C = Vatiaje por circuito (circuitos iguales)
- R_C = Resistencia del circuito en Ohm medida fase a fase

VOLTIOS

$$VOLTIOS = \sqrt{VATIOS \times OHMS}$$

$$VOLTIOS = \frac{VATIOS}{AMPERIOS}$$

$$VOLTIOS = AMPERIOS \times OHMS$$

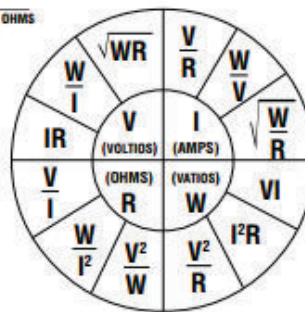
OHMS

$$OHMS = \frac{VOLTIOS}{AMPERIOS}$$

$$OHMS = \frac{VATIOS}{AMPERIOS^2}$$

$$OHMS = \frac{VOLTIOS^2}{VATIOS}$$

LEY DE OHM



AMPERIOS

$$AMPERIOS = \frac{VOLTIOS}{OHMS}$$

$$AMPERIOS = \frac{WATIOS}{VOLTIOS}$$

$$AMPERIOS = \sqrt{\frac{WATIOS}{OHMS}}$$

VATIOS

$$VATIOS = VOLTIOS \times AMPERIOS$$

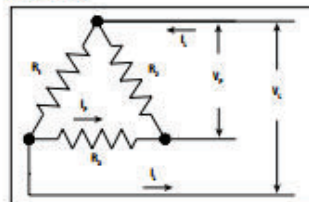
$$VATIOS = AMPERIOS^2 \times OHMS$$

$$VATIOS = \frac{VOLTIOS^2}{OHMS}$$

Porcentaje de vatiaje nominal para varios voltajes aplicados

Voltaje aplicado	Voltaje nominal																
	110	115	120	208	220	230	240	277	380	415	440	460	480	575			
110	100	91	84	28	25	23	21	16	8.4	7.0	6.2	5.7	5.2	3.7			
115	109	100	92	31	27	25	23	17	9.0	7.6	6.7	6.2	5.7	4.0			
120	119	109	100	33	30	27	25	19	10	8.4	7.4	6.8	6.3	4.3			
208	—	—	300	100	89	82	75	56	30	25	22	20	19	13			
220	—	—	—	112	100	91	84	63	34	28	25	23	21	15			
230	—	—	—	122	109	100	92	69	37	31	27	25	23	16			
240	—	—	—	133	119	109	100	75	40	33	30	27	25	17			
277	—	—	—	—	—	—	133	100	53	45	40	36	33	23			
380	—	—	—	—	—	—	—	188	100	84	74	68	63	44			
415	—	—	—	—	—	—	—	—	119	100	89	81	75	52			
440	—	—	—	—	—	—	—	—	—	112	100	91	84	58			
460	—	—	—	—	—	—	—	—	—	123	109	100	92	64			
480	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	119	109	100	70			
550	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	156	143	131	91			
575	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	171	156	144	100			
600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	186	170	156	109			

3Ø Delta



$$V_p = V_L$$

$$W_T = 1.73 I_L \times V_L$$

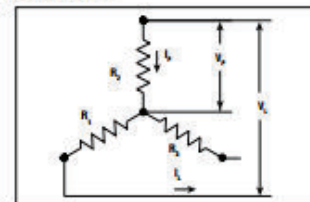
$$I_p = I_L + 1.73$$

$$W_C = 1.73 I_L \times V_L + \# \text{ circuitos}$$

$$R_C = (2 \times V_L^2) + W_C$$

Nota: Para conexiones abiertas tipo delta, vea la próxima página.

3Ø Estrella



$$V_p = V_L + 1.73$$

$$W_T = 1.73 I_L \times V_L$$

$$I_p = I_L$$

$$W_C = 1.73 I_L \times V_L + \# \text{ circuitos}$$

$$R_C = (2 \times V_L^2) + W_C$$

Nota: Para conexiones en estrella abiertas, vea la próxima página.

ANEXO 3

Propiedades de las aleaciones de Khantal

Physical and Mechanical Properties

KANTHAL and NIKROTHAL alloys are generally available in wire or strip form. Physical and mechanical properties of the alloys are listed in Table 2.

Table 2. KANTHAL and NIKROTHAL, Wire and Strip.

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80	NIKROTHAL 70	NIKROTHAL 60	NIKROTHAL 40
Max continuous operating temp., °C	1425	1400	1300	1300	1200	1250	1150	1100
°F	2600	2550	2370	2370	2190	2280	2100	2010
Nominal composition, % Cr	22	22	22	22	20	30	15	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	80	70	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cm ²	872	872	836	812	655	704	668	626
Density, g/cm ³	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.1	8.2	7.9
lb/in ³	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300	0.296	0.296	0.285
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹								
20-750°C, 68-1380°F	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	16.10 ⁻⁶	16.10 ⁻⁶	18.10 ⁻⁶
20-1000°C, 68-1838°F	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	18.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	19.10 ⁻⁶
Thermal conductivity at 20°C								
W m ⁻¹ K ⁻¹	13	13	13	13	15	13	13	13
68°F, Btu in ft ⁻² h ⁻¹ °F ⁻¹	90	90	90	90	104	90	90	90
Specific heat capacity								
KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ , 20°C	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.50
Btu lb ⁻¹ °F ⁻¹ , 68°F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.119
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390
°F	2730	2730	2730	2730	2550	2515	2535	2535
Mechanical properties (approx.)*								
Tensile strength, N mm ⁻²	880	880	880	880	750	875	750	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000	127000	109000	109000
Yield point, N mm ⁻²	445	445	445	445	450	450	450	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness, Hv	230	230	230	230	180	185	180	180
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30	30	30	30
Tensile strength at 900°C, Nmm ⁻²	40	34	37	34	100	120	100	120
1650°F, psi	5800	5000	5400	5000	14500	17400	14500	17400
Creep strength at 800°C, N mm ⁻²	14	6	8	6	15	15	15	20
1000°C, N mm ⁻²	1.8	1	1.5	1	4	4	4	4
1470°F, psi	2000	870	1160	870	2160	2160	2160	2160
1830°F, psi	260	145	215	145	580	580	580	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 800°C 1100°F) Non							
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	Slightly 0.88	Non 0.88

*) The values given apply for sizes of 4 mm, 0.16 in diameter for the KANTHAL alloys and of 1 mm, 0.04 in for the NIKROTHAL alloys.

ANEXO 4

Furnace wall loading

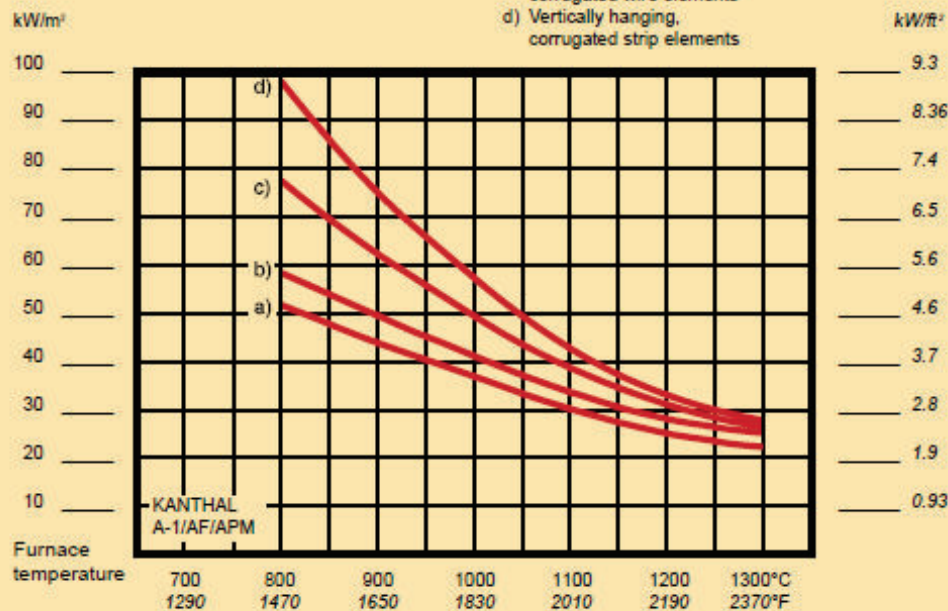
Figure 3 shows the maximum recommended wall loading for four different element types. Please note that the furnace wall loading depends on both element type and element surface load. The lower the surface load, the longer the element life will be. (For description of the element types, see page 7).

When elements are placed on the base of a furnace, special attention must be paid to avoid overheating of the elements. For example, with a hearth plate having a thermal conductivity of $(\lambda)=1.0 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ } 6.39 \text{ Btu in ft}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$ and thickness of 15 mm, 0,63 in, at a power concentration on the bottom surface of 15 kW/m^2 , 1.4 kW/ft^2 , a temperature drop of 225°C , 435°F is obtained through the plate. The total temperature difference between the

base elements and the furnace temperature would thus be about 375°C , 700°F . This imposes a furnace operating temperature of 1000°C , 1830°F even when using the high-temperature KANTHAL A-1 alloy, since the element temperature will be about 1375°C , 2500°F .

The example illustrates the significance of choosing a hearth plate of a material having good thermal conductivity, for example silicon carbide or heat-resistant steel. Beside measuring the temperature in the furnace chamber, it may also be advisable to measure the temperature of the base elements by means of a separate thermocouple.

Fig. 3 Maximum recommended wall loading as a function of furnace temperature for different element types.



ANEXO 5

Element surface load

Since KANTHAL alloys can be operated at higher temperatures than NIKROTHAL alloys, a higher surface loading can be achieved without jeopardizing the life. Element design is also of great importance. The more freely radiating the element form, the higher the maximum surface load. Therefore the R.O.B. (Rod Over Bend) type element (corrugated heavy wire, mounted on the surface), can be loaded the highest, followed by the corrugated strip element.

Spiral elements on ceramic tubes can be loaded higher than spiral elements in grooves.

The values in Fig. 4 are given for the following design conditions:

Element a

Wire and strip element in grooves. Wire diameter min. 3 mm, 0.12 in, strip thickness min. 2 mm, 0.08 in.

Element b

Wire element on ceramic tube
Wire diameter min. 3 mm 0.12 in.

Element types c (strip) and d (heavy wire)

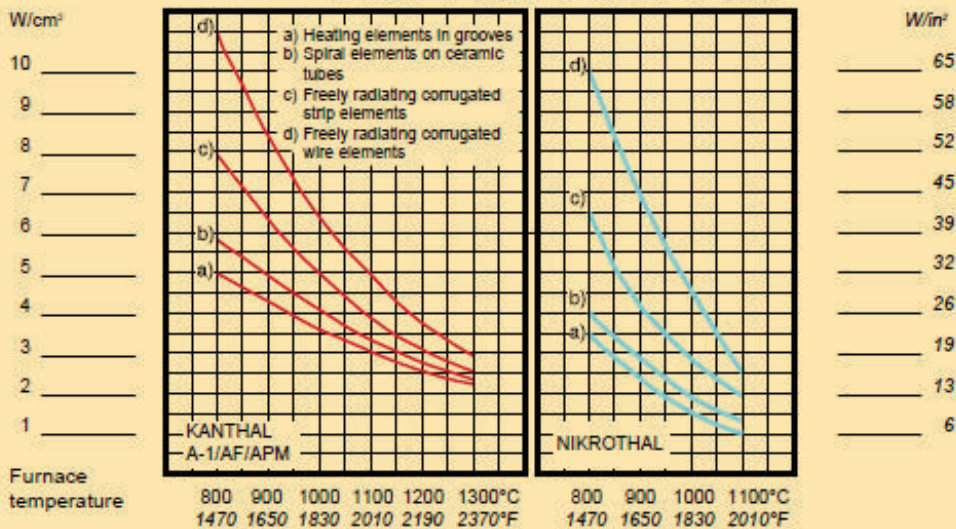
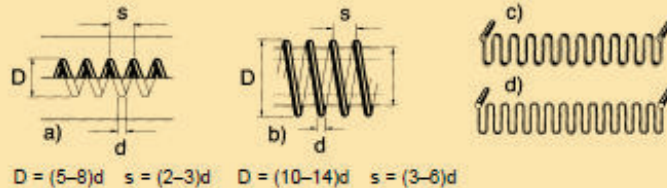
Strip thickness min. 2.5 mm, 0.1 in. Wire diameter min. 5 mm, 0.2 in. Pitch min. 50 mm, 2.0 in at maximum loop length and maximum surface load.

