

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE UN HORNO DE  
NITRURACIÓN MARCA WILD BARFIELD MODELO  
TRT.1010**

PRESENTADO POR:

**OSCAR RENATO CEA PÉREZ  
GABRIEL EDUARDO FLORES MEDRANO  
WILBER GEOVANNI GARCÍA HERRERA  
JULIO CÉSAR PÉREZ PÉREZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2023

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL :

**Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO :

**Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO :

**Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título

:

**PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE UN HORNO DE  
NITRURACIÓN MARCA WILD BARFIELD MODELO  
TRT.1010**

Presentado por

:

**OSCAR RENATO CEA PÉREZ  
GABRIEL EDUARDO FLORES MEDRANO  
WILBER GEOVANNI GARCÍA HERRERA  
JULIO CÉSAR PÉREZ PÉREZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

:

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, octubre de 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## DEDICATORIA

Agradezco a Dios por permitirme culminar con éxito esta carrera, y por estar conmigo en cada parte del proceso.

A mis padres Oscar Renato Cea Garay y María Luisa Pérez de Cea quienes siempre me impulsaron a estudiar y me brindaron su apoyo incondicional a pesar de todas las dificultades en mi formación académica.

A mi hermano Ernesto Salvador Cea por ser mi apoyo, a mi abuela materna Adriana Pérez que desde el cielo ha de estar celebrando cada logro alcanzado por mi persona.

A Adela Abigail Ortega Hernández por ser mi motivadora en los momentos más difíciles tanto en la carrera como a nivel personal, por sus palabras de aliento para dar lo mejor de mí.

A Luis Gilberto Navarro, por ser mi mejor amigo de casi toda la vida, por sus consejos y por estar en los buenos y malos momentos de la vida.

A José Rolando Rosa Chávez, por ser un amigo y compañero real y leal a lo largo de la carrera y en la vida.

A mis compañeros, docentes y amigos que me apoyaron a lo largo de la carrera.

*Oscar Renato*

## DEDICATORIA

Primeramente, a Dios todo poderoso, por permitirme terminar la carrera de forma satisfactoria y ser una luz en los tiempos más difíciles.

A mis padres Vilma Esperanza y José Salomón, quienes me han dado su apoyo incondicional en el transcurso de toda la carrera y en la vida, sin importar todas las dificultades que han surgido. Además de llenarme de amor y creer en mí y en mis sueños.

A mis hermanos y sobrina Marisela Beatriz, José Daniel, Sofía Guadalupe, quienes me aconsejaron de seguir adelante y nunca rendirme a pesar de las dificultades. Además del cariño que ellos me han brindado.

A mi novia Ruth López, quien me ha acompañado durante todo el camino para poder alcanzar este logro y ser la persona con la que he compartido muchos bellos momentos.

*Gabriel Eduardo*

## DEDICATORIA

Primeramente, a Dios, luego a todos aquellos que han sido parte fundamental en mi trayectoria académica.

A mis padres: Oscar García y Daisy de García, por su amor incondicional y constante apoyo en cada paso que he dado.

A mi novia: Lucia Aguirre, por su incondicional cariño, comprensión y aliento a seguir adelante y esforzarme cada día más.

A mis amigos, por su aliento y compañía a lo largo de esta travesía.

A mi familia que no está en el país, por su apoyo incondicional tanto moral como económico.

*Wilber Geovanni*

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme las fuerzas y la sabiduría para afrontar cada reto que surgió en el camino.

A mis padres, Juana Ana Pérez de Pérez y Julio Cesar Pérez Vásquez, quienes me apoyaron de forma incondicional durante todo este proceso, por brindarme sus experiencias y consejos en los momentos difíciles y por darme ánimos día con día, para poder culminar con este trabajo.

A mis compañeros de tesis, por hacer este esfuerzo conjunto de sacar adelante este trabajo. Gracias por el apoyo y los consejos que me brindaron.

*Julio César*



## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, agradezco a Dios por la vida, la salud y el conocimiento obtenido, el cual utilizaré para el bien de las personas que amo y que me apoyaron en cada etapa de mi formación académica.

A la Universidad de El Salvador, a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y a mis docentes, los profesionales que hicieron posible la comprensión, el crecimiento y mi formación integral.

A mis compañeros, amigos y familia, por cada momento en los que me apoyaron para seguir adelante a pesar de las dificultades encontradas.

Agradezco al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, mi asesor, quien con su preparación en la ciencia y la Ingeniería sumada a su extensa amabilidad y dedicación ha hecho posible que dé los pasos necesarios para alcanzar tan respetable logro.

Una barrera más que supero, una meta más que se alcanzó. Los obstáculos encontrados me han fortalecido y me han llenado de felicidad cuando los culmino con esfuerzo.

*Oscar Renato*

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios todo poderoso, por permitirme terminar la carrera de forma satisfactoria y ser una luz en los tiempos más difíciles.

A mi mamá Vilma Esperanza, quien fue alguien fundamental en mi carrera por darme una voz de aliento y amor. Agradezco por todas aquellas mañanas en las que se levantaba para poder ponerme algo de comer, agradezco por aquel café que me ponía que para mí era el mejor del mundo que no solo llenaba mi estómago, sino que también mi corazón.

A papá José Salomón, quien siempre me ha aconsejado para que siga adelante y no me rinda. Agradezco por esas mañanas en las que se desviaba de su camino al trabajo para poderme acompañar en mi camino hacia la Universidad y todas esas pláticas matutinas.

A mis hermanos Marisela Beatriz y José Daniel y sobrina Sofía Guadalupe, quienes me dijeron que si lo podía soñar lo podía lograr. Agradezco a todas aquellas noches de desvelo que me apoyaron con su compañía.

A mi novia Ruth López, quien conocí el primer día de la universidad sin saber que a los días iba a surgir algo bonito entre nosotros. Agradezco su apoyo y motivación de querer compartir sueños juntos.

A Srta. Nelly Sarty, quien creyó en mí y me apoyo para seguir luchando por mis sueños.

A Javier Sosa, quien fue compañero en muchas asignaturas las cuales pudimos afrontar con éxito después de muchas horas de estudio.

A nuestro Asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, quien ha sido la guía durante todo este tiempo, agradezco por la calidez humana, paciencia y disciplina con la que nos encamino a lograr este éxito.

*Gabriel Eduardo*

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, fortaleciéndome en los momentos de duda. Ha sido la fe en su plan y propósito lo que me ha impulsado a superar los desafíos y a perseverar en la búsqueda del conocimiento, y por darme la vida permitiéndome celebrar este logro con mi familia, novia, amigos y seres queridos.

Quiero dedicar un profundo y sincero agradecimiento a mis padres: Oscar armando García y Ana Daisy García, quienes han sido los faros que han iluminado mi camino durante toda esta travesía académica y en la realización de esta tesis. Desde mis primeros pasos en el mundo del aprendizaje hasta este momento de logro, su amor, apoyo y sacrificio han sido la fuerza motriz que me ha impulsado a perseverar. Han sido mis pilares inquebrantables, brindándome aliento y ánimo en los momentos de dificultad y celebrando conmigo en cada logro alcanzado. Sus valores, enseñanzas y ejemplo. Siempre han creído en mí, incluso cuando yo mismo dudaba. Su confianza en mis capacidades me ha impulsado a superar obstáculos y a esforzarme más allá de mis límites. Este logro no es solo mío, es también un testimonio de su amor incondicional y de la educación que me han brindado.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a nuestro Docente Asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, cuya guía experta, paciencia y dedicación han sido esenciales para dar forma y dirección a este trabajo. Sus valiosas sugerencias y consejos han iluminado mi camino hacia la consecución de este logro.

A mi novia, Lucia Aguirre, le agradezco por su amor incondicional y constante aliento. Su respaldo ha sido mi mayor fortaleza en los momentos de dificultad y la razón por la que he perseverado hasta el final.

Mi gratitud se extiende a mis amigos Ariel Borisov y David Estévez, por tan grande apoyo a lo largo de este camino en la universidad; así como también a mis compañeros de clase, por su apoyo inquebrantable, intercambio de ideas y momentos compartidos que han aligerado la carga de este desafío.

*Wilber Giovanni*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecerle a Dios por brindarme la fortaleza y la sabiduría para concluir con mis estudios, por nunca dejarme solo y estar conmigo tanto en los buenos y malos momentos.

Agradecer a mis padres Juana Ana Pérez de Pérez y Julio César Pérez Vásquez por todo el amor y apoyo incondicional que me brindaron durante todo mi proceso de formación como ingeniero, por siempre creer en mí, por siempre estar a mi lado en los momentos difíciles y no dejar que me diera por vencido en ningún momento, este logro es para ustedes; mil gracias.

A la familia Bonilla Bonilla por recibirme con los brazos abiertos, por tratarme como un miembro más de la familia y hacerme sentir como en casa, gracias por confiar en mí y brindarme su apoyo y cariño.

También quiero agradecer a mi gran amigo Alex Bonilla, con quien forme equipo durante la mayor parte de la carrera, hermano gracias por confirmar en mí y por hacer que las noches de desvelo fueran más agradables, y por siempre dar el cien por ciento en cada una de las asignaciones que nos tocaron.

Quiero agradecer a los docentes de la escuela de ingeniería mecánica, en especial a mi asesor el Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, gracias por guiarnos durante todo este proceso y así poder entregar un buen trabajo final.

*Julio César*

# PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DE UN HORNO DE NITRURACIÓN MARCA WILD BARFIELD MODELO TRT.1010

Estudiantes: Brs. Oscar Renato Cea Pérez<sup>1</sup>, Gabriel Eduardo Flores Medrano<sup>2</sup>, Wilber Geovanni García Herrera<sup>3</sup> y Julio César Pérez Pérez<sup>4</sup>  
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>5</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## RESUMEN

Se ha realizado una propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield, modelo TRT.1010. Para ello se partió del estado actual del equipo debido a la falta de componentes. Así, se llevó a cabo una exhaustiva recopilación bibliográfica con el fin de comprender los fenómenos que ocurren en el proceso de nitruración gaseosa, así como los componentes necesarios para el funcionamiento del horno. Una vez recopilada la información pertinente, se identificaron los parámetros térmicos y los sistemas auxiliares necesarios para el correcto desempeño del horno. Con base en estos datos, se procedió al diseño térmico y la configuración de todos los sistemas asociados que acompañan el funcionamiento del horno. Además, se llevó a cabo una cuidadosa selección de los componentes que no serían fabricados. Posteriormente, se elaboró una descripción detallada de los procesos de fabricación, los materiales necesarios y los planos requeridos para cada uno de los componentes. Asimismo, se determinaron los costos de los materiales, las herramientas y los insumos necesarios para llevar a cabo la fabricación. Finalmente, se presentan los planos de conjunto de los componentes a fabricar, así como las cotizaciones correspondientes. Concluyendo que la evaluación de las condiciones iniciales del horno emerge como un punto de partida crucial en el proceso de rehabilitación.

**Palabras clave:** Horno vertical, Nitruración gaseosa, Atmósfera controlada y Tratamiento termoquímico.

---

1 oscarcea2015@gmail.com

2 floresmedranogabrieleduardo@gmail.com

3 wilbergeova24@gmail.com

4 jcpp49201@gmail.com

5 jonathan.berrios@ues.edu.sv

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Generalidades .....	4
1.2. Nitruabilidad .....	5
1.3. Formación y estructura de la capa nitruada .....	6
1.3.1. Profundidad de la capa nitruada .....	7
1.3.2. Estructura de la capa nitruada .....	8
1.4. Diagrama Hierro-Nitrógeno.....	10
1.5. Composición química de los aceros a nitruar .....	13
1.6. Nitruación de aceros y fundición .....	14
1.7. Proceso de nitruación .....	24
1.7.1. Tipos de horno .....	25
1.8. Nitruación gaseosa .....	34
1.8.1. Agitación de la atmósfera.....	37
1.9. Proceso de disociación del amoníaco .....	41
1.9.1. Medida de la disociación .....	42
1.9.2. Equipo de nitruación.....	44
1.10. Efectos de la nitruación y su prevención.....	46
1.11. Control de calidad en las piezas nitruadas .....	48
1.12. Manejo y procesamiento de gases residuales de amoníaco.....	50
1.12.1. Ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje.....	50
1.12.2. Manejo y seguridad .....	52
1.12.3. Opciones de procesamiento o disposición final de gases residuales .....	55
1.13. Ventajas y desventajas de la nitruación .....	58
2. DISEÑO TÉRMICO .....	60
2.1. Parámetros de diseño .....	62
2.2. Dimensiones y características de la cámara de carga.....	62
2.3. Cálculo de la carga térmica de nitruación .....	64
2.3.1. Energía requerida para realizar el proceso de nitruación .....	64
2.3.2. Pérdidas de calor .....	66
2.4. Diseño de suministro de energía .....	78
2.4.1. Diseño de resistencia eléctrica.....	79
2.4.2. Elaboración de la resistencia eléctrica.....	84

	Pág.
3. DISEÑO DE SISTEMAS AUXILIARES.....	86
3.1. Sistema de control de temperatura.....	87
3.1.1. Selección del sistema de control.....	89
3.1.2. Elementos del sistema de control.....	90
3.2. Sistema de agitación y sellado de la atmósfera gaseosa.....	103
3.2.1. Agitación.....	104
3.2.2. Sellado.....	127
3.3. Panel de control de amoníaco.....	130
3.4. Sistema de evacuación de gases.....	132
3.5. Tratamientos de los gases residuales.....	134
4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA REHABILITACIÓN.....	136
4.1. Indicaciones del proceso de construcción de sistemas auxiliares.....	136
4.1.1. Construcción del agitador y sellado de atmósfera.....	137
4.1.2. Construcción del panel de amoníaco.....	140
4.1.3. Construcción del sistema de gases residuales.....	142
4.1.4. Instrucciones de colocación de la carga de nitruración.....	143
4.1.5. Instrucciones de uso del panel de control de temperatura del horno.....	146
4.1.6. Instrucciones de mantenimiento.....	147
4.2. Estimación de costos de la rehabilitación.....	153
4.3. Disponibilidad de materiales.....	159
CONCLUSIONES.....	160
RECOMENDACIONES.....	162
BIBLIOGRAFÍA.....	163
ANEXOS.....	165
Anexos A: Estado actual del horno.....	165
Anexos B: Cotizaciones.....	167
Anexo C: Guía de práctica de laboratorio.....	172
Anexo D: Instrucciones de instalación y ensamble.....	182
Anexo E: Medidas de seguridad para la manipulación del amoníaco.....	187
Anexo F: Planos de fabricación.....	189

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Influencia de los elementos de aleación sobre la dureza después del nitrurado. Aleación base 0.35% C, 0.30% Si y 0.70% Mn [2]. .....	5
Fig. 1.2. Influencia de los elementos de aleación en el espesor de capa nitrurada medida a 400 HV. Nitrurado 8 h a 520 °C [2]. .....	6
Fig. 1.3. Influencia del tiempo en el espesor de la capa nitrurada de aceros a 500 °C [1]. .....	8
Fig. 1.4. Capa compuesta y de difusión obtenidas por nitruración. ....	9
Fig. 1.5. Diagrama de fases de Fe-N [1]. .....	12
Fig. 1.6. Variación en las propiedades superficiales de aceros nitrurados: a) Influencia de la temperatura de nitruración en la dureza de capa; b) Influencia del tiempo de nitruración en el espesor de capa. 1. Aceros al carbono, 2. Aceros aleados, y 3. Acero E71400 [4]. .....	16
Fig. 1.7. Variación de la dureza en el espesor de la capa nitrurada durante 24 h del acero E71400: a) 520 °C; b) 550 °C; y c) 600 °C [4]. .....	16
Fig. 1.8. Horno de retorta vertical [3]. .....	26
Fig. 1.9. Horno tipo campana móvil [3]. .....	27
Fig. 1.10. Horno de nitruración gaseosa TRT.1010 [7]. .....	29
Fig. 1.11. Esquema de horno Fluidizado [7]. .....	30
Fig. 1.12. Comparativa Hornos de nitruración [7]. .....	30
Fig. 1.13. Horno de nitruración de baja presión BMI [7]. .....	32
Fig. 1.14. Horno de nitruración Iónica BMI [6]. .....	33
Fig. 1.15. Horno de nitruración gaseosa [1]. .....	37
Fig. 1.16. Patrones de flujo axial y radial [8]. .....	38
Fig. 1.17. Agitador axial [9]. .....	39
Fig. 1.18. Agitador de palas planas [9]. .....	40
Fig. 1.19. Aparato para medir la disociación del amoníaco en los procesos de nitruración [1]. ..	42
Fig. 1.20. Esquema de la instalación para la nitruración [4]. .....	44
Fig. 1.21. Horno de mufla de cuba para la nitruración [4]. .....	45
Fig. 1.22. Escala de fragilidad de la capa nitrurada: I, no frágil; II, ligeramente frágil; III, frágil; IV, muy frágil [4]. .....	49
Fig. 1.23. Esquema simplificado del funcionamiento de una membrana de separación de gases [13]. .....	57



	Pág.
Fig. 2.1. Inspección de la Cámara de carga del horno de nitruración. ....	60
Fig. 2.2. Horno de nitruración rehabilitado: a) Vista frontal; b) Vista frontal con corte en la cámara de carga. ....	61
Fig. 2.3. Esquema sobre la disposición de las capas aislantes del horno con sus diámetros, dimensiones mm. ....	63
Fig. 2.4. Esquema de la Cámara de nitruración, dimensiones en mm. ....	63
Fig. 2.5. Esquema que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno. ....	68
Fig. 2.6. Dimensiones de las espiras. ....	82
Fig. 3.1. Inspección del panel de control de temperatura existente en el horno. ....	86
Fig. 3.2. Panel general del Laboratorio de Tratamientos Térmicos. ....	87
Fig. 3.3. Horno de tratamientos térmicos ubicado en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos: a) Vista frontal; b) Viñeta de referencia. ....	88
Fig. 3.4. Alimentador hembra. ....	88
Fig. 3.5. Controlador WATLOW modelo 1/4 DIN, serie SD. ....	91
Fig. 3.6. Interruptor termomagnético: a) Dos polos, 20 A; b) Un polo, 16 A. ....	92
Fig. 3.7. Contactor 25 A, 120 V (CA), 1NO AC3. ....	93
Fig. 3.8. Termocupla tipo K. ....	93
Fig. 3.9. Pulsador rojo (NC). ....	94
Fig. 3.10. Pulsador verde (NA). ....	94
Fig. 3.11. Maneta 2 posiciones 1 NA. ....	95
Fig. 3.12. Resistencia eléctrica calefactora. ....	96
Fig. 3.13. Relé SSR-25 DA. ....	96
Fig. 3.14. Cable AWG calibre 12 para un amperaje máximo de 30 A y enchufe macho. ....	97
Fig. 3.15. Alarma auditiva (Buzzer). ....	98
Fig. 3.16. Esquema de propuesta de distribución y rotulación del panel de control de temperatura. ....	99
Fig. 3.17. Control de temperatura del horno de nitruración. ....	100
Fig. 3.18. Sistema de agitación de la atmósfera: a) Espacio disponible para el rodete; y b) tornillos que sujetan del motor. ....	104
Fig. 3.19. Recirculación de la atmósfera [5]. ....	105
Fig. 3.20. Esquema de las soldaduras. ....	108

	Pág.
Fig. 3.21. Diagrama del álabe, dimensiones en mm.....	109
Fig. 3.22. Geometría de la soldadura. ....	109
Fig. 3.23. Ubicación de los esfuerzos cortantes primarios y secundarios.....	112
Fig. 3.24. Esquema, distancias del centroide a los puntos de interés. ....	113
Fig. 3.25. Esquema de soldadura entre cubo y anillo inferior del rodete, dimensiones en mm. ....	121
Fig. 3.26. Instalación del motor en la parte inferior del horno [5]. ....	127
Fig. 3.27. Sistema de sellado de atmósfera: a) Horno sin la tapadera superior o top plate, b) horno con tapadera superior y anillo de soporte.....	128
Fig. 3.28. Conjunto de tapadera y anillo de soporte [5]. ....	129
Fig. 3.29. Descripción del esquema del panel de control de amoníaco.....	130
Fig. 3.30. Tubería de evacuación de gases. ....	133
Fig. 3.31. Sistema de evacuación y tratamiento de gases de escape. ....	135
Fig. 4.1. Prueba de fuga de amoníaco con una mecha de azufre.....	141
Fig. 4.2. Parrillas para colocación de piezas.....	144
Fig. 4.3. Acoplamiento de las parrillas para formar la cesta de trabajo donde se montan las piezas a nitrurar. ....	145

## ÍNDICE DE TABLA

	Pág.
Tabla 1.1. Composiciones y características mecánicas de diversos aceros para nitruración [1].....	14
Tabla 1.2. Composición de las fundiciones recomendadas para nitrurar [4]. .....	23
Tabla 1.3. Características del agitador axial [9]. .....	39
Tabla 1.4. Características del agitador de palas planas [9]. .....	40
Tabla 1.5. Sistemas de exposición y propiedades toxicológicas de los gases residuales [11]. .	55
Tabla 2.1. Interpolación de propiedades del aire a $T_f$ .....	70
Tabla 2.2. Características del alambre Nifethal 70 [16]. .....	81
Tabla 3.1. Características de la termocupla Tipo K. ....	94
Tabla 3.2. Resumen de los componentes utilizados en el panel de control de temperatura del horno de nitruración. ....	101
Tabla 3.3. Características del acero inoxidable AISI 304 a diferentes temperaturas [17]. .....	105
Tabla 3.4. Propiedades torsionales de las soldaduras de filete [19]. .....	110
Tabla 3.5. Esfuerzos permisibles [19]. .....	120
Tabla 3.6. Parámetros de diseño del rodete. ....	124
Tabla 3.7. Parámetros del motor. ....	126
Tabla 3.8. Componentes del sistema de sellado. ....	129
Tabla 3.9. Componentes del panel de control de amoníaco [5]. .....	131
Tabla 3.10. Materiales del sistema de evacuación de gases. ....	134
Tabla 4.1. Costo de materiales para el sistema eléctrico y control de temperatura. ....	154
Tabla 4.2. Costo de materiales para el sistema de agitación y sellado de la atmósfera. ....	154
Tabla 4.3. Costo de materiales para el panel de control de amoníaco. ....	155
Tabla 4.4. Costo de materiales para el sistema de evacuación y tratamiento de gases. ....	155
Tabla 4.5. Otros costos necesarios para la rehabilitación del horno. ....	156
Tabla 4.6. Costos estimados de mano de obra para la fabricación e instalación de todos los elementos necesarios para realizar la rehabilitación del horno. ....	157
Tabla 4.7. Costos indirectos de fabricación e instalación para la rehabilitación del horno. ....	158
Tabla 4.8. Tabla resumen de los costos de rehabilitación del horno de nitruración. ....	158

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- a: Parámetro de red lateral
- $A_F$ : Área final
- $A_0$ : Área inicial
- c: Altura de la celda hexagonal
- $D_f$ : Diámetro final
- $D_0$ : Diámetro inicial
- EPP: Equipo de protección personal
- $Fe_2N$ : Fase  $\epsilon$  o Nitruro 1
- $Fe_{2-3}N$ : Nitruro hexagonal
- $Fe_4N$ : Fase  $\gamma'$  o Nitruro 2
- $Fe_\alpha$ : Hierro alfa
- g: Aceleración de la gravedad
- G: Centroide
- $G_{RL}$ : Número de Grashof
- h: Coeficiente convectivo
- $h_f$ : Altura final
- $h_0$ : Altura inicial
- HV: Dureza Vickers
- J: Segundo momento polar de inercia
- $L_f$ : Longitud final
- $L_0$ : Longitud inicial
- $J_u$ : Segundo momento polar unitario
- M: Momento
- NPT: Hilo de tubería nacional
- PFA: Alcanos de perfluoroalcoxi
- $P_M$ : Potencia del motor
- $Pr$ : Número de Prandtl
- PTFE: Politetrafluoroetileno (teflón)
- $r_A$ : Distancia hasta el punto A
- $r_B$ : Distancia hasta el punto B
- $r_C$ : Distancia hasta el punto c

$R_{aL}$ : Número de Raleigh  
 $R_{m\acute{a}x}$ : Resistencia a carga máxima  
 $R_1$ : Resistencia térmica de la capa de ladrillo rojo  
 $R_2$ : Resistencia térmica de la capa de lana de cerámica  
 $R_3$ : Resistencia térmica de la carcasa del horno  
 $T_f$ : Temperatura de nitruración  
 $T_o$ : Temperatura ambiente  
 $T_p$ : Temperatura de película  
 $T_s$ : Temperatura de la superficie del horno  
 $T_M$ : Torque  
 $\bar{x}$ : Ubicación del centroide en el eje x  
 $\bar{y}$ : Ubicación del centroide en el eje y  
 $\Delta T$ : Cambio de temperatura  
 $\sigma_f$ : Esfuerzo de falla  
 $\tau'$ : Esfuerzo cortante primario  
 $\tau''$ : Esfuerzo cortante secundario  
 $\tau_b$ : Esfuerzo permisible en el material base  
 $\tau_{m\acute{a}x}$ : Esfuerzo cortante máximo  
 $\tau_{perm}$ : Esfuerzo permisible  
 $\tau''_A$ : Esfuerzo cortante secundario en A  
 $\tau''_B$ : Esfuerzo cortante secundario en B  
 $\tau''_C$ : Esfuerzo cortante secundario en C

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de abrasión y desgaste están presentes de forma general en equipos y maquinaria industrial, así como en una infinidad de sistemas mecánicos utilizados en la vida diaria. Tales fenómenos físicos, traen consigo pérdidas económicas considerables relacionadas directamente con la disminución en el tiempo de vida útil de piezas y componentes metálicos y los consecuentes procesos asociados por reemplazo de piezas o reparación, lo que ocasiona tiempos muertos de operación.