Maximum recommended loop length:

<900°C	<1650°F	300 mm	11.8 in
1000°C	1820°F	250 mm	9.8 in
1100°C	2010°F	200 mm	7.9 in
1200°C	2190°F	150 mm	5.9 in
1300°C	2370°F	100 mm	3.9 in

For finer wire diameters and smaller strip thicknesses lower surface loads and shorter loop lengths must be chosen to avoid element deformation and subsequent shorter element life.

Fig. 4 Maximum recommended surface loads for KANTHAL and NIKROTHAL alloys in industrial furnaces.



Note: The diagram is valid for thyristor control. For on-off control lower surface loads should be chosen. (About 20%).

ANEXO 6

Coeficiente de temperatura para el Kanthal A-1

KANTHAL A-1 and APM

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.45 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. Density 7.1 g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Wire dia mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.85	5.58	17.0	5.0x1.0	0.290	35.5	414
1.1*)	1.53	6.75	22.7	10.0x1.0	0.145	49.7	1520
1.2	1.28	8.03	29.4	15.0x1.0	0.0967	107	3310
1.3*)	1.09	9.43	37.4	20.0x1.0	0.725	142	5790
1.4*)	0.942	10.9	46.7	12.0x1.2	0.101	102	2620
1.5	0.821	12.5	57.4	15.0x1.2	0.101	128	4020
1.8*)	0.721	14.3	69.7	10.0x1.5	0.097	107	2380
1.7	0.639	16.1	83.6	12.0x1.5	0.0806	128	3350
1.8	0.570	18.1	99.2	15.0x1.5	0.0644	160	5120
2.0	0.462	22.3	136	20.0x1.5	0.0483	213	8900
2.2	0.381	27.0	181	25.0x1.5	0.0387	266	13700
2.3	0.349	29.5	207	30.0x1.5	0.0320	320	19600
2.4*)	0.321	32.1	235	15.0x2.0	0.0483	213	7040
2.5	0.295	34.9	266	20.0x2.0	0.0363	284	12100
2.6	0.273	37.7	299	25.0x2.0	0.0290	355	18600
2.8	0.235	43.7	374	30.0x2.0	0.0242	426	26500
2.9	0.219	47.0	416	20.0x2.5	0.0290	355	15500
3.0	0.205	50.2	460	25.0x2.5	0.0232	444	23700
3.25	0.175	58.9	584	30.0x2.5	0.0193	533	33600
3.5	0.151	68.3	730	20.0x3.0	0.0242	426	19008
3.75	0.131	78.4	897	25.0x3.0	0.0193	533	26200
4.0	0.115	89.2	1090	30.0x3.0	0.0161	639	41000
4.25	0.102	101	1306				
4.5	0.0912	113	1550				
4.75	0.0818	126	1824				
5.0	0.0738	139	2127				
5.5	0.0610	169	2831				
6.0	0.0513	201	3676				
6.5	0.0437	236	4673				
7.0	0.0377	273	5840				
7.35	0.0340	300	5840				
8.0	0.0288	357	8690				
8.25	0.0271	380	9560				
9.5	0.0205	503	14600				
10.0	0.0185	558	17000				

*) only A-1

ANEXO 7

Relaciones para determinar el diámetro de alambre para resistencia eléctrica

Formulas and definitions

The following formulas and definitions are applied to all applications.

Definition: Resistivity, ρ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (Ω/cmf)

The resistance of a conductor, R_{20} , is directly proportional to its length, L and inversely proportional to its cross-sectional area, q :

$$R_{20} = \rho \frac{L}{q} \quad \Omega \quad [1]$$

The proportional constant, ρ is defined as the resistivity of the material and is temperature dependent. The unit of ρ is $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (Ω/cmf).

Definition: Temperature factor, C_t

Resistivity or change in resistance with temperature, is non-linear for most resistance heating alloys. Hence, the temperature factor, C_t , is often used instead of temperature coefficient. C_t is defined as the ratio between the resistivity or resistance at some selected temperature T °C and the resistivity or resistance at 20°C (68°F).

$$R_T = C_t \cdot R_{20} \quad \Omega \quad [2]$$

$$C_t = \frac{R_T}{R_{20}} \quad [3]$$

$$C_t = 1 + (T - 20)\alpha \quad (\text{where } T \text{ is in } ^\circ\text{C}) \quad [4]$$

Definition: Surface load, p W/cm^2 (W/in^2)

The surface load of a heating conductor, p , is its power, P , divided by its surface area, A_c .

$$p = \frac{P}{A_c} \quad \text{W}/\text{cm}^2 \quad (\text{W}/\text{in}^2) \quad [5]$$

Wire

$$A_c = \pi \cdot d \cdot L \cdot 10 \quad (\text{metric}) \quad [6]$$

$$A_c = \pi \cdot d \cdot L \cdot 12 \quad (\text{imperial}) \quad [6]$$

Strip /ribbon

$$A_c = 2 \cdot (b + t) \cdot L \cdot 10 \quad (\text{metric}) \quad [7]$$

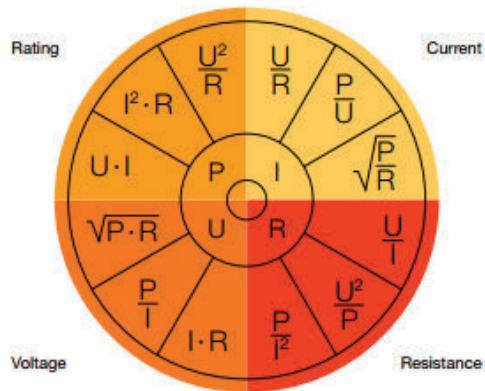
$$A_c = 2 \cdot (b + t) \cdot L \cdot 12 \quad (\text{imperial}) \quad [7]$$

General formulas

$$U = R_T \cdot I \quad \text{V} \quad [8]$$

$$P = U \cdot I \quad \text{W} \quad [9]$$

Combining equations [8] and [9] gives:



Combining equations [2], [5], [8] and [9] gives:

$$\frac{A_c}{R_{20}} = \frac{P \cdot C_t}{P} \quad \text{cm}^2/\Omega \quad (\text{in}^2/\Omega) \quad [10]$$

The ratio $\frac{A_c}{R_{20}}$, used for determining wire, strip or ribbon size, is tabulated for all alloys in the handbook for 'Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces'.

Definition: Cross sectional area, q mm² (in²)

Round wire

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [11]$$

Combining equations [1], [5], [6] and [11] gives the wire diameter, d :

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}}} \quad \text{mm (in)} \quad [12]$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}} \cdot \frac{1}{10}} \quad \text{(metric)} \quad [12]$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}} \cdot \frac{1}{15.28 \cdot 10^6}} \quad \text{(imp.)} \quad [12]$$

Example:

$\rho = 1.35 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (812 Ω/cmf) for Kanthal D (according to section 2)

$P = 1000 \text{ W}$

$p = 8 \text{ W/cm}^2$ (51.6 W/in^2)

$R = 40 \Omega$

According to equation [12]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{1.35 \cdot 1000}{8 \cdot 40} \cdot \frac{1}{10}} = 0.55 \text{ mm}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{812 \cdot 1000}{51.6 \cdot 40} \cdot \frac{1}{15.28 \cdot 10^6}} = 0.022 \text{ in}$$

Strip

$$q = b \cdot t \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [13]$$

Ribbon

Since ribbons are made by flattening round wires, the cross-sectional area is somewhat smaller depending on size, than equation [13] indicates. As a rule of thumb, a factor 0.92 is used.

$$q = 0.92 \cdot b \cdot t \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [14]$$

Lately, investigations have shown that a more correct way of expressing the cross-sectional area of ribbon is:

$$q = \left[0.985 - \left(\frac{t}{2 \cdot b} \right)^2 \right] \cdot b \cdot t \quad [14']$$

(Equation [14] is, however, used throughout this handbook).

Definition: Number of turns, n

$$n = \frac{L_s}{s} \quad [15]$$

Definition: Coil pitch, s mm (in)

A round wire is often wound as a coil. For calculating coil pitch, s , the equation [16] applies:

$$\left(\frac{\pi \cdot (D-d)}{s} \right)^2 + 1 = \left(\frac{L}{L_s} \right)^2 \rightarrow s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left(\frac{L}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{mm} \quad [16]$$

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left(\frac{L \cdot 1000}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{(metric)} \quad [16']$$

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left(\frac{L \cdot 12}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{(imperial)} \quad [16'']$$

When the pitch, s , is small relatively to coil diameter, D , and wire diameter, d .

Than $\frac{s}{\pi(D-d)} \ll L$, so that equation [16] can be simplified to:

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d) \cdot L_s}{L} \quad \text{mm (in)} \quad [17]$$

Definition: Relative pitch, r

The ratio s/d is often used. It is called the relative pitch or the stretch factor, and may affect the heat dissipation from the coil.

$$r = \frac{s}{d} \quad [18]$$

The ratio D/d is essential for the coiling operation, as well as the mechanical stability of the coil in a hot state.

ANEXO 8

Características técnicas del alambre MIG/MAG de Indura

VS EN 7030 / EN 4630

Composición química típica del alambre

	INDURA	Especif. AWS
Carbon	0,09%	0,06/0,15
Manganeso	1,45%	1,40/1,85
Silicio	0,06%	0,00/1,15
Fósforo	< 0,02%	0,025 máx.
Azufre	< 0,02%	0,035 máx.

Propiedades mecánicas típicas (AWS: A5, 18-01)

Medida	Alambre INDURA gas aplicado 100% CO ₂	Alambre INDURA gas aplicado 75% Ar - 25% CO ₂	Alambre INDURA gas aplicado 80% Ar - 20% CO ₂	Especif. AWS gas aplicado 100% CO ₂
Resist. tracción	MPa 520	535	530	480
Resist. fluencia	MPa 440	450	450	400
Alargamiento	% en 50 mm 28%	31%	32,8%	22% mín.
Charpy-V -20°C	Joules 50,2	54,0	56,4	27 mín.

Tabla de regulación Sistema MIG

Diámetro (mm)	Entrega de material (mm)	Corriente (Amps)	Voltaje (Volts)	Velocidad alambre (m/min)	Flujo gas (l/min)
0,8	0,8	30 - 50	16 - 17	1,3 - 1,8	8 - 10
	0,8	35 - 60	16 - 17,5	1,3 - 2,0	8 - 11
	0,9	40 - 70	17 - 18	1,5 - 3,0	9 - 11
0,9	1,3	70 - 90	18 - 19	3,0 - 3,6	10 - 12
	1,6	80 - 110	19 - 20	3,3 - 3,8	11 - 13
	2,0	120 - 130	20 - 21	3,6 - 4,1	11 - 14
1,2	3,2	120 - 180	20 - 22	4,6 - 6,1	11 - 16
	4,7	160 - 180	21 - 22	5,1 - 6,1	14 - 17
	6,4	190 - 200	22 - 23	6,4 - 7,1	14 - 17
	7,9	200 - 210	23 - 24	7,0 - 7,4	14 - 17
	9,4	220 - 250	24 - 25	7,5 - 8,9	14 - 17
	12,7	240 - 260	28 - 29	8,4 - 9,5	14 - 17
1,6	19,0	280 - 300	30 - 32	4,6 - 5,1	17 - 19

ANEXO 9

Características técnicas de Fusibles

Fusibles y Seccionadores Fusibles

Fusibles Cilindricos - 2-63A. Según UNE-EN60269-1,-2



RT18-RT14

Características

Los fusibles cilindricos de la serie RT18 han sido diseñados para trabajar en circuitos de corriente alterna de hasta 400V con una frecuencia de 50/60Hz., para la protección contra sobrecargas y cortocircuitos.