Con el objetivo de incrementar las propiedades superficiales de diversos componentes mecánicos, específicamente dureza y resistencia al desgaste, se han desarrollado diversos métodos. De forma general, éstos pueden ser clasificados en dos grandes vertientes, el uso de recubrimientos superficiales y la utilización de tecnologías de modificación superficial. En este sentido, los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial a bajas temperaturas se han convertido en una alternativa muy atractiva para el incremento de las propiedades de dureza y resistencia al desgaste sin afectaciones microestructurales negativas.

Los tratamientos termoquímicos son aquellos en los que no solo se modifica la estructura del acero de bajo contenido de carbono y aceros aleados con Al, Cr, Mo y V, sino que también se modifica la composición química de la capa superficial, introduciendo diferentes productos químicos hasta una determinada profundidad. Estos procesos requieren el uso de calentamiento, mantenimiento a una temperatura y enfriamiento controlado en atmósferas especiales.

Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están, aumentar la dureza superficial de las piezas, dejando el núcleo dúctil y tenaz, aumentar la resistencia al desgaste debido al rozamiento, aumentar la resistencia a la fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.

Las sustancias químicas utilizadas normalmente son, el carbono, nitrógeno y azufre. Dichas sustancias químicas se introducen en el acero por medio del mecanismo de difusión, promovida por los gradientes composicionales y de temperatura, pudiendo así otorgar las bondades que cada elemento proporciona.

Dentro de los tratamientos termoquímicos que se utilizan se pueden destacar la cementación, cianuración, sulfinitación, carbonitruración y nitruración.

Para el presente trabajo de graduación, se destacará el proceso de nitruración el cual tiene diversas técnicas de uso cotidiano en la industria como la nitruración gaseosa, nitruración en sales y nitruración iónica, también denominada nitruración por plasma.

El proceso se usó por primera vez a finales de 1920, desde entonces su aplicación ha aumentado cotidianamente debido a que se puede aplicar en una numerosa gama de aceros con bajo contenido de carbono y aceros aleados con Al, Cr, Mo y V de las que se pensó originalmente.

Dentro de las técnicas, una de las más versátiles y que presenta buenos resultados es la nitruración en atmósfera gaseosa constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoníaco y amoníaco disociado. La nitruración gaseosa permite el endurecimiento parcial de piezas de casi cualquier forma, mediante el temple de capas protectoras. La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción de nitrógeno y con la atmósfera apropiada, todos los aceros son capaces de formar nitruros de hierro, los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contiene uno o más de los principales elementos de aleación que forman nitruros. Estos elementos son aluminio, cromo, vanadio y molibdeno.

En el presente trabajo se tiene como finalidad realizar una propuesta de rehabilitación del horno de nitruración WILD BARFIELD TRT.1010, ya que está dañado, sin embargo, por medio de una inspección se determinó que todavía se puede aprovechar, al no mostrar mayor daño estructural y que una buena parte de sus elementos se pueden sustituir por otros más actuales.

La propuesta comprende desde el diseño y la selección de los diferentes elementos faltantes, respaldada por una investigación que servirá para recolectar los criterios más oportunos. De esta forma se diseñará la resistencia eléctrica que será el método de calefacción con la que contará el horno para poder suministrar el calor necesario para elevar la temperatura de la carga de nitruración hasta un valor de 500 °C, en donde se obtienen los mejores resultados del proceso.

Otra parte bastante importante para tener en consideración dentro de la propuesta de rehabilitación es el sistema de hermeticidad del horno, ya que al operar con una

atmósfera gaseosa existiría el riesgo de fugas las cuales podrían ocasionar incidentes de intoxicación y quemaduras por los vapores calientes de amoníaco.

En la parte interior del horno se diseñarán las aspas, que harán circular la atmósfera para que la carga de nitruración siempre tenga una atmósfera rica en amoníaco.

Para finalizar, se presentará una estimación de los costos necesarios para realizar la rehabilitación, los cuales también contemplarán sistemas auxiliares necesarios para que el horno opere en óptimas condiciones.



## 1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentan las condiciones generales que se deben tomar en consideración para el proceso de nitruración, para el cual se necesita conocer previamente las variables que intervienen en el proceso, las cuales son la temperatura, la medida de disociación del amoníaco, entre otros. Además de conocer el panorama de los aceros óptimos a usar en el proceso de nitruración, para así aprovechar sus propiedades, así también de conocer los pasos para poder realizar un proceso lo más provechosamente posible.

### 1.1. GENERALIDADES

La acción endurecedora que el nitrógeno ejerce sobre los aceros fue descubierta por Fremy hacia el año 1861, cuando experimentaba la acción del amoníaco sobre piezas de acero calentadas a elevadas temperaturas [1].

A pesar del gran interés que parecía tener el proceso, pasaron muchos años sin que este método se pudiera aplicar industrialmente con éxito, debido a la fragilidad con que quedaba la capa superficial dura de los aceros nitrurados [1].

En 1905, el francés Hjalmar Braune anuncio que en sus trabajos había descubierto la existencia de un eutectoide formado por hierro y nitruro de hierro ( $Fe_4N$ ), en las capas frágiles de los aceros nitrurados, que era parecido a la perlita. A este eutectoide se le llamo braunita en reconocimiento a su descubridor [1].

Después de terminada la primera guerra europea, en el año 1923 **Fry** de la casa Krupp, descubrió que el problema de fragilidad de la capa exterior de las piezas nitruradas podía ser resuelto con el empleo de una temperatura de nitruración relativamente baja ( $\sim 500$  °C) y con el uso de los aceros aleados con aluminio, cromo y molibdeno en lugar de aceros ordinarios al carbono [1].

Si se realiza el proceso a temperatura muy próxima a 500 °C no aparece braunita en la capa superficial, tal como ocurre cuando el tratamiento se realiza a temperaturas elevadas y no como normalmente se venía haciendo hasta que **Fry** realizó sus investigaciones [1].

## 1.2. NITRURABILIDAD

El concepto nitrurabilidad se asocia a la capacidad del acero de absorber nitrógeno e incrementar la dureza superficial. La influencia de los elementos de aleación en la formación de nitruros y por lo tanto en la dureza es característica de cada elemento y varía según su concentración (ver Fig. 1.1). El espesor de la capa en general disminuye con el aumento del contenido de aleantes [2].

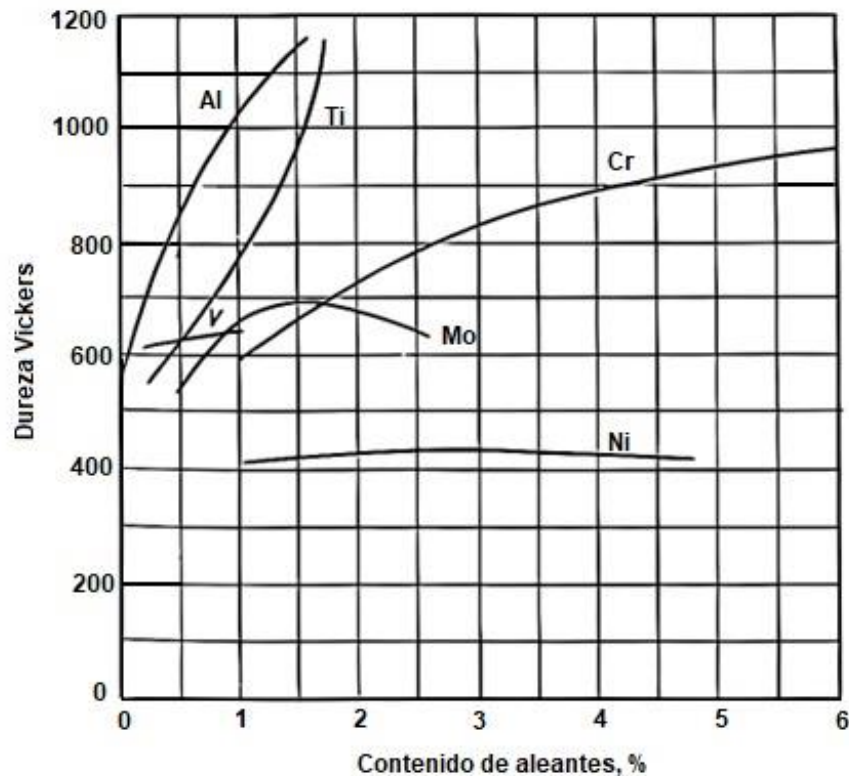


Fig. 1.1. Influencia de los elementos de aleación sobre la dureza después del nitrurado. Aleación base 0.35% C, 0.30% Si y 0.70% Mn [2].

La reducción del espesor de capa provocada por los elementos de aleación es porque estos forman nitruros y tienen un efecto retardador en la difusión de nitrógeno (ver Fig. 1.2). La nitrurabilidad también es afectada por la microestructura y el tamaño de grano del acero. Un acero elevado de ferrita favorece la difusión de nitrógeno mientras que un tamaño de grano grande puede favorecer la formación de nitruro o carbonitruros intergranulares que al aumentar de tamaño producen fisuras o fragilidad.

Usualmente las piezas que se van a nitrurar son templadas y revenidas previo a la nitruración a temperaturas entre 500 y 600 °C [2].

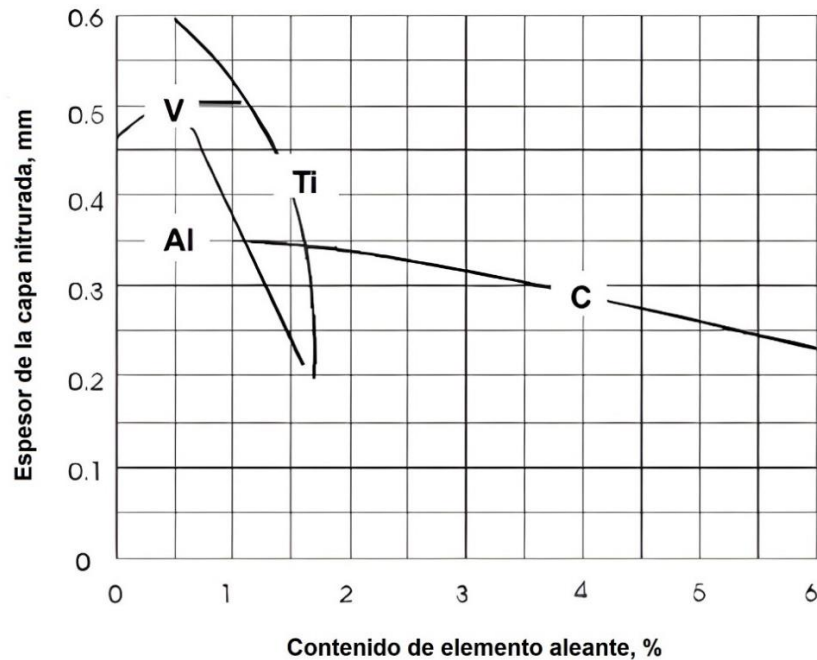


Fig. 1.2. Influencia de los elementos de aleación en el espesor de capa nitrurada medida a 400 HV. Nitrurado 8 h a 520 °C [2].

Este tratamiento permite la precipitación y coalescencia de los carburos en los límites de grano, por lo que éstos resultan menos efectivos para difundir el nitrógeno precisamente en el intervalo de temperatura donde la difusión en los límites de grano puede competir con la difusión en volumen [2].

### 1.3. FORMACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA CAPA NITRURADA

En general, es muy difícil el estudio metalográfico de las piezas de aceros aleados nitrurados a temperaturas corrientes (~500 °C), por ser generalmente de tamaño submicroscópico los nitruros que se forman en ese proceso. En el diagrama hierro-nitrógeno se señalan los principales constituyentes que pueden aparecer, determinados en su mayor parte nitrurados los aceros a temperaturas mucho más elevadas que la normal, porque de esa forma se facilita mucho su estudio [1].

Aunque en la actualidad no existe unanimidad absoluta en la interpretación de los fenómenos de endurecimiento que se producen en la nitruración, la teoría más admitida es la desarrollada por **Fry y colaboradores**, que señalan que la gran dureza de la capa nitrurada es debida a que el nitrógeno o los nitruros que se forman en el proceso originan una fuerte deformación de la red cristalina del acero situado en la zona periférica de las piezas, que es la causa directa del aumento en la dureza [1].

### **1.3.1. PROFUNDIDAD DE LA CAPA NITRURADA**

La profundidad de las capas nitruradas que se obtienen normalmente en la industria varia de 0.2 a 0.5 mm y su espesor depende principalmente de la temperatura y de la duración del tratamiento (ver Fig. 1.3). A 550 °C, con 25 h se consigue 0.28 mm de espesor de capa y con 80 h se obtiene ~0.68 mm. Para reducir la duración de la nitruración y aumentar la velocidad de penetración del nitrógeno se han propuesto diversas combinaciones de procesos fraccionados. Algunos recomiendan nitrurar primero a 500 °C solamente durante algunas horas y luego continuar la nitruración a temperaturas más elevadas, ~540 °C. Otros, en cambio, recomiendan comenzar nitrurando 10 h a 650 °C y luego 15 h a 525 °C. Sin embargo, estos métodos no han tenido mucha aceptación y generalmente se continúa manteniendo durante todo el proceso de nitruración la temperatura de 500 °C [1].

La profundidad de nitruración tiene una importancia relativa. La temperatura permanece constante, la penetración del nitrógeno dependerá del tiempo y la clase del material. Para los aceros aleados la profundidad de capa es siempre inferior que en los aceros al carbono. Varios ensayos realizados en el laboratorio y a escala industrial han demostrado que con penetraciones de nitrógeno en tiempos superiores a las 3.5 h no se consiguen mejorar la resistencia de las piezas tratadas [2].

Para conseguir propiedades óptimas no se debe tratar de obtener un espesor grande de la capa. Cuando el espesor de la capa es grande, no sólo se reduce el límite de fatiga, sino que, además, aumentan las deformaciones de la pieza en el horno, con

una temperatura y espesores de capa mínimos, las magnitudes de alveo y deformación son pequeñas [2].

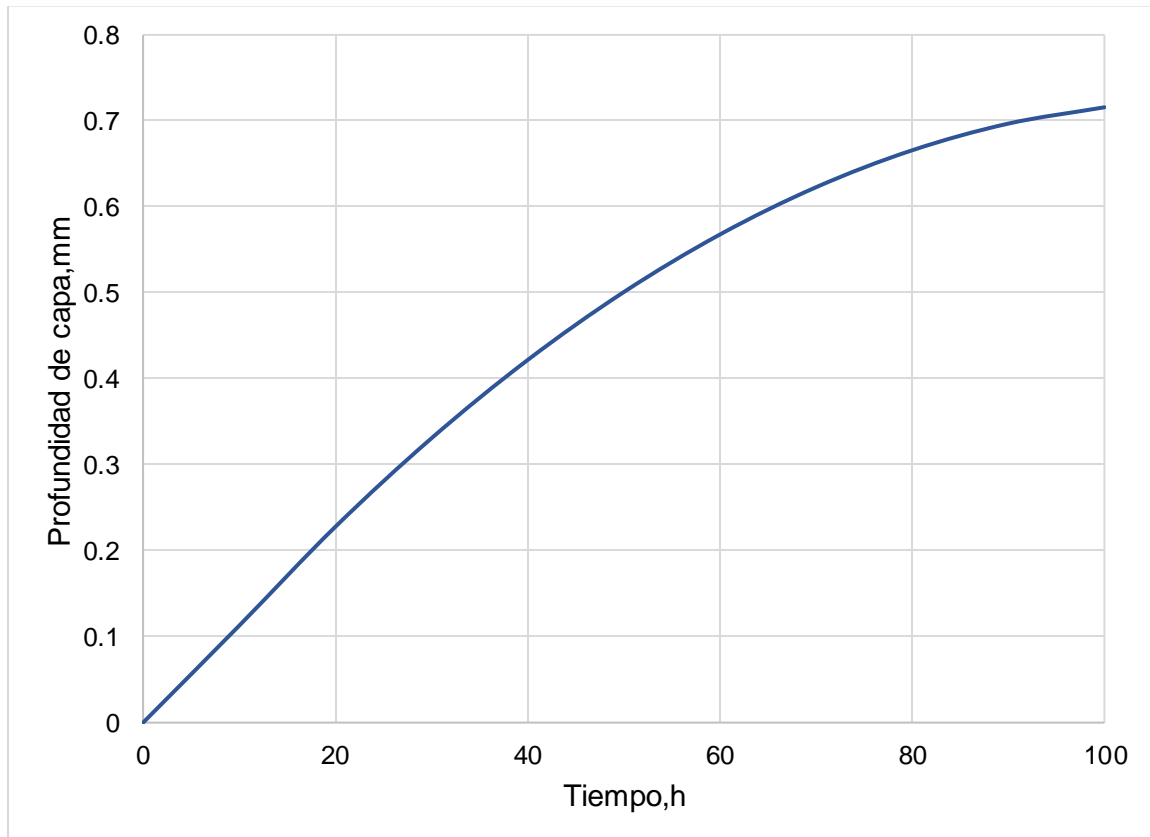


Fig. 1.3. Influencia del tiempo en el espesor de la capa nitrurada de aceros a 500 °C [1].

### 1.3.2. ESTRUCTURA DE LA CAPA NITRURADA

En la sección transversal de un acero nitrurado a 600 °C (superior a lo normal), se observa que la capa periférica está constituida por las siguientes zonas: una clara exterior de nitruros  $Fe_2N$  y  $Fe_4N$ , otra de braunita oscura, otra de carácter laminar (ferrita o perlita según el contenido de C del acero) con pequeña cantidad de  $Fe_4N$  entre los espacios del  $Fe_\alpha$  y finalmente la capa interior con leve  $Fe_4N$  y agujas de  $Fe_4N$ , después del núcleo inalterado del acero (ver Fig. 1.4) [3].

Cuando la nitruración se realiza a temperaturas correctas, como son 570 °C para el caso de sales, o entre 500 y 570 °C si la nitruración se realiza con gases, la estructura de la capa nitrurada puede alcanzar las dos capas características, estas son:

- Zona de compuestos: verdadera superficie de resbalamiento antifricción con un espesor de capa variable de 5 a 15  $\mu\text{m}$  para sales y de 5 a 25  $\mu\text{m}$  para nitruración gaseosa, éstas con una dureza aproximada de 650 a 1000 HV. Está formada principalmente por nitruro  $\epsilon$   $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ , algo de  $\gamma'$ , leve porcentaje de  $\text{Fe}_\alpha$ . La observación al microscopio presenta un aspecto de capa blanca cuya principal característica es su elevada resistencia al desgaste y a la corrosión [3].
- Zona de difusión: Mientras la absorción de carbono (en el caso de sales), queda limitada a la "zona de compuestos", el nitrógeno se difunde desde la superficie hacia el núcleo del material; su profundidad depende del tiempo de nitruración, de la temperatura y de la clase de acero a tratar. La característica principal de la zona de difusión es la elevada resistencia a la fatiga que confiere a las piezas nitruradas, aumentando dicho valor en más de un 90%, lo que permite una mayor carga de trabajo especialmente en piezas que, por sus condiciones mecánicas, estén solicitadas a esfuerzos de flexión y torsión [3].

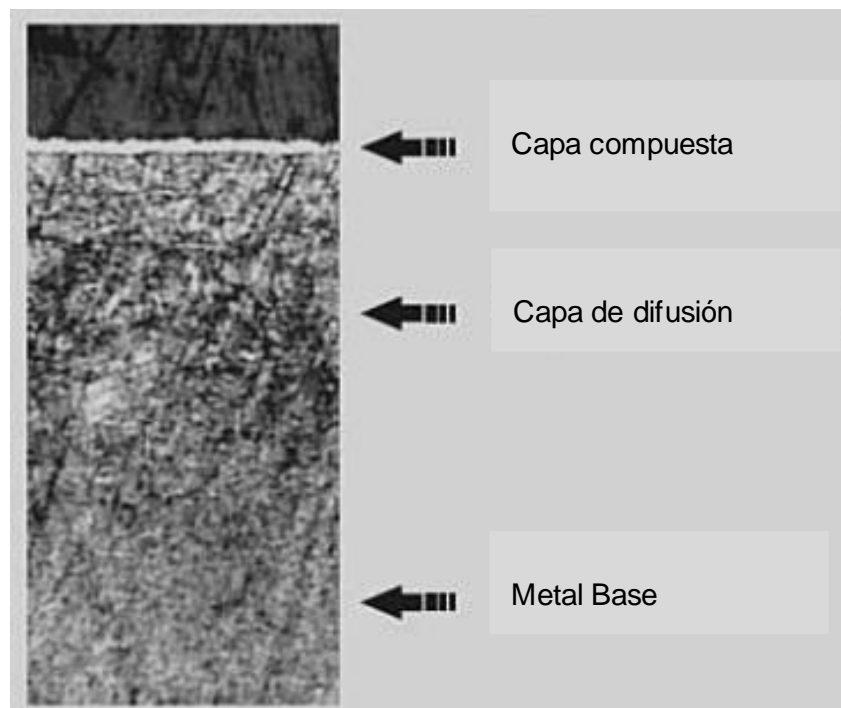


Fig. 1.4. Capa compuesta y de difusión obtenidas por nitruración.

#### 1.4. DIAGRAMA HIERRO-NITRÓGENO

En general, es muy difícil el estudio metalográfico de las piezas de aceros aleados nitrurados a temperatura corriente ( $\sim 500$  °C), por ser generalmente de tamaño submicroscópico los nitruros que se forman en el proceso. En el diagrama Fe-N se señalan los principales constituyentes que pueden aparecer, determinados en su mayor parte nitrurando los aceros a temperaturas mucho más elevadas de lo normal, ya que ello facilita su estudio [1].

En el diagrama Fe-N preparado inicialmente por **Fry** y corregido luego por **Eisenhut, Kaupp y Cohrer**, se señalan las zonas de equilibrio de los constituyentes formados por el hierro y el nitrógeno [1].

Al estudiar con ayuda del microscopio los aceros al carbono nitrurados a temperatura elevada (muy superior a las corrientes y recomendables), se observa la existencia de dos nitruros: uno  $\text{Fe}_2\text{N}$  (nitruro 1), que contiene un 11.3 % de nitrógeno, y otro  $\text{Fe}_4\text{N}$ , que contiene 5.8 % (nitruro 2). También se observa la presencia de un eutectoide con 2.35 % de nitrógeno, constituido por hierro alfa y nitruro 2 (fase  $\gamma$ ), al que se conoce con el nombre de braunita [1].