Tensión nominal: 400V
 Tamaños: 32A(10x38), 63A(14x51 y 22x58)
 Calibres: 2-63A
 Curvas fusión: gL (standard)
 aM (acompañamiento motor)

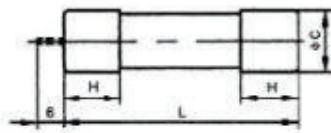
Certificados: 

Datos técnicos

Tipo	Tensión Nominal	CORRIENTE NOMINAL		PODER DE CORTE NOMINAL		Potencia nominal disipada (W)	Peso de la base (g)	Peso del fusible (g)
		Base (A)	Calibres (A)	I1(kA)	cos ϕ			
RT18-32	400V	32	2,4,6,8,10,12,16,20,25,32	100	0,1-0,2	≤3	82	8
RT18-63		63	2,4,6,8,10,12,16,20,25,32,40,50,63			≤5	206	20
RT14-63		63	16,20,25,32,40,50,63			≤9,5	262	52

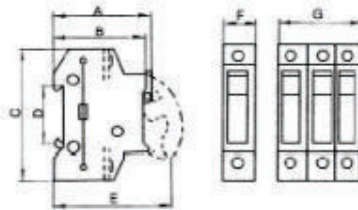


Dimensiones fusibles



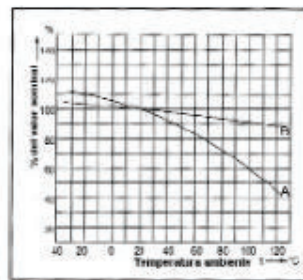
Tipo	TAMAÑO	L	Tipo	Tipo
RT18-32	10x38	38±0,6	10,3±0,1	10,5
RT18-63	14x51	51 ^{+0,6} _{-1,0}	14,3±0,1	13,8
RT14-63	22x58	58 ^{+0,1} _{-2,0}	21,2±0,1	15,6

Dimensiones bases portafusibles



Tipo	A	B	C	D	E	F	G
RT18-32	63	60	79	35	80	18	54
RT18-63	78	76	103	35	110	25	75
RT18A-32	70	67	78	35	88	18	54
RT14-63	65	53	124	26	155	34	102

Efectos de la temperatura ambiente



Los fusibles fabricados por Delixi están calibrados para una temperatura ambiente de 20°C. Usar la tabla de conexión adjunta en función de la temperatura ambiente real.

Ejemplo:

El usuario ha seleccionado un fusible (tipo gL) de 63A de corriente nominal, para ser instalado en un cuadro con una temperatura ambiente de 20°C.

En este caso se cumpliría que I_n de trabajo = I_n de temperatura ambiente y el calibrado de fusible sería correcto.

Supongamos ahora que en lugar de 20°C en el interior del cuadro encuentra una temperatura ambiente de 70°C.

De acuerdo con la curva, el porcentaje de incremento de la I_n será igual a 0.78 lo cual indica que la I_n en el interior del cuadro pasará a ser de:

$$I_n = \frac{63A}{0.78} = 80.77A$$

Por lo tanto el fusible de 63A no será el adecuado debiendo reemplazarlo por otro fusible de 80 ó 100A según los casos.

ANEXO 10

Características técnicas de contactores trifásicos

Atención: Evitar el contacto con partes móviles de los contactores y mantenerlos protegidos por dispositivos de protección.

Una vez se realicen las operaciones con el contactor, desconectar el cableado o la instalación.

Atención: Evitar el contacto con partes móviles de los contactores y mantenerlos protegidos por dispositivos de protección.

Una vez se realicen las operaciones con el contactor, desconectar el cableado o la instalación.

serie de contactores

industria de contacto de cableado

4	9	10	17
			Código de barras
			Cantidad de contactores: 10 2NO + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NC + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO + 1NO + 1NO
			Contactores: 10 2NO + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NO + 1NO + 1NO + 1NO
			Código de barras
			Nota: El contacto de bloqueo funciona en el servicio de bloqueo de los cables de fuerza y requiere la instalación.



serie de contactores

4	9	17
		Código de barras
		Cantidad de contactores: 10 2NO + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NC + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NC + 1NO + 1NO + 1NO
		Contactores: 10 2NO + 1NO + 1NO 10 2NO + 1NO + 1NO + 1NO + 1NO + 1NO
		Código de barras
		Nota: El contacto de bloqueo funciona en el servicio de bloqueo de los cables de fuerza y requiere la instalación.



Tipo	36C100	36C112	36C118	36C125	36C140	36C150	36C165	36C180	36C195
protección	EC0841-4-1								
aplicación	SEMAO, CC, CB								
diámetro de cables	3,4	3,4	3	3,4	3	3,4	3,4	3,4	3,4
corriente nominal de funcionamiento (In)	8	12	18	25	32	40	50	65	80
corriente nominal de funcionamiento (In) en AC-3	25	25	32	40	50	60	80	110	125
en AC-1									

189

tercera de funcionamiento nominal (In) hasta

límite de flexión de la corriente de funcionamiento (In):

corriente nominal convencional (In):

	25	25	32	40	50	60	80	110	125
25-400									

190

abandono versión nominal (In):

impedancia nominal (Zn)

capacidad nominal (A)

capacidad de ruptura nominal (A)

potencia nominal operativa en la categoría AC-3

habilita de protección contra cortocircuitos

(A)

	25	25	32	40	50	60	80	110	125
25-400									

impedancia media por polo

complementos de bloques adicionales

para devanados

material

retardo de tiempo (ms)

protección selectiva de polo y humedad

	2,5	2,5	2,5	2	2	1,5	1,5	1,5	0,8	0,8
36C100-112										
36C118-125										

Tipo de conductor de muestra (In):

velocidad de sobrecarga térmica asociada:

clases operativas (In) (In) (In)

	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
eléctrico AC-3										
eléctrico AC-4										
Mecánico										

velocidad eléctrica (x10³)

velocidad mecánica (x10³)

medida de bobinado

Por de apertura (In) en operación

sección de cableado cruzado

	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10-10										
10-10										
10-10										

grado de protección

temperatura ambiente (°C)

temperatura de almacenamiento

relativa (RH) de funcionamiento (previsto)

instalación a temperatura

	2,5	2,5	4	4	4	4	4	4	4	4
2,5-4										
4-4										
4-4										

material del terminal

grado de protección

temperatura ambiente (°C)

temperatura de almacenamiento

relativa (RH) de funcionamiento (previsto)

instalación a temperatura

	M3,5	M3,5	M4,5	M4	M4	M4	M4	M4	M4	M4
M3,5										
M3,5										
M4,5										

conforme a UL 98

especificaciones técnicas de contactos auxiliares incorporados en el contacto 3 SC2

prototipo	IE 6047-5-1	prototipo	IEC 60250-5
Número de contactos auxiliares	2,4	Número de contactos auxiliares	2
Tipo de montaje	parte delantera y lateral	Parte delantera	
Calificación convencional actual (A)	30	tiempo de ómnibus, tiempo tiempo de retardo	
tensión de funcionamiento nominal Ue (V)	hasta 690	gama de tiempo	0,1-3,01-30-310-380
abastecimiento de tensión funcional Uf (V)	690	tiempo de recuento durante el periodo de retardo	-3 % (10 ms mínimo)
corriente nominal convencional terminal (Ith(A))	30	capacidad de conmutación mínima (mA)	150
Capacidad de conmutación mínima (mA)	5	protección de corto circuito (A)	50
protección de corto circuito (A)	fuerte Gg: 10 A	capacidad nominal (A)	30
capacidad nominal (A)	140	tensión de funcionamiento nominal Ue (V)	hasta 690
		abastecimiento de tensión funcional Uf (V)	250
		corriente nominal convencional terminal Ith(A):	30

Especificaciones técnicas de la bobina del contacto 3SC3

Tipo	3SC3-08	3SC3-12	3SC3-18	3SC3-25	3SC3-32	3SC3-40	3SC3-50	3SC3-65	3SC3-80	3SC3-95
consumo de bobina	70	70	70	100	100	100	245	245	245	245
resorte (VA)	8	8	8	8	10	10	26	26	26	26
potencia (W)	1,8-2,8	1,8-2,8	1,8-2,8	3-4	3-4	6-10	6-10	6-10	6-10	6-10

Tensión de la bobina del contacto 3SC1

tensión de la bobina Uf (V)	24	36	48	110	220	230	240	380	435	500	600	660
50 Hz	B5	C5	E5	G5	H5	I5	J5	K5	L5	M5	N5	P5
60 Hz	B6	C6	E6	G6	H6	I6	J6	K6	L6	M6	N6	P6
50/60 Hz	B7	C7	E7	F7	G7	H7	I7	J7	K7	L7	M7	P7

datos técnicos para el encendido del relé térmico tipo 3 S28

Tipo	3S28-013	3S28-023	3S28-033
prototipo	IEC 60947-4-1	IEC 60947-4-1	2S18-033
Certificación	CE, SIRA, CO, CB	CE, SIRA, CO, CB	
clase ligera	10A	10A	
corriente nominal de trabajo	25	36	93
gama de ajuste	0,1-25	23-36	23-93
abastecimiento tensión nominal Uf (V)	690	690	690
Impulso nominal tensión de captura Uimp (V)	6	6	6
señalización	indicador de disparo	indicador de disparo	
Fin de ajuste (H, m) conexión	0,8	0,8	
grado de protección	IP20	IP20	
temperatura ambiente	-5 a +40	MAX. 95% humedad	
temperatura de almacenamiento	-40	+75	
máxima altitud de funcionamiento [metros]	2000		
resistencia a vibraciones	V1	V1	
montaje	directamente debajo del contactor		

ANEXO 11

Características técnicas de luces piloto, botoneras y selectores de mando

Características técnicas**Conformidad a normas**

IEC 947.5.1 - VDE 0660 - IEC 61340
IEC/EN 60947.5.1 - UTE - BS - NEMA
CENELEC EN 50007

Homologaciones

UL (U.S.A) - CSA (Canada) - RINA
Lloyd's Register of Shipping - Bureau Veritas
CE
cUL

Protecciones climáticas

Las versiones estándar se adaptan para ser utilizadas en las climas:

Temperatura	cat. 23/50 (DIN 50054)
Humedad	cat. 23/83 (DIN 50055)
Color húmedo	cat. 40/92 (DIN 50055)
Humedad variable	FW24 (DIN 50054)

Rangos de temperatura

Funcionamiento	-25 °C hasta +70 °C
Almacenamiento	-40 °C hasta +70 °C

Grado de protección de los elementos

IP66 de acuerdo con CENELEC EN 60529 cuando están montados en envolventes con el mismo o superior grado de protección, idóneos para usar en envolventes tipo 1-3-3R-3S-4-4K (para elementos en termoplástico) -12-13 según UL 508

Grado de protección de los terminales

IP2x según CENELEC EN 60529.

Resist. a choques (según MIL 202B método 202A)

1/2 sinusoidal 11 ms:
Sin daño o desmontaje a 100G para todos los elementos excepto los luminosos con transformador 33G.

Resist. a las vibraciones (según IEC 68-2-6)

16G con rangos de frecuencia desde 40 hasta 500Hz y máximo desplazamiento de 0.75 mm. (pico a pico).

Tensión nominal de aislamiento

690V según EN 60947.1

Tensión al impulso

4 kV según EN 60947.1

Categoría de aislamiento

Grupo C según VDE 0110

Protec. ante choques eléctricos (IEC 536)

Actuadores de metal	Clase I
Actuadores termoplásticos	Clase II (doble aislamiento)

Protección contra cortocircuitos

Con fusible tipo gG de 16A según IEC 269.1 y 269.2.

Funcionamiento del contacto

- Ruptura lenta
- Apertura positiva en los contactos NC
- Autolimpiables
- Doble puente móvil
- 4 puntos de contacto
- Doble ruptura

Resistencia del contacto

≤75 m Ω según IEC 255.7 categoría 3

Identificación de los terminales

Según CENELEC EN 50013.