A temperaturas inferiores a la eutectoide (590 °C), el porcentaje de nitrógeno que puede formar solución sólida con el hierro alfa es muy pequeño, variando desde un 0.42 % a 590 °C hasta un 0.001 % a la temperatura ambiente. En cambio, a temperaturas más elevadas, el hierro disuelve mayores cantidades de nitrógeno y se forman otros constituyentes. Además de las fases  $\alpha$  y  $\gamma$  que se presentan normalmente en todos los aceros ordinarios, aquí aparece la fase  $\gamma'$  que se cristaliza en el sistema cúbico y es estable sólo en una zona muy estrecha de entre un 5.6 y un 5.9 % de nitrógeno, y la fase  $\epsilon$  que cristaliza en el sistema hexagonal y es estable para porcentajes de nitrógeno variables de entre 8 y 11.3 % [1].

**Fry** observó que nitrurando los aceros al carbono extradulces a temperaturas comprendidas entre 700 y 800 °C en una atmósfera de amoníaco, se obtenían capas relativamente duras, aunque tan frágiles que el proceso no tenía aplicaciones industriales, y comprobó también que la principal causa de esa gran fragilidad era la aparición del constituyente eutectoide braunita (N = 2.35 %) que se forma cuando la

nitruración se realiza a temperatura superior a 590 °C. En ese caso se llegan a alcanzar en el interior de las piezas de acero muy elevados porcentajes de nitrógeno, llegando a veces hasta un 6 o un 9 %. En una sección transversal de un hierro nitrurado a 600 °C (temperatura demasiado elevada), se observa que la capa periférica está constituida por los siguientes constituyentes: una zona exterior clara de nitruros  $\text{Fe}_2\text{N}$  y  $\text{Fe}_4\text{N}$ ; otra oscura de braunita eutectoide; otra de carácter ferrítico o perlítico según sea el contenido en carbono del material que se nitrura, con un pequeño porcentaje de nitruro  $\text{Fe}_4\text{N}$  en los espacios intercristalinos del hierro alfa, y finalmente, la capa interior inalterada. Además, aparecen más o menos marcadas otras fases de transición que se pueden determinar con ayuda del diagrama Fe - N. De la periferia al centro pueden aparecer las siguientes fases:  $\epsilon$ ,  $\epsilon + \gamma'$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma' + \alpha$  y  $\alpha$  [1].

En sus experiencias, **Fry** no consiguió resultados satisfactorios con los aceros al carbono, pues obtenía durezas relativamente bajas y las capas nitruradas tenían poca tenacidad. Más tarde, nitrurando aceros aleados alcanzó un gran éxito al descubrir la influencia decisiva del aluminio, cromo y molibdeno y al hallar ciertas composiciones con las que se obtienen capas nitruradas de extraordinaria dureza, bastante profundidad y buena tenacidad. Por lo tanto, siguiendo el diagrama Fe-N (ver Fig. 1.5) se pueden distinguir las fases siguientes [1]:

- La fase  $\alpha$ .- Ferrita nitrogenada con una red BCC, según el contenido de nitrógeno, de 0.28664 y 0.2877 nm. La solubilidad del nitrógeno en el hierro  $\alpha$  a la temperatura eutectoide no supera el 10 % descendiendo a la temperatura ambiente hasta el 0.004 %. La solubilidad de la fase  $\alpha$  en nitrógeno es baja a temperatura de nitruración y prácticamente nula a temperatura ambiente [1].
- La fase  $\gamma$ .- Austenita nitrogenada, tiene la red cúbica centrada en las caras ( $a = 0.3613$  para 1.45 % de N y  $a = 0.3648$  para el 2.79 % de N), la solubilidad máxima del nitrógeno en la fase  $\gamma$  es de 2.8 % a 560 °C. La fase  $\gamma$  sufre descomposición eutectoide  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$  [1].



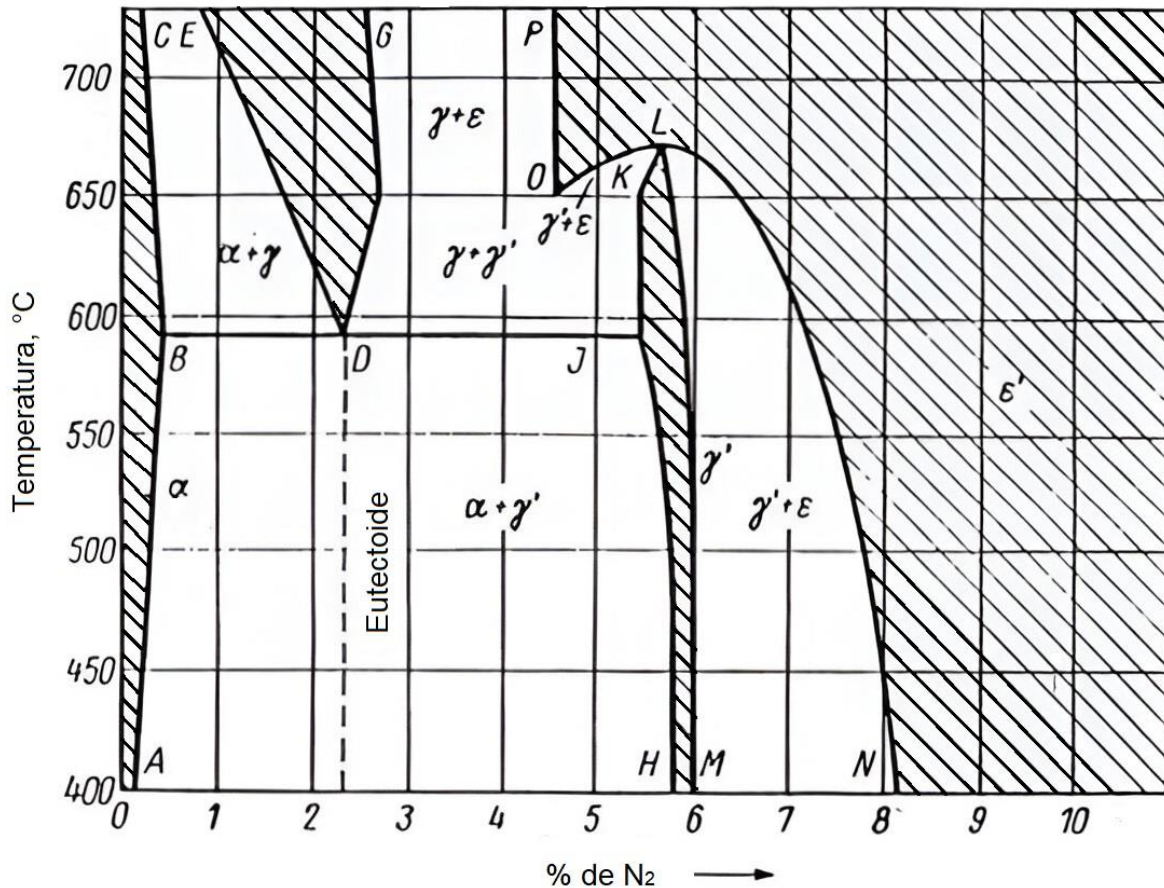


Fig. 1.5. Diagrama de fases de Fe-N [1].

- La fase  $\gamma'$ . Solución sólida a base de nitrógeno de hierro de Fe<sub>4</sub>N con la red FCC ( $a = 0.3791\text{-}0.3801$  nm) con una zona estrecha de homogeneidad de 5.3 y 5.75 % de N (según otros datos, un 5.77 a 6.88 % de N); la fase  $\gamma'$  es estable sólo hasta 680 °C. A temperaturas más altas se forma la fase  $\alpha$ . Su dureza es de 4 a 5 veces más alta que la del hierro puro ( $HV \approx 800$ ) [1].
- La fase  $\epsilon$ .- Solución sólida intersticial, la base de nitrógeno Fe<sub>2</sub>N y Fe<sub>3</sub>N (4.5-11 % de N), la red cristalina es hexagonal ( $a = 0.270\text{-}0.2764$  nm,  $c = 0.433\text{-}0.441$  nm, dependiendo del contenido en nitrógeno). A 650 °C y con una concentración de nitrógeno de 4.5 % la fase  $\epsilon$  sufre la descomposición eutectoide en las fases  $\gamma$  y  $\gamma'$  [1].

## 1.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS A NITRURAR

Normalmente se emplean aceros entre 0.2 y 0.60 % de C, aleados con Al, Cr, Mo y V. El contenido de C no influye en la dureza y levemente en la profundidad de capa nitrurada, disminuyendo esta con él % de C [3].

El Al es el elemento más importante para lograr las máximas durezas, aunque debe ir siempre acompañado de otros aleantes para evitar capas nitruradas muy frágiles. El Mo aumenta la dureza de la capa, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad de los aceros, cuando permanecen mucho tiempo a temperaturas próximas a 500 °C. El Cr y el V aumentan la profundidad de la capa dura [3].

Entre los grupos de aceros para nitruración más utilizados para dicho proceso son:

- 1) Aceros cromo-aluminio-molibdeno, con 0.80 a 1.20 % de Al, 0.9 a 1.60 % de Cr y 0.20 % de Mo, que se emplean en los casos en que interesa la máxima dureza superficial, que suele oscilar entre 1,000 y 1,100 HV. Estos aceros fueron los que más se utilizaron en los primeros tiempos cuando interesaba principalmente obtener durezas muy elevadas con gran resistencia al desgaste [1].
- 2) Aceros altos en cromo con molibdeno y vanadio. Aunque con estos aceros sólo se consiguen durezas superficiales comprendidas entre 800 y 850 HV, esas durezas son todavía extraordinarias y las capas nitruradas son mucho más tenaces que las de los aceros con aluminio. El contenido de cromo es de 3%; el de molibdeno de 0.40 a 1 % y el de vanadio de 0 a 0.25%. Ese elevado porcentaje de cromo aumenta ligeramente la profundidad de la capa nitrurada. Estos aceros se emplean cuando interesa durezas muy elevadas, similares a la cementita, aunque conviene también que la capa nitrurada sea tenaz y esté bien adherida [1].
- 3) Aceros cromo-molibdeno-vanadio. Se obtiene durezas superficiales de 750 HV. El contenido de cromo es de 2%; el de molibdeno de 0.25% y el del vanadio de 0.15%. En estos aceros la dureza superficial es algo menos que la de los aceros anteriores, aunque la tenacidad de la capa nitrurada es mayor que en los casos anteriores [1].

4) Aceros cromo-molibdeno, que son de menor dureza superficial (650 HV), y tienen la capa nitrurada más tenaz que los anteriores. Su contenido en cromo es de 1% y en molibdeno de 1.20% [1].

En la Tabla 1.1 se presenta de manera resumida los valores de durezas Vickers para diferentes composiciones de aceros para nitrurar.

Tabla 1.1. Composiciones y características mecánicas de diversos aceros para nitruración [1].

Tipos de aceros	Composición, % en peso								Periferia	Núcleo
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Mo	V	Dureza Vickers	Templado y revenido a 650 °C, R <sub>máx</sub> , kg/mm <sup>2</sup>
Cr-Al-Mo	0.50	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	126
	0.40	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	98
	0.30	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	91
	0.25	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	76
Alto Cr con Mo-V	0.40	0.30	0.50	0.30	3.00	-	1.00	0.25	850	133
	0.30	0.30	0.45	0.50	3.00	-	0.40	-	850	100
	0.25	0.30	0.45	0.50	3.00	-	0.40	-	850	79
Cr-Mo-V	0.35	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	98
	0.25	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	94
	0.22	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	83
Cr-Mo	0.30	0.30	0.60	0.60	1.00	-	0.20	-	650	92

## 1.6. NITRURACIÓN DE ACEROS Y FUNDICIÓN

La nitruración se usa ampliamente para endurecer los aceros de herramientas, de envejecimiento martensíticos, resistentes al calor y a la corrosión. Y entre los aceros para nitrurar se tiene [4]:

a) Nitruración de los aceros de construcción de baja aleación.-

Para las, piezas que trabajan al desgaste con cargas de contacto moderadas se emplean los aceros al carbono, endurecibles en regímenes de nitruración a corto plazo (520 a 570 °C, la exposición es de 1 a 6 h). En este caso, a pesar del pequeño aumento de la dureza, se asegura el mejoramiento de las propiedades de antifricción y la elevación de la resistencia a las cargas alternativas y a la corrosión [4].