Características eléctricas

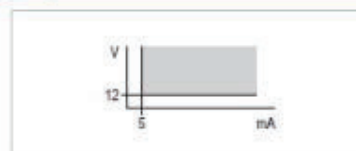
Intensidad nominal térmica I_{th} = 10 A

Según IEC 947.5.1

Categoría AC 13	
Tensión Ue	10 24 48 60 110 220 380 500 690
Intensidad Ie	16 10 10 10 6 3 2 1.5 1.2
Categoría DC 13	
Tensión Ue	60 24 48 60 110 220 300
Intensidad Ie	16 2.5 1.4 1 0.55 0.27 0.2

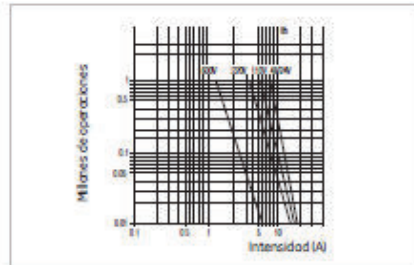
Según CSA y UL

AC Motor Duty	16603
DC Standard Duty	12369

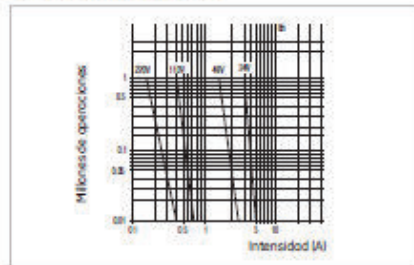
Rango de funcionamiento

Endurancia eléctrica

Corriente alterna 50/60 Hz cat. AC 15



Corriente continua cat. DC 13



Endurancia mecánica

Impulsores de emergencia con retención	0.3 x 10 ⁶ ops.
Impulsores de emergencia de 3 posiciones	
Impulsores de emergencia luminosos de 3 posiciones	
Manipuladores	
Impulsores de llave	0.5 x 10 ⁶ ops.
Conmutadores	
Selectores luminosos	
Dispositivo paso a paso	
Selectores normales	
Selectores de llave	1 x 10 ⁶ ops.
Impulsores luminosos	
Impulsores selectores	
Impulsores de emergencia de varilla	
Impulsores normales	
Impulsores de emergencia automáticos	3 x 10 ⁶ ops.

Compatibilidad de bloques de contactos

Las Series "P9" se componen con unidades modulares de 10 mm, o múltiplos de 10 mm, colocadas una al lado de la otra en el adaptador correspondiente.

Los cabezales estándar se suministran con un adaptador de 3 posiciones con capacidad para 3 bloques de 10 mm, y un bloque de 20 mm, ó un bloque de 30 mm.

Cuando el adaptador de 3 posiciones no es suficiente para satisfacer las necesidades, el adaptador de 5 posiciones permite colocar 2 bloques más de 10 mm.

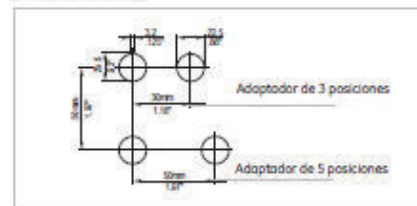
Utilizando el adaptador de 5 posiciones hay que tener en cuenta el aumento de la distancia entre centros de los pulsadores (50 mm, en lugar de 30 mm.)

Numero máximo de contactos eléctricos

	Adaptador	
	3 posiciones estándar	5 posiciones especial
Impulsores normales		
Impulsores emergencia automáticos	max 6	max 8
Impulsores emergencia de varilla		
Selectores	max 4	max 8
Selectores de llave		
Manipuladores		
Impulsores de llave	max 4	-
Impulsores selectivos		
Conmutadores		
Impulsores emergencia con retención	max 2	-
Impulsores emergencia 3 posiciones		
Impulsores luminosos		
Impulsores emergencia luminosos	max 4	max 4
Selectores luminosos		
Impulsores emergencia retención luminosos	max 2	max 2
Impulsores emergencia luminosos 3 posiciones		

Montaje

Sobre panel de 1 a 6 mm. de espesor con agujeros según CENELEC EN 50007



Esquemas

Selectores

Posición	Función	Contactos	Posición en el adaptador
			2 3 1
	D	B10 12-14-16 B11 17-19-21	
	D	B10 12-14-16 B01 17-19-21	
	D	B11 17-19-21 B10 12-14-16	
	I	B11 17-19-21 B10 12-14-16	
	H	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	B	B10 12-14-16 B10 17-19-21	
	E	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	L	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	U	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	Z	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	Z	B10 12-14-16 B01 17-19-21	
	X	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	Y	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	W	B11 17-19-21 B11 12-14-16	

Selectores pulsadores

Posición	Función	Contactos	Normal	Presionado	Pos. en el adaptador
					2 3 1
	201	B11 17-19-21 B11 12-14-16			
	231	B11 17-19-21 B11 12-14-16			
	235	B11 17-19-21 B11 12-14-16			
	301	B11 17-19-21 B11 12-14-16			
	323	B11 17-19-21 B11 12-14-16			

X No puede ser presionado

Manipuladores

Posición	Contactos	Posición en el adaptador
		2 3 1
	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	B11 17-19-21 B11 12-14-16	

Conmutadores

Posición	Función	Contactos	Posición en el adaptador
			2 3 1
	D	B11 17-19-21 B11 12-14-16	
	B	B11 17-19-21 B11 12-14-16	

Puls. de emergencia de 3 posiciones

Función	Contactos	Posición en el adaptador
		2 3 1
2	B01R 17-19-21 B01 12-14-16	
3	B11 17-19-21 B11 12-14-16	

ANEXO 12

Características técnicas de Relé 120V

Specifications

■ CONTACT DATA

Non-latching – Unsealed

Load	DPDT, 2PDT		4PDT		High-capacity	
	Resistive load (p.f. = 1)	Inductive load (p.f. = 0.4) (I.R. = 7 ms)	Resistive load (p.f. = 1)	Inductive load (p.f. = 0.4) (I.R. = 7 ms)	Resistive load (p.f. = 1)	Inductive load (p.f. = 0.4) (I.R. = 7 ms)
Rated load	5 A at 220 VAC 5 A at 24 VDC	2 A at 220 VAC 2 A at 24 VDC	3 A at 220 VAC 3 A at 24 VDC	0.8 A at 220 VAC 1.5 A at 24 VDC	7 A 220 VAC 7 A 24 VDC	3.5 A 220 VAC 3.5 A 24 VDC
Contact material	Ag		Ag (Au Flash)		AgCdO	
Carry current	5 A	3 A	1 A	3 A	7 A	
Max. operating voltage	250 VAC 125 VDC					
Max. operating current	5 A		1 A	3 A	7 A	
Max. switching capacity	1,100 VA 120 W	440 VA 48 W	880 VA 72 W	176 VA 36 W	1,540 VA 168 W	770 VA 84 W
Min. permissible load (see note)	Standard type: 1 mA, 5 VDC		Standard and high sensitivity types: 1 mA, 1 VDC		100 µA, 1 VDC	
	Reiterated type: 100 µA, 1 VDC					

Non-latching – Sealed/Hermetically sealed

Load	Sealed, 4PDT		Hermetically sealed, 4PDT	
	Resistive load (p.f. = 1)	Inductive load (p.f. = 0.4) (I.R. = 7 ms)	Resistive load (p.f. = 1)	Inductive load (p.f. = 0.4) (I.R. = 7 ms)
Rated load	1 A at 220 VAC 1 A at 24 VDC	0.5 A at 220 VAC 0.5 A at 24 VDC	3 A at 110 VAC 3 A at 24 VDC	0.8 A at 110 VAC 1.5 A at 24 VDC
Contact material	Ag (Au Flash)			
Carry current	1 A		3 A	
Max. operating voltage	250 VAC 125 VDC		125 VAC 125 VDC	
Max. operating current	1 A		3 A	
Max. switching capacity	220 VA 24 W	110 VA 12 W	330 VA 72 W	88 VA 36 W
Min. permissible load (see note)	Standard and high sensitivity types: 1 mA, 1 VDC			
	Reiterated type: 100 µA, 1 VDC			

Note: P (heat) = 0.1 × 10⁶/operation

■ COIL DATA

Non-latching – AC

Rated voltage (V)	Rated current (mA)		Coil resistance (Ω)		Coil inductance (ref. value) (H)		Pick-up voltage (% of rated voltage)	Dropout voltage (30% min.)	Maximum voltage (110% max.)	Power consumption (VA, W) Approx. 1.00 to 1.20
	50 Hz	60 Hz	Set coil	Reset coil	Armature OFF	Armature ON				
6	214.10	183	12.20	0.04	0.08	0.08	80% max.	30% min.	110% max.	Approx. 0.90 to 1.10
12	106.50	91	46	0.17	0.33	0.33				
24	53.00	46	180	0.69	1.30	1.30				
50	25.70	22	788	3.22	5.66	5.66				
100/110	11.70/12.00	10/11	3.750	14.54	24.60	24.60				
110/120	9.90/10.00	8.40/8.20	4.430	19.20	32.10	32.10				
200/220	6.20/6.00	5.30/5.00	12.950	54.75	94.07	94.07				
220/240	4.80/5.00	4.20/4.60	18.700	83.60	135.40	135.40				

Non-latching – DC

Rated voltage (V)	Rated current (mA)		Coil resistance (Ω)		Coil inductance (ref. value) (H)		Pick-up voltage (% of rated voltage)	Dropout voltage (10% min.)	Maximum voltage (110% max.)	Power consumption (VA, W) Approx. 0.60
	Set coil	Reset coil	Set coil	Reset coil	Armature OFF	Armature ON				
6	160	142	68	13	37	37	80% max.	10% min.	110% max.	Approx. 0.60
12	75	68	160	0.73	1.37	1.37				
24	38.90	35	650	3.20	5.72	5.72				
48	18.50	17	2.600	10.60	21.00	21.00				
100/110	9.10/10	8.20	11.000	45.60	86.20	86.20				

Latching – AC

Rated voltage (V)	Rated current (mA)			Coil resistance (Ω)		Pick-up voltage (% of rated voltage)	Dropout voltage (80% max.)	Maximum voltage (110% max.)	Power consumption (VA, W)	
	Set coil	Reset coil	50/60 Hz	Set coil	Reset coil				Set coil	Reset coil
6	145	142	68	13	37	80% max.	80% max.	110% max.	Approx. 0.60 to 0.60	Approx. 0.20 to 0.60
12	57	56	30	72	130				Approx. 0.60 to 0.60	Approx. 0.20 to 0.60
24	27.40	26.40	18.60	320	550				Approx. 0.60 to 0.60	Approx. 0.20 to 0.60
50	14	13.40	3.50	1.400	3.000				Approx. 0.60 to 0.60	Approx. 0.20 to 0.60
120	15.80	5.60	3.60	8.300	3.000				Approx. 0.60 to 0.60	Approx. 0.20 to 0.60

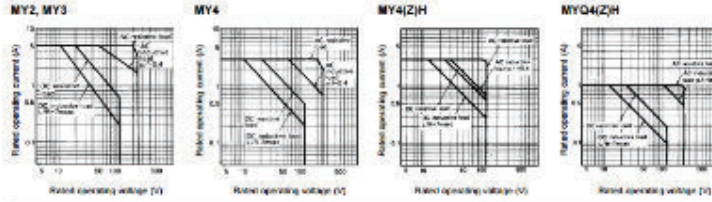
Latching – DC

Rated voltage (V)	Rated current (mA)		Coil resistance (Ω)		Pick-up voltage (% of rated voltage)	Dropout voltage (80% max.)	Maximum voltage (110% max.)	Power consumption (VA, W)	
	Set coil	Reset coil	Set coil	Reset coil				Set coil	Reset coil
6	230	100	26	60	80% max.	80% max.	110% max.	Approx. 1.30	Approx. 0.05
12	110	50	110	236				Approx. 1.30	Approx. 0.05
24	52	25	470	940				Approx. 1.30	Approx. 0.05

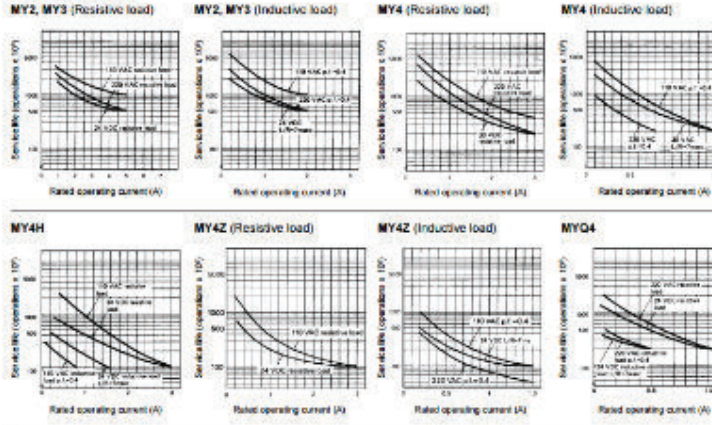
- Note:
1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C (73°F) with tolerances of +16%, -20% for AC rated current, and ±15% for DC rated coil resistance.
 2. The AC coil resistance and inductance are reference values at 50 Hz.
 3. The performance characteristics are measured at a coil temperature of 23°C (73°F).
 4. Because the coil is designed for low power consumption, connect a bleeder (if necessary after confirming the leakage current), when the coil is driven by an SCR.
 5. For AC type latching coils, the rated current values are half-wave rectified current values measured with a DC ammeter.

■ CHARACTERISTIC DATA

Maximum switching capacity – Non-latching



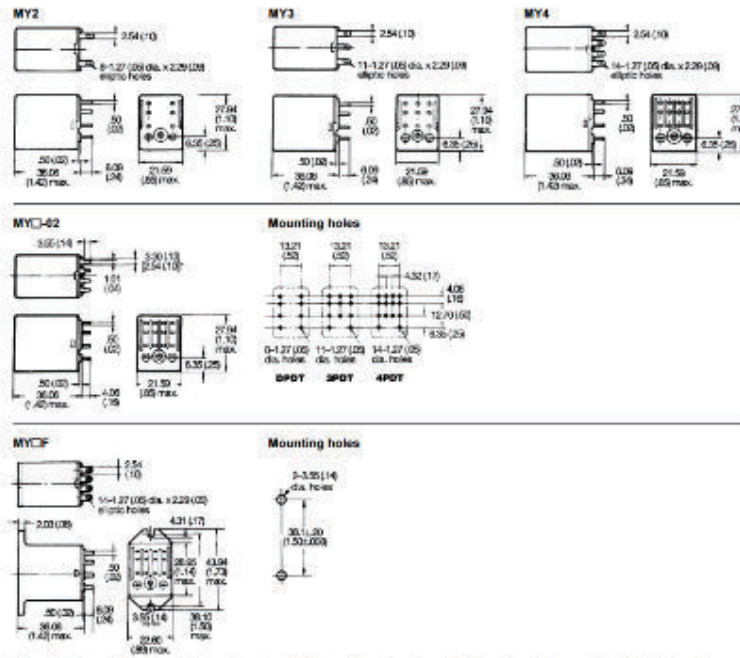
Electrical service life



Dimensions

Unit: mm (inch)


■ RELAYS



Note: The above dimensioned drawing shows the 4-pole type. The dimensions of the 2- and 3-pole types are identical to the 4-pole type.





ANEXO 13

Características técnicas de interruptores termo magnéticos



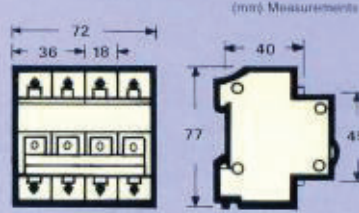
CE APPROVAL

C45 SERIES

C-45 SERIES				
SPECIFICATION				
NUMBER OF POLES	1P	2P	3P	4P
PHOTO				
AMPERE RATING AT AMBIENT TEMPERATURE 40°C	6A, 10A, 16A 20A, 25A, 32A 40A, 50A, 63A	6A, 10A, 16A 20A, 25A, 32A 40A, 50A, 63A	6A, 10A, 16A 20A, 25A, 32A 40A, 50A, 63A	6A, 10A, 16A 20A, 25A, 32A 40A, 50A, 63A
RATED VOLTAGE	240V	415V	415V	415V
INTERRUPTING CAPACITY	6A TO 40A	6KA (240V)	6KA (415V)	6KA (415V)
	50A TO 63A	4KA (240V)	4KA (415V)	4KA (415V)

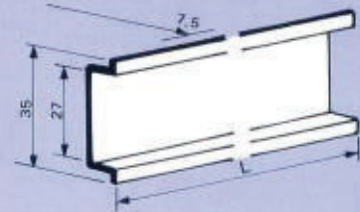
APPLICATION SCOPE:
C45 used in 50 Hz 240/415V, division capacity accords with BS3871 and IEC 898 standard, used in protecting the short circuit and overload of the circuit, especially suitable for lighting distribution system in industry and commerce. They are the best alternative for the renewal of products.

PRODUCT GUIDE RAIL INSTALLATION DIMENSIONS.



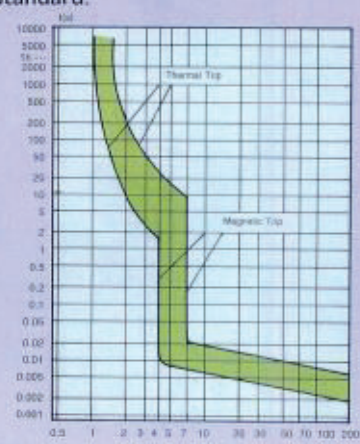
(mm) Measurements

(mm) Size of fixing DIN rail



Terminals for cable 25mm² maximum

ACTION CHARACTERISTIC CURVE
BS Standard:



ANEXO 14

Guía técnica para la selección de cable para las conexiones eléctricas

Chromalox Technical Documents

Información Técnica

Información técnica

Prácticas de cableado para calentadores eléctricos

Aislante de alambre y conductores

La selección de los materiales para el cableado para usarse en una aplicación en particular depende del voltaje de servicio y las temperaturas anticipadas de operación. La tabla a continuación lista algunas de las construcciones de cable dentro del Código Eléctrico Nacional más comunes de acuerdo a sus limitaciones de temperatura. Los alambres aislados deberán regularse para trabajar por debajo de temperaturas ambiente elevadas y nunca deberán usarse por encima de sus valores nominales de temperatura. La temperatura de funcionamiento del cable de cobre descubierto deberá limitarse a un máximo de 200 °C (392 °F). En el artículo 310 del Código Eléctrico Nacional se muestra un listado completo de construcciones de alambre y capacidades de carga de corriente admisibles.

Cableado de propósito general

Temperatura máxima del conductor		Tipo de alambre (600V)	Construcción (conductores de cobre)
°C	°F		
60	140	TW	Termoplástico
75	167	RHW	Caucho
90	194	THW	Termoplástico
		RHH	Caucho resistente al calor
		THWN	Termoplástico resistente a calor
200	392	XHHN	Termoplástico de conexión cruzada resistente al calor
		MTW	Termoplástico de conexión cruzada resistente al calor
		FEP	Teflon®

Materiales de cableado para alta temperatura

Temperatura máxima del conductor		Tipo de alambre (600V)	Construcción (cobre níquelado o conductores de níquel)
°C	°F		
250	482	TGT	Teflon® + vidrio- Teflon®
450	842	TGGT	
		MGS	Mica + vidrio- silicón
594	1100	MGT	Mica + vidrio- Teflon®
		Bare	Alambre de níquel manganeso o barras colectoras con aisladores de cerámica

Nota: Se ofrecen materiales de cableado de alta temperatura para aplicaciones específicas en el lugar de funcionamiento del equipo.

Clasificación del contactor

Los contactores se clasifican normalmente para cargas inductivas y resistivas. La mayoría de los calentadores de resistencia eléctrica tienen una corriente interna insignificante o corriente inductiva. Seleccione los contactores basados en las clasificaciones de la carga resistiva. Use las fórmulas mostradas en los párrafos referidos a la clasificación del alambre para determinar la carga de amperaje por polo (fase). Seleccione un contactor con el valor nominal de corriente siguiente más alto. Use un contactor de dos polos para la alimentación monofásica (dos hilos) y un contactor de tres polos para cargas trifásicas delta o en estrella balanceadas. Para cargas del calentador con corrientes internas, refiérase a la información ofrecida de los datos del producto para revisar aquella que se refiere al amperaje máximo.

Cable y alambre termopar

Los termopares y alambres conductores están codificados en color para ayudar en la identificación y evitar cableados cruzados inadvertidos. Los siguientes gráficos indican los colores usados para diferentes aleaciones:

Codificación de color del termopar

Tipo	Color positivo (+)	Aleaciones
J	Bianco	Hierro/Constantan
K	Amarillo	Chromel / Alumel
T	Azul	Cobre / Constantan
E	Violeta	Chromel/Constantan
R	Negro	Platino/Platino (con 13 % de rodio)
S	Negro	Platino/Platino (con 6 % de rodio)
N	Naranja	Nicrosil/Nisil

Nota: Conductor negativo (-) identificado con aislamiento coloreado en rojo.

Colores del alambre de extensión del termopar

Tipo	Positivo	Negativo	Conjunto de color	Color positivo (+)
T	TPX	TNX	Azul	Azul
J	JPX	JNX	Negro	Bianco
E	EPX	ENX	Violeta	Violeta
K	KPX	KNX	Amarillo	Amarillo
R or S	SPX	SNX	Verde	Negro
B	BPX	BNX	Gris	Gris

Nota: Conductor negativo (-) identificado con aislamiento coloreado en rojo.

Ruido eléctrico y controles

El 'ruido' eléctrico se refiere a voltajes eléctricos extraños que interfieren con las señales de control legítimas. La mayor parte del ruido eléctrico es introducido por el acoplamiento electromagnético con lámparas fluorescentes, contactores, conexión de alimentación eléctrica y otros dispositivos que producen arcos eléctricos. Proteja el circuito de control y mantenga los hilos del termopar separados de la conexión de alimentación eléctrica. Ponga los hilos conductores protegidos del termopar en un conducto separado para lograr su máxima protección.

Límites de temperatura para los controles

La mayor parte de los controles mecánicos y termostatos (cuerpos de control) pueden resistir un margen amplio de temperaturas ambiente desde por debajo de la congelación hasta por encima de 60 °C (140 °F). Los controles electrónicos, transformadores, contactores y otros dispositivos son más sensibles a la temperatura y las temperaturas extremas generalmente acortarán la vida del componente. La mayor parte de los equipos eléctricos y electrónicos funcionarán con precisión en temperaturas de ambiente en un margen desde -1 °C (30 °F) hasta 54 °C (130 °F). Los Triacs y controles SCR necesitan, frecuentemente, de un enfriamiento especial para valores nominales de carga completa cuando funcionen por encima de 49 °C (120 °F). Refiérase a las instrucciones de instalación o contacte el fabricante del dispositivo para obtener otras recomendaciones.

Consejos para el cableado de calentadores eléctricos

A continuación se dan algunas recomendaciones generales para la instalación de elementos y conjuntos de calentamiento eléctrico. Estas recomendaciones son sólo sugerencias y no entran en conflicto con el Código Eléctrico Nacional ni los códigos locales.

ADVERTENCIA: Peligro de descarga eléctrica.

Cualquier instalación que involucre calentadores eléctricos debe conectarse a tierra eficazmente de acuerdo al Código Eléctrico Nacional para eliminar el peligro de descarga eléctrica. Toda la instalación eléctrica a los calentadores debe hacerse por una persona calificada y siguiendo el Código Eléctrico Nacional o los códigos eléctricos locales por una persona calificada.

1. El calentamiento y enfriamiento repetitivos pueden causar que las conexiones eléctricas se aflojen con el tiempo. Un amperaje elevado que pase a través de un terminal flojo puede causar sobrecalentamiento y fallo en el terminal. Todas las conexiones de los terminales del calentador deben apretarse con un par de torsión máximo de acuerdo con la resistencia del terminal. Use una segunda llave o alicates para evitar que los terminales del calentador se tuerzan.