Para las piezas cuya fiabilidad de explotación se determina por la dureza superficial y la resistencia al desgaste, se emplea el acero aleado con aluminio E71400, que asegura, después de la nitruración a 500 a 520 °C, la máxima dureza en la superficie de la capa nitrurada (hasta 1100 a 1200 HV) [4].

Este acero se usa ampliamente para la fabricación de ruedas dentadas, camisas de cilindros, tornillos sin fin, etc [4].

Al incrementar la temperatura de saturación, la dureza disminuye (ver Fig. 1.6 a). Cuanto más baja es la temperatura, tanto más se reduce la dureza en el espesor de la capa nitrurada (ver Fig. 1.7). Por eso para obtener un espesor eficaz prefijado de la capa (hasta 500 HV) a bajas temperaturas se requiere un tiempo prolongado (ver Fig. 1.6 b), de 24 a 90 h [4].

La capa difusiva del acero del tipo E71400 nitrurada a temperaturas inferiores a la eutectoide, está constituida por una zona muy fina de fase  $\gamma'$ , seguida de la zona de fase  $\gamma'$  y de la subcapa difusiva, formada por las fases  $\alpha$  y  $\gamma'$ . Está establecido que en condiciones ordinarias de nitruración del acero E71400 el nitruro de aluminio AlN con red hexagonal no se forma y la dureza de la zona difusiva (zona de nitruración interna) está condicionada tan sólo por la formación de los nitruros CrN y Mo<sub>2</sub>N. Aunque el aluminio eleva bruscamente la dureza de la zona superficial, observándose con ello la máxima dureza a cierta profundidad en la zona de fase  $\gamma'$  (ver Fig. 1.7) y no en la superficie [4].

La alta dureza de la superficie se debe a la redistribución del aluminio en las capas superficiales en el proceso de nitruración y formación de la fase  $\gamma'$  aleada con aluminio. La fase  $\gamma'$  se extiende en el interior por las fronteras intergranulares (bloques) y por los planos de deslizamiento, y la capa difusiva con frecuencia se hace más frágil [4].

El acero E71400 tiende a la descarburación. La presencia de una capa descarburada en una pieza nitrurada es inadmisibles por ser la causa del descascarado de la capa [4].

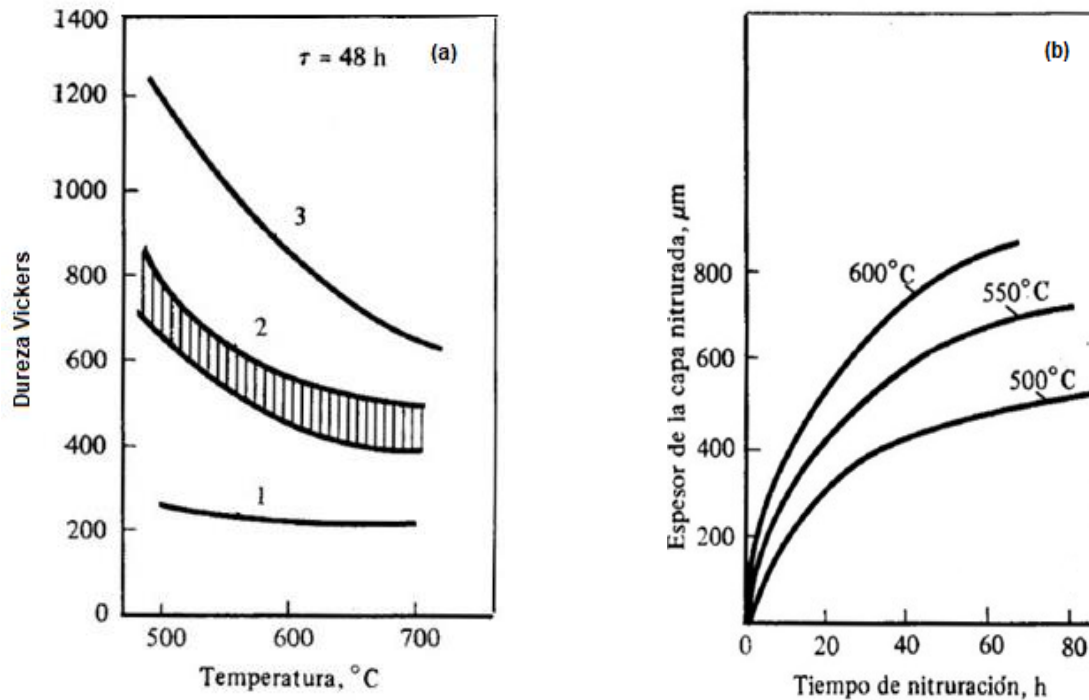


Fig. 1.6. Variación en las propiedades superficiales de aceros nitrurados: a) Influencia de la temperatura de nitruración en la dureza de capa; b) Influencia del tiempo de nitruración en el espesor de capa. 1. Aceros al carbono, 2. Aceros aleados, y 3. Acero E71400 [4].

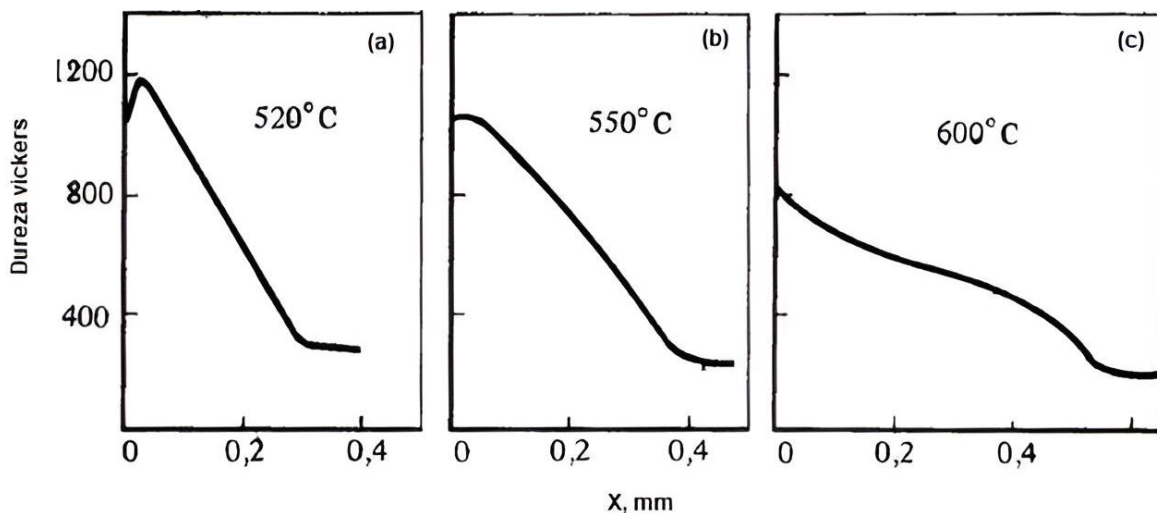


Fig. 1.7. Variación de la dureza en el espesor de la capa nitrurada durante 24 h del acero E71400: a) 520 °C; b) 550 °C; y c) 600 °C [4].

La fragilidad de la capa difusiva se observa también en los aceros que contienen aluminio en el límite superior. Si se produce un sobre calentamiento en el proceso de calentamiento para el temple, durante el rectificado se observa el desmenuzamiento puntual de la capa nitrurada (erupción) a una profundidad de hasta 0.05 mm. El

desmenuzamiento tiene lugar, principalmente, a lo largo de la red nitrurada basta que surge en el acero de grano grueso. El descenso de la temperatura de temple de 950 a 900 °C reduce la predisposición a la erupción, al agrietamiento debido al rectificado y al cizallamiento de la capa. Cuanto menor es la dureza y el contenido de nitrógeno en la capa difusiva, más alta es la resistencia a la fractura frágil. En los últimos años el acero E71400 encuentra aplicación limitada [4].

La tendencia a la obtención de una alta dureza superficial del acero E71400 mediante la introducción de aluminio, es injustificada. La dureza, como se citó con antelación, no sirve de criterio para valorar la propiedad fundamental del acero nitrurado, que es la resistencia al desgaste. La aplicación del acero E71400 para la nitruración no puede ser recomendada en la mayoría de los casos debido a la elevada fragilidad de la capa y a las dificultades del tratamiento térmico y de la producción metalúrgica [4].

Últimamente se someten a la nitruración los aceros al cromo, al cromo-vanadio, al cromo-manganeso y otros sin aluminio, cuya capa nitrurada tiene una alta resistencia al desgaste y a la fractura frágil, aunque una baja dureza superficial [4].

La reducción de la fragilidad de la capa nitrurada permite aplicar la nitruración en la fabricación de piezas con cantos y escotes agudos, y también piezas no rectificables. Así, por ejemplo, en la fabricación de maquinaria para los husillos de apoyos oscilantes y tornillos de avance se utilizan los aceros SAE 5140 y 4140, para las camisas, listones guías sobre juntas y tornillos de avance se emplean los aceros SAE 4120 y 4131 H [4].

Para los elementos de máquina sometidos a grandes cargas, que trabajan en condiciones de esfuerzos cíclicos de flexión y de contacto, así como de desgaste, se usan los aceros SAE 4120, 4131, etc [4].

Cuanto más elementos formadores de nitruros contiene el acero, más alta es la dureza superficial de la capa nitrurada. En la Fig. 1.6 se presenta la influencia de la temperatura y el tiempo de nitruración en la dureza y el espesor de la capa nitrurada de los aceros de construcción, la distribución de la dureza en el espesor de la capa nitrurada [4].

Con el fin de acortar la duración del proceso en los últimos años fueron propuestos aceros, los cuales después de la nitruración a temperaturas elevadas (550 a 600 °C) aseguran una alta dureza en el espesor de la capa [4].

En la URSS han sido elaborados aceros de aleación complicada que contienen 0.5% de Al. En estos aceros la fase  $\gamma'$  aleada con aluminio no se forma y no se observa un aumento de su dureza merced a la introducción del aluminio. El vanadio, que eleva la concentración del nitrógeno en la fase  $\gamma'$  y forma nitruros, ejerce la principal influencia en el aumento de la dureza y de la resistencia al desgaste. La nitruración de estos aceros se puede realizar a 550 a 600 °C, lo cual asegura el acortamiento de la duración del proceso, manteniéndose una alta dureza superficial (850 a 900 HV) y alta resistencia al desgaste. El niobio y circonio retrasan el desarrollo de la zona de nitruros, afinan el grano, reducen la fragilidad de la capa nitrurada y elevan su dureza [4].

El elemento de aleación de mayor perspectiva para la formación de aceros para nitrurar, es el vanadio, el cual a la par con el cromo asegura buenas calidades mecánicas del acero y permite obtener en un tiempo relativamente corto (a temperaturas elevadas de saturación) un espesor eficaz de la capa requerido, que es la zona de nitruración interna [4].

#### b) Nitruración de los aceros martensíticos de envejecimiento.-

La nitruración eleva la resistencia al desgaste y a las cargas alternativas de los aceros martensíticos de envejecimiento. Los aceros martensíticos de envejecimiento que se someten a la nitruración se pueden dividir en tres grupos: aceros de gran resistencia ( $\sigma_f = 1800$  a  $2100$  MPa); aceros de alta resistencia a la corrosión; aceros de baja aleación ( $\sigma_f = 1000$  a  $1500$  MPa) [4].

La capa difusiva está constituida por la zona superficial de las fases  $\epsilon$  y  $\gamma'$  y por la capa, situada por debajo, de martensita nitrurada con separaciones de fase  $\gamma'$  en exceso. Los regímenes óptimos de nitruración son los siguientes: 500 °C, 24 h o 450 °C, 48 h. La nitruración eleva la resistencia al desgaste y a la formación de rayaduras en condiciones de rozamiento de rodadura y de resbalamiento, sin cambiar prácticamente la resistencia mecánica. La nitruración eleva también el límite de fatiga [4].

Cuanto más cromo exista en el acero, más alta es la dureza. Con el aumento de la temperatura y duración de la nitruración, a medida que disminuye el contenido de cromo el espesor de la capa crece, a la vez que la fragilidad disminuye. Los aceros que contienen aluminio después de nitrurados tienen una dureza superficial más alta [4].

La nitruración reduce la resiliencia del acero y desplaza el umbral de fragilidad en frío a la región de temperaturas superiores, aunque eleva considerablemente la resistencia de contacto al desgaste [4].

La singularidad del endurecimiento por dispersión de los aceros de envejecimiento martensíticos consiste en la reducción de las dimensiones geométricas de las piezas en el proceso de envejecimiento. La contracción volumétrica ocurre de modo uniforme en toda la sección transversal y no va acompañada de alabeos y agrietamientos [4].

Cuando la nitruración se combina con el envejecimiento a 420 a 480 °C durante 3 a 36 h, la contracción lineal constituye por término medio 0,9 a 1,2  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , mientras que el incremento de las dimensiones debido a la nitruración es de 2 a 4  $\mu\text{m}$ . Dado que la contracción lineal en el proceso de envejecimiento y de incremento depende poco durante la nitruración de los regímenes de tratamiento, entonces, al fabricar las piezas de precisión, se puede prever de antemano el sobre espesor tecnológico correspondiente [4].

c) Nitruración de los aceros resistentes a la corrosión y termorresistentes.-

Para aumentar la dureza, la resistencia al desgaste y a la erosión los aceros tipos ferrítico martensítico y austenítico se someten a la nitruración. Donde más ampliamente se emplea la nitruración de estos aceros es en la construcción de máquinas energéticas [4].

Los aceros con alto contenido de cromo se deben someter a un tratamiento especial para eliminar la película de óxidos, que obstaculiza la saturación con nitrógeno. La película de óxidos se elimina mediante el decapado ácido del acero, limpiando con chorro de arena y agua o des pasivando en el proceso de nitruración. Los aceros altos en cromo después de nitrurados tienen en la superficie una dureza (1000 HV) que decrece poco respecto al espesor de la capa nitrurada [4].

Los aceros que a la temperatura de nitruración tienen red cúbica centrada en las caras (fase  $\gamma$ ), se nitruran peor que los aceros con red cúbica centrada en el cuerpo (fase  $\alpha$ ). Con el aumento del grado de aleación del acero la profundidad de la capa se reduce. Para elevar la resistencia al desgaste los aceros ricos en cromo ferríticos y austeníticos se suelen nitrurar a 560 a 600 °C. La dureza de la capa nitrurada obtenida en los aceros austeníticos constituye 1000 HV [4].



La dureza respecto al espesor de la capa nitrurada de los aceros austeníticos es casi constante, disminuyendo bruscamente al pasar al núcleo. La disminución del contenido de carbono en los aceros ferríticos y austeníticos aumenta el espesor y disminuye la fragilidad de la capa nitrurada [4].

El aumento de la fragilidad de la capa, abultamiento y descamación en toda la superficie son los defectos frecuentes que acompañan la nitruración de los aceros de alta aleación ferríticos y austeníticos [4].

La descamación se suele observar, cuando el grano es menor que un tamaño ASTM 5 (55.2  $\mu\text{m}$ ). Para evitar el desmenuzamiento de la capa, el grano debe tener un tamaño ASTM de 7 (27.6  $\mu\text{m}$ ) a 12 (4.88  $\mu\text{m}$ ).

El enfriamiento de algunos aceros austeníticos, por ejemplo, altos en manganeso, no se debe efectuar en una atmósfera de amoníaco a la temperatura inferior a la de nitruración, ya que esto aumenta la fragilidad de la capa. Buenos resultados se han obtenido al enfriar en un medio de amoníaco totalmente dissociado, en argón y en otros medios reductores o neutros [4].

La nitruración eleva la resistencia al desgaste y reduce el coeficiente de rozamiento de los aceros ferríticos y austeníticos a la temperatura ambiente y a las elevadas [4].

La resistencia a la corrosión de la capa superficial de los aceros ferríticos y austeníticos se reduce debido a la nitruración. En condiciones óptimas de nitruración en los aceros martensítico y ferrítico la zona poco resistente a la corrosión ocupa un 50 a 80% del espesor total de la capa, mientras que, en los aceros austeníticos, un 20 a 30% de este espesor [4].

Para prevenir la corrosión en el agua las piezas hechas de aceros nitrurados resistentes a la corrosión es suficiente hervirlas en una solución de bicromato de potasio al 10 % durante 1 h y tratarlas después en una solución de líquido orgánico silícico de hidrofobización GKZh-94 al 10 % en bencina. La nitruración eleva la resistencia de los aceros austeníticos a la cavitación [4].

La nitruración de los aceros austeníticos a 560 a 580 °C no permite obtener una capa de un espesor de no más de 0.42 a 0.5 mm [4].

Con el aumento de la temperatura el espesor total de la capa nitrurada crece continuamente, aunque el espesor de la zona rica en nitrógeno disminuye sensiblemente en la capa al incrementar la temperatura por encima de 700 a 800 °C. La dureza de la capa nitrurada disminuye al incrementar la temperatura de saturación, lo cual está ligado con la formación de las partículas de nitruros y con la pérdida de la coherencia [4].

La mayor reducción de la dureza con el aumento de la temperatura de nitruración se observa en los aceros ferríticos. Sin embargo, la nitruración a alta temperatura encuentra aplicación en la industria [4].

#### d) Nitruración de los aceros de herramientas.-

La nitruración a corto plazo de la herramienta (brocas, machos, recuperadores, etc.) hecha de acero rápido, aumenta de 1.5 a 2 veces la durabilidad del útil [4].

La óptima combinación de las características mecánicas, resistencia al desgaste y al calor para la herramienta hecha de acero rápido, se consigue con un espesor de la capa nitrurada igual a 0.01 a 0.025 mm. Por eso se recomienda nitrurar la herramienta de acero rápido durante un intervalo corto de tiempo a 560 a 580 °C, en una atmósfera de amoníaco con 30%. La duración del proceso para obtener una capa de un espesor de 0.01 a 0.025 mm para una herramienta menuda (de un diámetro menor de 15 mm) es de 15 a 20 min; para una capa más gruesa (16 a 30 mm), 25 a 30 min y para una de gran tamaño, 60 min [4].

Después de la nitruración en los regímenes indicados, se forma una capa nitrurada de 1340 a 1460 HV de dureza y de alta estabilidad térmica (la dureza de 700 HV se conserva hasta 700 °C). La dureza de la capa nitrurada será tanto mayor, cuanto más esté aleada la solución sólida [4].

Los mejores resultados se consiguen al realiza la nitruración en una atmósfera de amoníaco, diluido con los productos de su disociación preliminar. La disminución del potencial de nitrógeno de la atmósfera, debida a la dilución del amoníaco con una mezcla de nitrógeno e hidrógeno, excluye la formación en la superficie de una película de la fase frágil de nitruros ( $Fe_2-3N$ ) y, con cierta reducción de la dureza hasta 1100 a 1200 HV, asegura una elevación considerable (de 2 a 4 veces) de la capacidad de trabajo de la herramienta cortante [4].

Nitruran bien los aceros ricos en carbono que contienen el 12 % de Cr. El proceso se lleva a cabo durante 8 a 12 h entre 560 a 580 °C. El espesor de la capa es de 0.08 a 0.42 mm y la dureza, de 1100 a 1200 HV. La capa tiene una resistencia al calor de hasta 650 a 660 °C. El tratamiento térmico previo para conservar la alta tenacidad comprende el temple a partir de una temperatura reducida, de 980 a 1000 °C, y el revenido a 530 a 540 °C [4].

En los aceros para matrices, que tienen alta ductilidad, el espesor de la capa nitrurada puede ser de 0.2 a 0.25 mm. Para obtener una capa semejante en los aceros. Al cromo-wolframio se nitrura a 530 a 540 °C durante 12 a 16 h o en dos ciclos, o sea, durante 6 a 8 h entre 520 a 540 °C y durante 4 a 6 h entre 550 a 560 °C. La dureza de la capa nitrurada es de 1100 a 1240 HV. La capa tiene alta estabilidad térmica (hasta 670 a 680 °C) [4].

Las estampas nitruradas tienen una mejor combinación de resistencia mecánica, ductilidad y resistencia térmica a la fatiga después de templadas a baja temperatura de 1,000 a 1,050 °C y revenidas a 560 a 580 °C. Después del temple a partir de 1,100 a 1,120 °C y el revenido a 560 a 580 °C la dureza y resistencia a la fractura se elevan, mientras que la tenacidad se reduce [4].

La nitruración eleva en 4 a 5 veces la estabilidad de los moldes para colada a presión contra la disolución en las aleaciones de aluminio líquidas.

En ciertos casos, por ejemplo, para troqueles y moldes, sometidos a altas cargas y no sujetos al rectificado, se aplica la nitruración antes del temple [4].

e) Nitruración de la fundición.-

La nitruración se utiliza ampliamente para el endurecimiento superficial del hierro colado al magnesio de alta resistencia [4].

La máxima dureza superficial del hierro colado al magnesio nitrurado se consigue, en comparación con el acero, a temperaturas de nitruración superiores (650 a 700 °C). La duración del proceso influye de modo esencial en la dureza. Para obtener la máxima dureza (de 500 a 600 HV) la duración de la exposición debe ser de no menos de 12 a 24 h. La capa no es frágil [4].

La capa nitrurada en el hierro colado al magnesio tiene una dureza alta, aunque irregular. La dispersión de la dureza, característica para las fundiciones con estructura

perlítica y ferrito-perlítica, disminuye con el aumento del tiempo que dura la nitruración [4].

Para asegurar una dureza uniforme y alta después de la nitruración se recomienda someter el hierro colado al magnesio con estructura perlítica y ferrito-perlítica al recocido a 720 a 740 °C durante 1 a 15 h. El Mn, Si, Mg, Ge, Cr, Mo, W, Ni aumentan la dureza de la capa nitrurada en la fundición y disminuyen su espesor. El aluminio eleva la dureza sin hacer disminuir el espesor de la capa nitrurada [4].

La Tabla 1.2, representa los porcentajes en composición de las fundiciones más recomendables para nitruración.

Tabla 1.2. Composición de las fundiciones recomendadas para nitrurar [4].

Tipos de fundición	Composición, % en peso										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg	Ni	Mo	Ge	Cu
Ni-Mo	3.53 a 3.57	2.02 a 2.20	0.07 a 0.90	0.05 a 0.6	0.015 a 0.016	0.06 a 0.09	0.06 a 0.09	0.90 a 1.70	0.4 a 0.55	0.006	--
Cr-Ni-Mo	3.4 a 3.8	2.4 a 2.8	0.8 a 1.0	hasta 0.1	hasta 0.03	0.35 a 0.5	0.04 a 0.08	1.2 a 1.5	0.6 a 0.9	--	0.3 a 0.4

La particularidad característica de la capa nitrurada de estas fundiciones es la obtención de la zona de alta dureza con una extensión considerable.

La fundición de alta resistencia nitrurada tiene una resistencia al desgaste elevada en condiciones de rozamiento de deslizamiento seco. La máxima resistencia al desgaste del par segmento (émbolo) casquillo, en condiciones de engrase limitado, la tiene la fundición nitrurada. El menor desgaste del casquillo nitrurado de fundición de alta resistencia se ha registrado al trabajar en par con la fundición gris fosfatada y la fundición de aleación, el cromo galvánico y la pseudo aleación acero-aluminio [4].

La resistencia al desgaste de los árboles acodados nitrurados de los Diesel fabricados con fundición de alta resistencia y de los casquillos que trabajan en par con éstos, es 2.5 a 5 veces superior en comparación con el árbol no nitrurado [4].

La nitruración eleva el límite de fatiga de la fundición de alta resistencia nitrurada en estado fundido en un 25 % y después del normalizado y revenido, en un 50%. La fundición al magnesio nitrurada es resistente a la corrosión en agua dulce [4].