2. Use un alambre enroscado en aquellas aplicaciones donde los alambres de alimentación a las conexiones de los terminales del calentador puedan estar sujetos a movimiento. Cuando use un alambre sólido o barra colectoras en los terminales del calentador, extienda unos lazos entre los puntos de soporte para minimizar las tensiones dañinas que se producen debido a la expansión y contracción.

3. Suelde o argente con cobre y plomo las conexiones a los elementos de calentamiento que puedan estar sujetos a temperaturas extremas o vibración. Use un mínimo de fundente para completar la conexión y mantenga el fundente alejado de manera que no contamine el elemento de calentamiento. Quite el fundente residual para evitar la corrosión de la junta eléctrica.

4. Mantenga el conducto capilar del termostato y los hilos del termopar a distancia de los terminales del calentador para evitar cortocircuitos accidentales. Se recomienda el uso de un revestimiento o de un tubo aislado.

5. Use la instalación eléctrica adecuada para resistir las temperaturas de funcionamiento anticipadas. A menos que se indique, específicamente, que el calentador usa alambre de cobre de baja temperatura, se recomiendan los conductores de aleación de alta temperatura para las conexiones de los terminales del calentador.

6. No use alambres de caucho, cubiertos de plástico o impregnados en cera dentro de las cajas de conexiones de los calentadores en aplicaciones de alta temperatura. Estos aislamientos se deteriorarán y se expedirán gases que pueden contaminar el elemento y causar cortocircuitos.

Información Técnica

Información técnica

Prácticas de cableado para calentadores eléctricos (cont.)

Selección del calibre del alambre (AWG)

La dimensión (calibre del alambre) del conductor eléctrico para una aplicación particular dependerá del amperaje (corriente) el cual derivará la carga del calentador desde la fuente de alimentación. La corriente puede calcularse por la ley de Ohm. Para calcular el amperaje, use las siguientes fórmulas. En una fuente de alimentación monofásica (dos hilos), el amperaje por línea se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Amperaje monofásico} = \frac{\text{Voltaje total del circuito}}{\text{Voltaje de línea}}$$

En circuitos de alimentación trifásica con cargas balanceadas de calentamiento delta o en estrella, el amperaje de la línea se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Amperaje trifásico} = \frac{\text{Voltaje total del circuito}}{\text{Voltaje de línea} \times 1.73}$$

La tabla II lista el amperaje para valores nominales de KW comunes.

Ampacidades permitidas

Una vez que la corriente de carga ha sido determinada, el calibre del alambre se puede seleccionar de las tablas presentes en el artículo 310 del Código Nacional Eléctrico (NEC). Como una guía, la tabla III a la derecha lista las ampacidades recomendadas para la mayoría de los alambres aislados para aplicaciones de alta temperatura. Los valores nominales actuales para alambres a 90 °C en ambiente a 30 °C están incluidos como referencia.

Correcciones para temperaturas ambiente elevadas

Las capacidades de portar corriente de carga recomendadas en alambres de 200 °C a 250 °C son válidas si las temperaturas del conductor no exceden 40 °C (104 °F). Las temperaturas de operación por encima de 40 °C (104 °F) necesitan en la aplicación de un factor de corrección de temperatura para el alambre correspondiente.

Ejemplo: El alambre tipo TGT con calibre permisible 14, es capaz de soportar 39 Amp a 40 °C (104 °F), pero debe ser reducido a 0.85 (85 %) ó 33 Amp cuando funciona a 100 °C (212 °F).

Múltiples alambres aislados en un conducto

El calibre seleccionado arriba puede usarse en el circuito de calentamiento con tres (3) alambres encerrados en un conducto rígido o flexible para proteger el cableado. Si se instalan más de 3 conductores en el mismo conducto, se debe usar otro factor de corrección de corriente. Para casos en que sean de 4 a 6 conductores en un solo conducto, use un 80 % de la capacidad de corriente de carga recomendada. Para casos de 7 a 24 conductores use un 70 %.

Tabla II. Amperaje (corriente) para valores KW típicos del calentador

KW	Monofásico					Carga balanceada trifásica				
	120V	208V	240V	440V	480V	208V	240V	440V	480V	575V
1	8.4	4.8	4.2	2.3	2.1	2.8	2.5	1.4	1.3	1.0
2	16.7	9.7	8.4	4.6	4.2	5.6	4.9	2.7	2.5	2.0
3	25.0	14.5	12.5	6.9	6.3	8.4	7.3	4	3.7	3.0
4	33.4	19.3	16.7	9.1	8.4	11.2	9.7	5.3	4.9	4.0
5	41.7	24.1	20.9	11.4	10.5	13.9	12.1	6.6	6.1	5.0
6	50.0	28.9	25.0	13.7	12.5	16.7	14.5	7.9	7.3	6.0
7.5	62.5	36.1	31.3	17.1	15.7	20.9	18.1	9.9	9.1	7.5
10	83.4	48.1	41.7	22.8	20.9	27.8	24.1	13.2	12.1	10.0
12	100.0	57.7	50.0	27.3	25	33.4	29	15.8	14.5	12.1
15	125.0	72.2	62.5	34.1	31.2	41.7	36.2	19.7	18.1	15.1
20	167.0	96.2	83.4	45.5	41.7	55.6	48.2	26.3	24.1	20.1
25	209.0	121	105	56.9	52.1	69.5	60.3	32.9	30.1	25.1
30	—	145	125	68.2	62.5	83.4	72.3	39.4	36.2	30.2
50	—	241	209	114	105	139	121	65.7	60.3	50.3
75	—	—	313	171	157	209	181	98.6	90.4	75.4
100	—	—	417	228	209	278	241	132	121.0	100.0

Tabla III. Ampacidad permitida

Tipo de conductor	Tres conductores aislados en una canaleta o conducto			Un solo conductor ^{1,2} al aire libre (ambiente a 20 °C)	
	Cobre	Cobre	Níquel o cobre níquelado	Cobre níquelado	Níquel
Tipo de aislamiento	THHN XHHW MTW	FEP PFA SPG	TGT TGGT TFE	MGT MGS	MGT MGS
Temperatura ambiente	30°C (86°F)	40°C (104°F)	40°C (104°F)	200°C (392°F)	200°C (392°F)
Temperatura máxima del conductor (límites de aislamiento)					
Calibre AWG	90°C (194°F)	200°C (392°F)	250°C (482°F)	450°C (842°F)	450°C (842°F)
14	25	36	39	44	23
12	30	45	54	58	31
10	40	60	73	77	42
8	55	83	93	100	53
6	75	110	117	—	—
Factores de corrección para temperaturas del ambiente elevadas					
Ambiente (°C)	Para temperatura de ambiente que exceda los valores en la tabla arriba, multiplique las ampacidades permisibles por el factor apropiado abajo.				Ambiente (°F)
36 - 40	0.91	1.00	1.00	—	96 - 104
41 - 45	0.87	0.97	0.98	—	105 - 113
46 - 50	0.82	0.96	0.97	—	114 - 122
51 - 55	0.76	0.95	0.95	—	123 - 131
56 - 60	0.71	0.94	0.94	—	132 - 140
61 - 70	0.58	0.9	0.93	—	141 - 158
71 - 80	0.41	0.87	0.9	—	159 - 176
81 - 90	—	0.83	0.87	—	177 - 194
91 - 100	—	0.79	0.85	1.22	195 - 212
101 - 120	—	0.71	0.79	1.19	213 - 248
121 - 140	—	0.61	0.72	1.16	249 - 284
141 - 160	—	0.5	0.65	1.12	285 - 320
161 - 180	—	0.35	0.58	1.06	321 - 356
181 - 200	—	—	0.49	1.00	357 - 392
201 - 225	—	—	0.35	0.92	393 - 437
226 - 250	—	—	—	0.87	438 - 542
250 - 300	—	—	—	0.70	543 - 572
300 - 350	—	—	—	0.49	573 - 662

- Datos derivados o extrapolados de los valores y criterios publicados en el artículo 310 del Código Eléctrico Nacional.
- El alambre aislado MGT y MGS está concebido para usarse en interconexiones de calentadores de banda y elementos ubicados en ambientes de alta temperatura y no para instalaciones eléctricas de propósito general. No use esos valores de amperaje para tres conductores aislados dentro de canaletas o conductos.

ANEXO 15

Guía para la selección de termopares.

Tabla 6.3. Características de termopares (Norma IEC-584-1982)

Tipo	Intervalo de medida	Límites de error del termopar			Cable de extensión Límites de		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Temperatura	Error	
						Premium	Normal
Cromel-constantán tipo E	-40 a 800° C -40 a 900° C -200 a 40° C	$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$		-60 a 200° C	-	$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 2 \%$
Cobre-constantán tipo T	-40 a 350° C -40 a 350° C -200 a 40° C	$\pm 0,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,4 \%$	$\pm 1^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$	$\pm 1^\circ \text{C} \text{ o } \pm 1,5 \%$	-60 a +95° C	$\pm 0,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,5 \%$	$\pm 1^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$
Níquel-constantán tipo J	-40 a 750° C -40 a 750° C -	$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$		0-200° C	$\pm 1^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 1,25 \%$
Cromel-Alumel tipo K	-40° C a 1000° C -40° C a 1200° C -200 a 40° C	$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 1,5 \%$	0-200° C	$\pm 1^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 2,5 \%$
Pt-Pt/Th 13 % (tipo R)	0° C a 1600° C 0° C a 1600° C	$\pm 1^\circ \text{C}$	$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,25 \%$		25 a 200° C	-	$\pm 5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 6 \%$
Pt-Pt/Rh 10 % (tipo S)	-				25 a 200° C	-	$\pm 5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 6 \%$
Pt-Rh 6 %/Pt Rh 30 % Tipo B	600° C a 1700° C 600° C a 1700° C		$\pm 1,5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,25 \%$	$\pm 4^\circ \text{C} \text{ o } \pm 0,5 \%$	25 a 200° C	-	$\pm 5^\circ \text{C} \text{ o } \pm 6 \%$

Nota: Los límites de error se expresan en °C o en % de la temperatura leída. Se aplica el valor mayor.

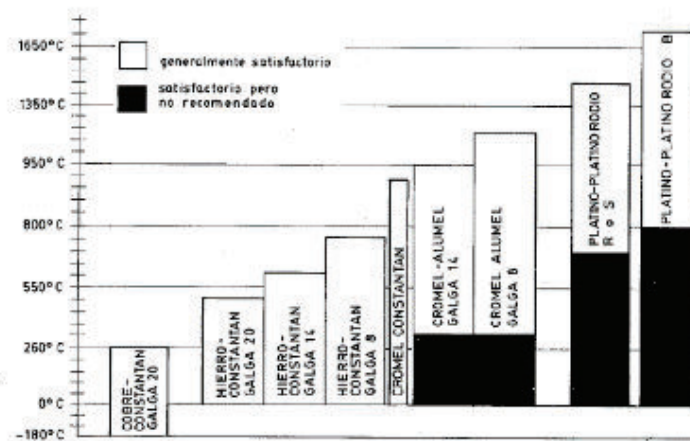
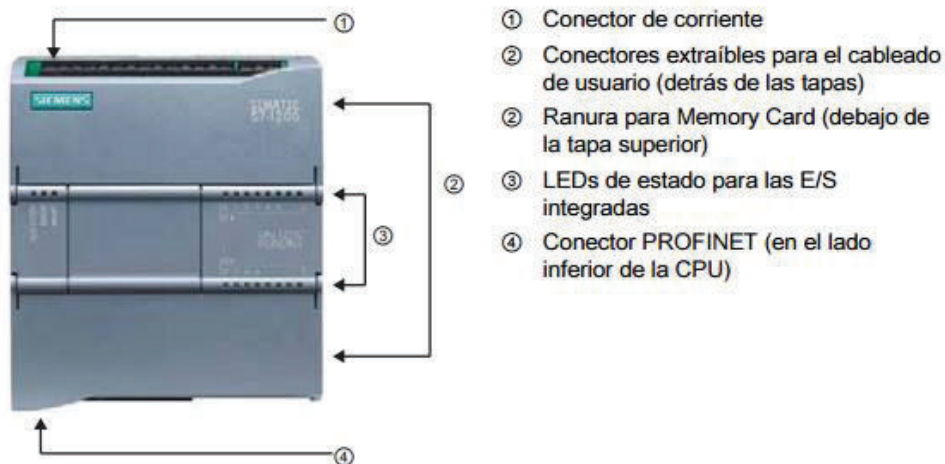


Fig. 6.20 Selección de termopares.

ANEXO 16

Características técnicas del PLC Simatic 7 1200

CONTROLADOR PROGRAMABLE S7-1200 SIMATIC



A.2.3 Datos técnicos de la CPU 1214C

Datos técnicos			
Modelo	CPU 1214C AC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/DC
Referencia	6ES7 214-1BE30-0XB0	6ES7 214-1HE30-0XB0	6ES7 214-1AE30-0XB0
General			
Dimensiones A x A x P (mm)	110 x 100 x 75		
Peso	475 gramos	435 gramos	415 gramos
Disipación de potencia	14 W	12 W	
Intensidad disponible (SM y bus CM)	1600 mA máx. (5 V DC)		
Intensidad disponible (24 V DC)	400 mA máx. (alimentación de sensores)		
Consumo de corriente de las entradas digitales (24 V DC)	4 mA/entrada utilizada		
Características de la CPU			
Memoria de usuario	50 KB de memoria de trabajo / 2 MB de memoria de carga / 2 KB de memoria remanente		
E/S digitales integradas	14 entradas/10 salidas		
E/S analógicas integradas	2 entradas		
Tamaño de la memoria imagen de proceso	1024 bytes de entradas (I)/1024 bytes de salidas (Q)		
Área de marcas (M)	8192 bytes		
Ampliación con módulos de señales	8 SMs máx.		

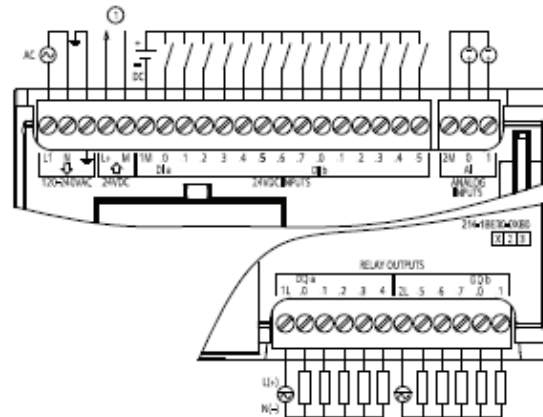
Datos técnicos

A.2 CPUs

Datos técnicos			
Modelo	CPU 1214C AC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/DC
Ampliación con Signal Boards	1 SB máx.		
Ampliación con módulos de comunicación	3 CMs máx.		
Contadores rápidos	6 en total Fase simple: 3 a 100 kHz y 3 a 30 kHz de frecuencia de reloj Fase en cuadratura: 3 a 80 kHz y 3 a 20 kHz de frecuencia de reloj		
Salidas de impulsos	2		
Entradas de captura de impulsos	14		
Alarmas de retardo/cíclicas	4 en total con resolución de 1 ms		
Alarmas de flanco	12 ascendentes y 12 descendentes (14 y 14 con Signal Board opcional)		
Memory Card	SIMATIC Memory Card (opcional)		
Precisión del reloj en tiempo real	+/- 60 segundos/mes		
Tiempo de respaldo del reloj en tiempo real	10 días típ. 6 días mín. a 40°C (condensador de alto rendimiento sin mantenimiento)		
Rendimiento			
Velocidad de ejecución booleana	0,1 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución de transferencia de palabras	12 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución de funciones matemáticas con números reales	18 µs/instrucción		
Comunicación			
Número de puertos	1		
Tipo	Ethernet		
Conexiones	<ul style="list-style-type: none"> • 3 para HMI • 1 para la programadora • 8 para instrucciones Ethernet en el programa de usuario • 3 para CPU a CPU 		
Transferencia de datos	10/100 Mb/s		
Aislamiento (señal externa a lógica del PLC)	Aislado por transformador, 1500 V DC		
Tipo de cable	CAT5e apantallado		
Fuente de alimentación			
Rango de tensión	85 a 264 V AC	20,4 a 28,8 V DC	
Frecuencia de línea	47 a 63 Hz	--	
Intensidad de entrada CPU sólo a carga máx.	100 mA a 120 V AC 50 mA a 240 V AC	500 mA a 24 V DC	
CPU con todos los accesorios de ampliación a carga máx.	300 mA a 120 V AC 150 mA a 240 V AC	1500 mA a 24 V DC	
Corriente de irupción (máx.)	20 A a 264 V AC	12 A a 28,8 V DC	
Aislamiento (potencia de entrada a lógica)	1500 V AC	Sin aislamiento	
Corriente de fuga a tierra, línea AC a tierra funcional	0,5 mA máx.	--	

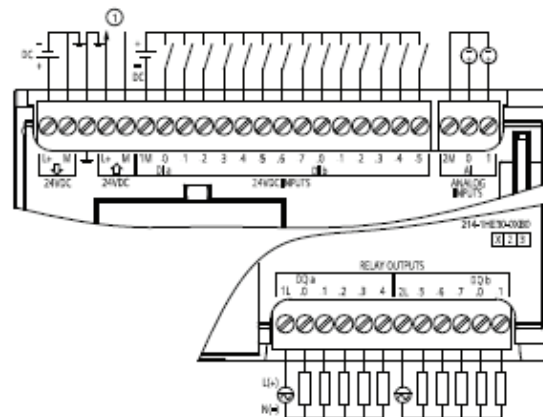
Datos técnicos			
Modelo	CPU 1214C AC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/relé	CPU 1214C DC/DC/DC
Tiempo de mantenimiento (pérdida de potencia)	20 ms a 120 V AC 80 ms a 240 V AC	10 ms a 24 V DC	
Fusible interno, no reemplazable por el usuario	3 A, 250 V, de acción lenta		
Alimentación de sensores			
Rango de tensión	20,4 a 28,8 V DC	L+ menos 4 V DC mín.	
Intensidad de salida nominal (máx.)	400 mA (protegido contra cortocircuito)		
Ruido de rizado máx. (<10 MHz)	< 1 V de pico a pico	Igual a la línea de entrada	
Aislamiento (lógica de la CPU a alimentación de sensores)	Sin aislamiento		
Entradas digitales			
Número de entradas	14		
Tipo	Sumidero/fuente (tipo 1 IEC sumidero)		
Tensión nominal	24 V DC a 4 mA, nominal		
Tensión continua admisible	30 V DC, máx.		
Sobretensión transitoria	35 V DC durante 0,5 seg.		
Señal 1 lógica (mín.)	15 V DC a 2,5 mA		
Señal 0 lógica (máx.)	5 V DC a 1 mA		
Aislamiento (campo a lógica)	500 V AC durante 1 minuto		
Grupos de aislamiento	1		
Tiempos de filtro	0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2, 6,4 y 12,8 ms (seleccionable en grupos de 4)		
Frecuencias de entrada de reloj HSC (máx.) (señal 1 lógica = 15 a 26 V DC)	Fase simple: 100 KHz (la.0 a la.5) y 30 KHz (la.6 a lb.5) Fase en cuadratura: 80 KHz (la.0 a la.5) y 20 KHz (la.6 a lb.5)		
Número de entradas ON simultáneamente	14		
Longitud de cable (metros)	500 apantallado, 300 no apantallado, 50 apantallado para entradas HSC		
Entradas analógicas			
Número de entradas	2		
Tipo	Tensión (asimétrica)		
Rango	0 a 10 V		
Rango total (palabra de datos)	0 a 27648 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))		
Rango de sobreimpulso (palabra de datos)	27.649 a 32.511 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))		
Desbordamiento (palabra de datos)	32.512 a 32767 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))		
Resolución	10 bits		
Tensión de resistencia al choque máxima	35 V DC		
Aislamiento	Ninguno, débil, medio o fuerte (consulte los tiempos de respuesta de las etapas en Tiempos de respuesta de las entradas analógicas (Página 346))		

Diagramas de cableado



① Alimentación de sensores 24 V DC

Figura A-7 CPU 1214C AC/DC/relé (6ES7 214-1BE30-0XB0)



① Alimentación de sensores 24 V DC

Figura A-8 CPU 1214C DC/DC/relé (6ES7 214-1HE30-0XB0)

ANEXO 17

EL ACERO

**STAVAX = AISI 420***Acero inoxidable para moldes de plástico*

GENERALIDADES: Es un acero inoxidable para herramientas, aleado al cromo, dotado de las siguientes propiedades:

- Buena resistencia a la corrosión
- Excelente pulibilidad
- Buena resistencia al desgaste
- Buena maquinabilidad
- Buena estabilidad en el temple
- Dureza de suministro 215 HB

Características que pueden resumir los siguientes beneficios:

1. Menor costo de mantenimiento del molde
2. Menor costo de producción

ANÁLISIS TÍPICO %

	C	Si	Mn	S	Cr	V
STAVAX	0.38	0.80	0.5	-	13.6	0.3
AISI 420	≥ 0.15	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.03	12.0-14.0	-

EQUIVALENCIAS

AISI	420
SAE	51420
W.Nr	1.2083
DIN	X40Cr13
UDDEHOLM	STAVAX

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS A 50 HRC

Temperatura °C	20	200	400
Densidad kg/m ³	7800	7750	7700
Módulo de elasticidad N/mm ²	200000	190000	180000
Coefficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20 °C	—	11x10 ⁻⁶	11.4x10 ⁻⁶

APLICACIONES:

Stavax es adecuada para todo tipo de herramientas de moldeo, pero especialmente para moldes que deban reunir requisitos como:

- Resistencia a la corrosión/manchas: Moldeado de PVC, acetatos
- Resistencia al desgaste: Moldeado de materiales
- Acabado superficial de gran calidad: Para producción de piezas ópticas como lentes de cámaras, cristales de gafas y artículos médicos.

MOLDE	DUREZA RECOMENDADA HRC
Moldes de inyección para: materiales termoplásticos materiales termoendurecibles	45-54 45-54
Moldes de compresión/transferencia	50-54
Moldes de soplado para PVC, PET, etc.	45-54
Moldes de extrusión, extrusión horizontal para varillas y perfiles	45-54

**TRATAMIENTO TÉRMICO**

Recocido blando: Proteger el acero y calentarlo en toda su masa a 780 °C. Luego enfriarlo en el horno a 10 °C/hora hasta 650 °C y por último libremente al aire.

Eliminación de tensiones: Después del desbastado en máquina, debe calentarse la herramienta en toda su masa a 650 °C, tiempo de mantenimiento 2 horas. Enfriar lentamente hasta 500 °C y después libremente al aire.

Temple:

Temperatura de precalentamiento: 600-850 °C

Temperatura de austenización: 1000-1050 °C, normalmente 1020-1030 °C

- Proteger la herramienta contra decarburación y oxidación durante el proceso de temple.

EL ACERO

Agentes de enfriamiento:

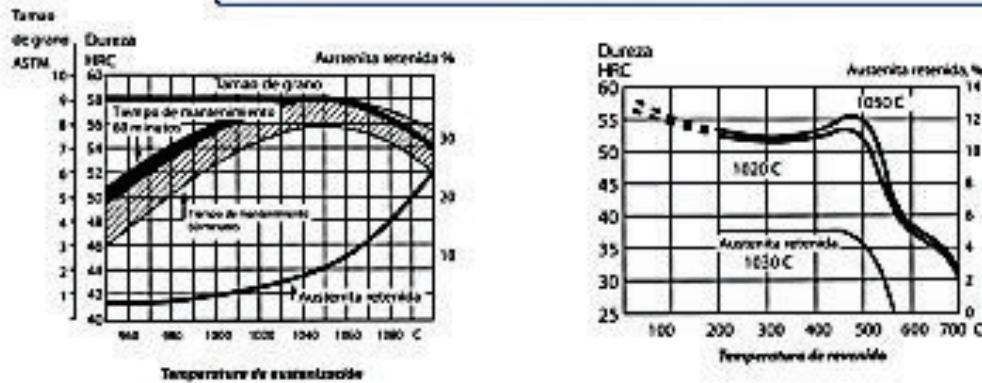
Aceite

Lecho fluidizado o baño de sales a 250-550 °C

Gas a alta velocidad/atmósfera circulante

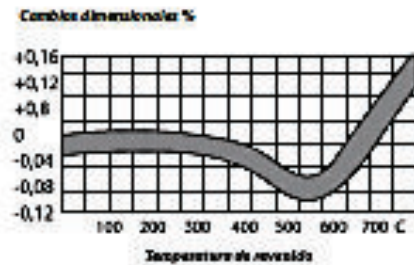
A fin de tener propiedades óptimas, el enfriamiento debe realizarse lo más rápido posible, teniendo en cuenta una distorsión aceptable. Revenir la herramienta apenas alcance los 70 °C

CURVAS PARA TEMPLE Y REVENIDO (2b+2h)



CAMBIOS DIMENSIONALES DURANTE EL TEMPLE Y REVENIDO

TEMPLE DESDE 1020 °C		Ancho %	Longitud %	Espesor %
Temple en aceite	min.	+0.02	+0.02	+0.04
	mx.	-0.05	-0.03	
Baño de martempera	min.	-0.02	0	-0.04
	mx.	-0.03	+0.03	
Temple al aire	min.	-0.02	0	0
	mx.	+0.02	-0.03	
Temple al vacío	min.	-0.01	0	-0.04
	mx.	-0.02	+0.01	



MEDIDAS EN STOCK

REDONDO

Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
28	4.8
43	11.4
50.8	15.9
63.5	24.9
76.2	35.8
90	49.9
102	64.1
110	74.6
115	81.5
127	99.4
152	144.7
180	199.8

PLATINAS

Platinas (mm)	Peso (kg/m)
50 x 500	126.3
54 x 306	87.3
76.2 x 305	187.4
76.2 x 610	354.9
80 x 300	125.6
80 x 350	157.0

RAMAX

REDONDO

Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
50.8	15.9
63.5	24.9
76.2	35.8
102	64.1
25.4	37.8

NOTA: Acero inoxidable martempera pre-templado
= 316/32

ANEXO 18

Prueba en vacío

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	19
1	20,2
2	26,3
3	34,5
4	43,7
5	52,1
6	59,5
7	66,7
8	75,6
9	85,9
10	97,3
11	107,8
12	117,7
13	128,5
14	137,6
15	147,2
16	157,8
17	166,4
18	172,9
19	184,2
20	195,2
21	213,6
22	234,4
23	258,1
24	277,6
25	298,6
26	317,3
27	332,2
28	347,6
29	364,2
30	378,5
31	393,2
32	408

33	418,6
34	430,4
35	445,6
36	453,3
37	467,9
38	477,3
39	489,6
40	504,3
41	517,2
42	528,6
43	540,3
44	549,4
45	560,1
46	570,3
47	579,7
48	589,1
49	597,8
50	605,9
51	614,5
52	622,7
53	630,9
54	639,2
55	647,1
56	655,2
57	662,9
58	670,7
59	679,2
60	686,2
61	693,6
62	700,9
63	708,3
64	716,2
65	723

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
66	730,3
67	737,4
68	744,5
69	751,6
70	759,2
71	765,4
72	772,4
73	779,1
74	785,8
75	794,1
76	799
77	804,6
78	811,6
79	817,3
80	824,1
81	829,7
82	835,8
83	841,7
84	848,1
85	853,8
86	859,9
87	866,8
88	872
89	878,2
90	884,2
91	890,2
92	896,1
93	901,8
94	907,5
95	913,2
96	919,3
97	924,8
98	930,9
99	935,9

100	941,5
101	947,1
102	952,7
103	958,1
104	964
105	969,6
106	974,5
107	980
108	985,4
109	990,8
110	996,3
111	1002
112	1007
113	1012
114	1018
115	1023
116	1028
117	1033
118	1038
119	1043
120	1047
121	1052
122	1056
123	1061
124	1065
125	1069
126	1074
127	1078
128	1082
129	1086
130	1090
131	1093
132	1097
133	1101

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
134	1104
135	1108
136	1111
137	1115
138	1119
139	1122
140	1126
141	1129
142	1132
143	1136
144	1139
145	1143
146	1146
147	1149
148	1153
149	1156
150	1159
151	1163
152	1166
153	1169
154	1172
155	1176
156	1179
157	1182
158	1185
159	1189
160	1192
161	1195
162	1198
163	1201
164	1205
165	1208
166	1211
167	1214

168	1218
169	1221
170	1224
171	1227
172	1231
173	1234
174	1237
175	1240
176	1244
177	1247
178	1250
179	1254
180	1257

Recocido acero AISI 1045

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	19
1	28,8
2	38,7
3	48,7
4	59,7
5	70,7
6	80,5
7	91,6
8	104,5
9	114,7
10	123,9
11	138,5
12	149,6
13	160,3
14	170,4
15	179,6
16	186,8
17	191,3
18	200,9
18	212
19	220,8
20	230,9
21	242,6
22	250,1
23	260,1
24	268,1
25	276,6
26	282,3
27	291,9
28	298,9
29	307,2
30	314,9
31	322,1
32	329,3
33	335,8

34	342,6
35	349
36	355,8
37	362,4
38	368,2
39	374,2
40	381
41	388,1
42	396,2
43	403,6
44	410,5
45	417,4
46	424,2
47	431,4
48	437,4
49	443,7
50	450,7
51	456,6
52	462,9
53	468,9
54	475,5
55	482,3
56	489,1
57	496,3
58	501,7
59	508,2
60	514,4
61	520,6
62	527,8
63	534,3
64	541,4
65	547,7
66	549,8
67	549,8
68	550
69	550,3

70	551
71	550,2
72	549,8
73	549,5
75	549,9
76	549,9
77	550,9

Temple acero AISI 1045

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	23,10
1	32,90
2	42,80
3	52,80
4	63,80
5	74,80
6	84,60
7	95,70
8	108,60
9	118,80
10	128,00
11	142,60
12	153,70
13	164,40
14	174,50
15	183,90
16	190,90
17	195,40
18	205,00
19	216,10
20	224,90
21	235,00
22	246,70
23	254,20
24	264,20
25	272,20
26	280,70
27	286,40
28	296,00
29	303,00
30	311,30
31	319,00
32	326,20
33	333,40
34	339,90

Tiempo	Temperatura
71	623,1
72	630,4

35	346,70
36	353,10
37	359,2
38	359,6
39	363,9
40	375,6
41	388,9
42	394,7
43	395,4
44	402,6
45	411
46	414,8
47	423,4
48	427,9
49	433,3
50	443,9
51	455,9
52	468,9
53	480,9
54	492,6
55	504,3
56	515,9
57	526
58	535
59	544,2
60	551,4
61	560
62	569,4
63	576,1
64	582,7
65	591,1
66	599,9
67	608,4
68	612,9
69	618,2
70	618,6

106	831,2
107	825,6

Tiempo	Temperatura
73	638,5
74	646,6
75	654,7
76	660,8
77	659,5
78	662,8
79	669,6
80	677,3
81	685,1
82	692,8
83	700,5
84	707,5
85	708,2
86	712,2
87	718,7
88	725,9
89	733,2
90	740,5
91	747,6
92	754,7
93	761,6
94	768,3
95	774,9
96	781,4
97	787,9
98	794,3
99	800,5
100	806,5
101	812,4
102	818,3
103	823,9
104	826,6
105	831,4

108	823,6
109	828,5
110	834
111	832,1
112	826,2
113	826,4
114	831,4
115	834
116	829,7
117	828,2
118	832,9
119	835,7
120	831,5
121	826,9
122	827,2
123	833,2
124	834,3
125	829,7
126	827,5
127	832,6
128	834,3
129	830

Temple del acero STAVAX

Time [min]	Temperatura [°C]
0	136
1	155,7
2	176,7
3	197,2
4	221,1
5	240,6
6	266,2
7	287,1
8	303,9
9	317,4
10	337,7
11	359,2
12	376,6
13	393,2
14	408,6
15	424,1
16	438,9
17	452,6
18	465,8
19	478,8
20	490,8
21	503,3
22	515,5
23	527,5
24	538,6
25	578,6
26	593,8
27	606,4
28	617,6
29	626,8
30	635
31	643,2
32	651,3
33	659,5
34	667,6

37	691,3
38	698,9
39	706,4
40	713,5
41	721,1
42	728,2
43	735,5
44	742,7
45	749,7
46	756,7
47	763,5
48	770,2
49	777
50	783,2
51	789,4
52	793,2
53	796,9
54	795,6
55	795,5
56	792,3
57	789,9
58	788,2
59	786,9
60	786,1
61	785,5
62	785,6
63	787,1
64	788,7
65	790
66	791,6
67	793
68	795,4
69	797,4
70	798,2
71	799
72	799,5

Time [min]	Temperatura [°C]
35	675,7
36	683,6
75	799,3
76	799,4
77	801,1
78	798,9
79	798,6
80	799,4
81	800
82	801
83	800,5
84	799,3
85	800,3
86	800,3
87	799,7
88	799,8
89	800,8
90	800,2
91	799,8
92	800,5
93	800,2
94	799,9
95	799,6
96	800,6
97	799,4
98	800,6
99	799,7
100	800,9
101	800
102	800,1
103	800,4
104	800,1
105	802,6
106	805,4
107	808,7
108	813
109	816
110	820,3
111	824,1

37	691,3
73	800
74	799,8
113	824,4
114	824,4
115	824,4
116	824,5
117	824,7
118	824,7
119	824,6
120	824,5
121	824,7
122	824,8
123	824,8
124	825
125	825,1
126	825,2
127	825,3
128	825,4
129	825,6
130	825,6
131	825,7
132	826
133	826
134	826,2
135	826,3
136	826,6
137	826,7
138	826,6
139	826,7
140	826,6
141	826,5
142	826,4
143	826,3
144	826,4
145	826,3
146	826,3
147	826,3
148	826,3
149	826,5

Time [min]	Temperatura [°C]
112	824,3
151	826,6
152	826,9
153	827
154	827,1
155	827,2
156	827,3
157	827,2
158	827,1
159	827,2
160	827,4
161	827,6
162	827,6
163	827,6
164	828
165	828,2
166	828,2
167	828,2
168	828,3
169	828,2
170	828,1
171	828
172	831,3
173	835,7
174	839,4
175	843,1
176	846,3
177	850,2
178	853,3
179	857,4
180	860,6
181	864,8
182	868,1
183	871,3
184	874,4
185	878,1
186	880,9
187	884,5
188	887,1

37	691,3
150	826,7
189	889,8
190	895,7
191	898,2
192	901,3
193	904,3
194	907,4
195	910,3
196	913,1
197	916,5
198	919,3
199	923,5
200	927,4
201	930,1
202	934
203	939,1
204	941,9
205	946
206	949,8
207	952,9
208	957,5
209	961,3
210	964,5
211	967,8
212	971
213	976
214	978,5
215	981,2
216	985,9
217	988,3
218	991,8
219	995,6
220	997,9
221	1001,3
222	1004,6
223	1006,6
224	1009,6
225	1012,4
226	1015,5

Time [min]	Temperatura [°C]
227	1018,4
228	1021,6
229	1024,5
230	1027
231	1030,8
232	1033,3
233	1035,4
234	1038,6
235	1041,8
236	1044,9
237	1047,5
238	1049,2
239	1050,4
240	1050,6
241	1051,1
242	1050,7
243	1050,1
244	1050,6
245	1050,3
246	1050,6
247	1050,8
248	1050,1
249	1050,4
250	1050,7
251	1050,7
252	1050,7
253	1050,7
254	1050,7
255	1050,7
256	1050,3
257	1050,5
258	1051,6
259	1050,2
260	1050,5
261	1050,4
262	1050,5

37	691,3
263	1050,5
264	1051,2
265	1050,4
266	1049,9
267	1050,6