## 1.7. PROCESO DE NITRURACIÓN

Para conocer los hornos de nitruración se necesita comprender las formas en que se realiza este proceso termoquímico, teniendo en consideración los procedimientos siguientes [5]:

- a) Nitruración gaseosa. Este proceso se realizará en hornos de atmósfera controlada en los que la pieza se lleva a temperaturas entre 500 y 575 °C en presencia de amoníaco disociado [5].
- b) Nitruración en baño de sales. La nitruración en baño de sales se realiza a la misma temperatura que la nitruración gaseosa, entre 500 y 575 °C. Para ello se introduce la pieza en un baño de sales fundidas compuesto por cianuros (CN) y cianatos (CON) en estado fundido. Durante este tratamiento, el material absorbe C y N del baño. Dadas las bajas temperaturas a las que se opera, la carburación es muy baja, dando paso a la nitruración. Así, se forma una capa cuya composición química es de un 25 % de carburos y de un 75 % de nitruros de hierro [5].

En los baños de sales se pueden nitrurar también aceros no aleados, mientras que la nitruración con gas exige incondicionalmente el empleo de aceros de nitruración. En los aceros no aleados o de baja aleación no se produce un aumento notable de la dureza luego de la nitruración, por lo que se ha conocido este proceso con el nombre de "nitruración blanda" [5].

- c) Nitruración sólida. En la nitruración sólida las piezas se colocan cubiertas por una pasta de sustancia nitrurante que se eleva a una temperatura entre 520 y 570 °C durante 12 h [5].
- d) Nitruración iónica o por plasma. Es un tipo de nitruración gaseosa dirigida a aumentar la velocidad de difusión del nitrógeno y reducir el tiempo de tratamiento. Se realiza dentro de un reactor donde se ha hecho vacío antes de introducir los gases de nitruración. Se establece un circuito eléctrico en el que la pieza a nitrurar es el ánodo, por efecto del calor, el nitrógeno molecular se descompone e ioniza. Con ello se produce la difusión del nitrógeno por la superficie y la consiguiente formación de nitruros. Otros gases presentes y que actúan como soporte son el gas carburante, argón, entre otros [5].

La nitruración por plasma o nitruración iónica se presenta como un proceso alternativo a los métodos tradicionales en atmósfera gaseosa o en baño de sales fundidas, y tiene como ventaja principal una reducción en el tiempo de proceso y energía consumida y un mejor control de la microestructura de la capa nitrurada, manejando los parámetros de la descarga eléctrica [5].

### **1.7.1. TIPOS DE HORNO**

Habiendo un gran avance de las tecnologías, para la modificación de las propiedades tribológicas superficiales como son los tratamientos termoquímicos, en este caso de estudio que es el proceso de nitruración, obliga a profundizar en los distintos tipos de procesos para nitrurar, esto con el objetivo de conocer los distintos tipos de hornos para realizar el proceso termoquímico de nitruración sobre la base del tipo que se llevará a cabo.

Una de las técnicas de mayor uso es la nitruración iónica debido a sus ventajas y resultados con respecto a otros tratamientos termoquímicos como lo son la nitruración gaseosa, que será el caso particular de estudio.

Sobre la base de los modelos existentes en el mercado, y diseños de algún tipo de horno destinado para tipos de nitruración ya establecidos por los fabricantes, se hará un pequeño repaso sobre los hornos más comunes en el mercado en la actualidad, así como la clasificación de los hornos según el tipo de nitruración o propiedades buscadas al terminar el proceso.

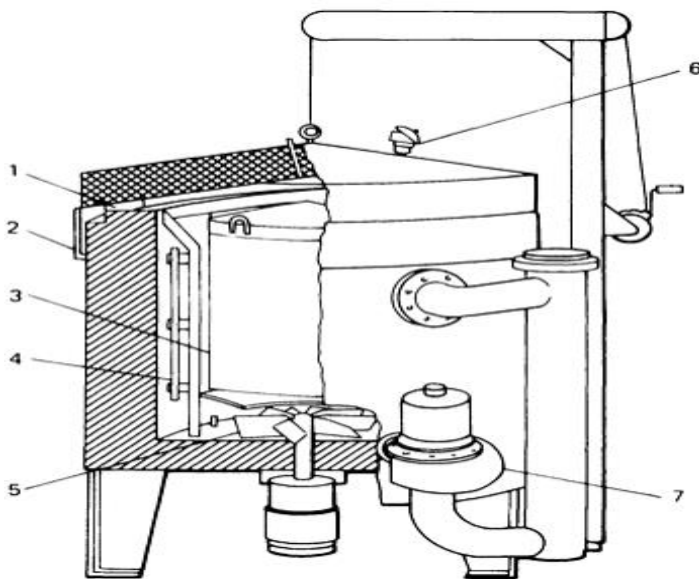
Haciendo énfasis en las características físicas del horno, así como sus características de diseño considerando para el objeto que han sido fabricados, tomando como referencia algunos modelos de la marca BARFIELD, y de diseño general en los párrafos siguientes:

#### **A) Horno de retorta vertical de nitruración.-**

Este tipo de horno es estacionario; las piezas a ser tratadas se cargan en una canasta que se baja dentro de la cámara de calentamiento. La tapa se sella con una

junta de amianto y se sumerge en una cubeta llena de aceite. La atmósfera entra por la parte superior y sale por la parte inferior del horno. La refrigeración se logra con un ventilador y abriendo una válvula de una camisa colectora de agua (ver Fig. 1.8) [3].

Hornos de diseño similar, aunque sin la camisa de agua, se utilizan cuando no se requiere un enfriamiento rápido; la calidad de nitruración lograda es equivalente a la de los hornos de tubo colector [3].



- 1) Junta,
- 2) Sello de aceite,
- 3) Canasta de trabajo,
- 4) Elementos de calentamiento,
- 5) Ventilador circulante,
- 6) Termocupla, y
- 7) Montaje de enfriamiento.

Fig. 1.8. Horno de retorta vertical [3].

La nitruración también ha sido satisfactoria en retortas verticales sin ventiladores. Flujos y presiones apropiados en la línea de salida, son críticos para proveer el amoníaco suficiente. La no utilización del ventilador elimina un espacio común de fugas de gas y/o entrada de aire [3].

#### B) Horno de campana móvil.-

Tiene una base estacionaria y está equipado con entrada y salida de atmósfera, termocupla de control, ventilador circulante, y salidas para potencia eléctrica y controles. Las piezas a nitrurar se cargan en canastas, que se colocan sobre un soporte en la base del horno. Una retorta reducida en la base se sumerge en aceite, que hace de sello. El calentamiento es provisto por una campana calefactora que baja y descansa en la parte superior de la retorta. El calor pasa a través de las paredes de esta y se transfiere a la

carga por radiación y convección mientras la atmósfera circula. El enfriamiento se logra reemplazando la campana calefactora por una enfriadora que extrae el aire alrededor de las paredes de la retorta y lo saca por la parte superior de la campana. Este movimiento de aire se lleva a cabo por un ventilador en la parte superior (ver Fig. 1.9) [3].

Es usual proveer más bases que campanas de calentamiento y enfriamiento, lo que permite el uso más eficiente de las mismas. La campana de enfriamiento no es esencial si no se requiere enfriamiento rápido para aumentar la productividad de la base; la calidad de nitruración alcanzada es equivalente, aunque el calor irradiado por la retorta puede provocar discomfort a las personas que trabajan en el área cercana [3].

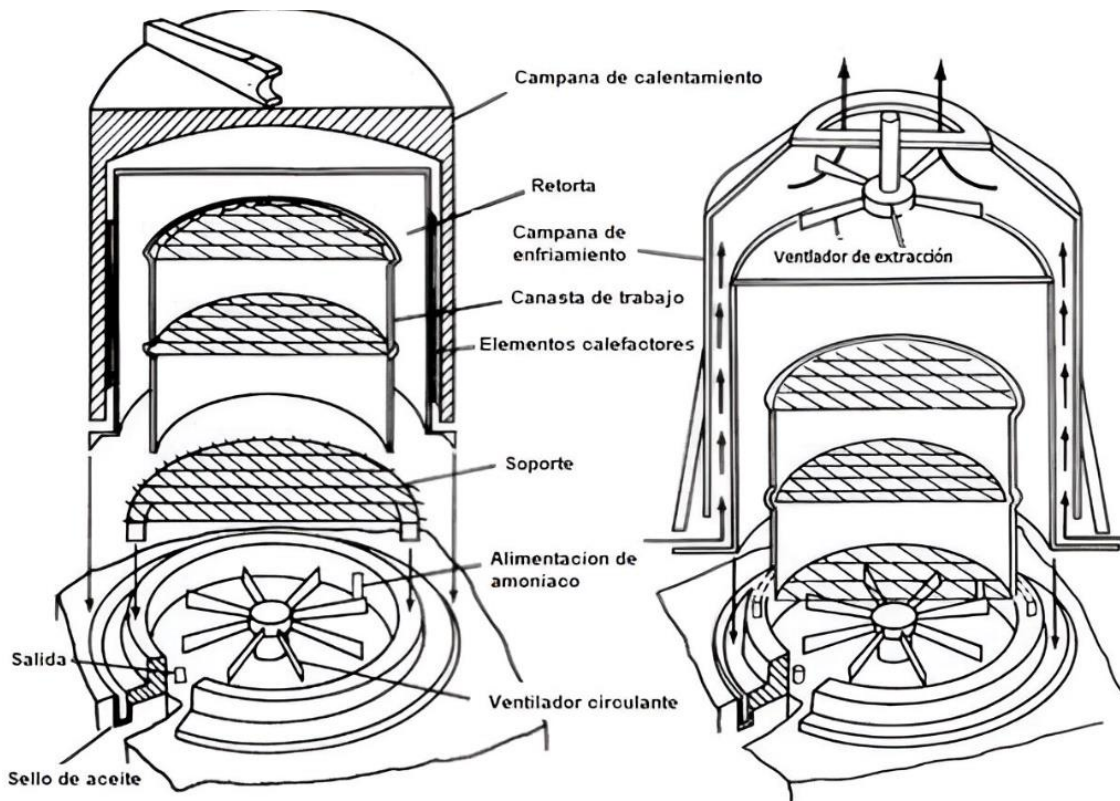


Fig. 1.9. Horno tipo campana móvil [3].

### C) Hornos de caja.-

Se utilizan hornos de nitruración del tipo de caja móvil con dos puestos estacionarios. Cada puesto está equipado con entrada y salida de atmósfera, termocupla de control, ventilador circulante y controles separados. Las piezas se cargan en canastas



que se ubican sobre pesadas placas metálicas en cada puesto. Se coloca una tapa sobre la carga, que se ubica en una ranura en la placa, llena de finos de mineral de cromo que actúan de sello. Se ajusta de modo seguro y luego el horno se coloca sobre la carga. El calor pasa a través de las paredes de la cubierta y se transfiere a la carga por radiación y convección por la atmósfera circulante. Cuando el horno se corre sobre la segunda placa, el enfriamiento de la primera se logra por transferencia al exterior o por circulación forzada de aire. Normalmente la circulación natural es suficientemente rápida para permitir el enfriamiento y la recarga, antes que el horno esté nuevamente disponible [3].

D) Horno Wild Barfield TRT.1010 y TRT.1020 con retorta de atmósfera de gas.-

Los modelos TRT.1010 y TRT.1020 de Wild Barfield es una máquina de circulación forzada con circulación de aire monofásica de 8 kW y 650 °C, estos modelos son ideales para una variedad de procesos térmicos en los que se incluye el proceso termoquímico de la nitruración [6].

Las construcciones conocidas de hornos de retorta presentan una cámara que separa el espacio de trabajo del entorno y garantizan alcanzar la pureza y la calidad requeridas de la atmósfera de trabajo. La mufla se realiza a partir de aleaciones refractarias o resistentes a la fluencia y permite temperaturas de trabajo de hasta 1,300 °C. Las retortas presentan un aislamiento térmico exterior y elementos calefactores en medio. Los elementos proporcionan energía térmica que se acumula mediante aislamiento y se dirige posteriormente a la retorta a través de la radiación y la convección natural. El calor se transfiere dentro de la retorta, desde sus paredes hasta la carga, como consecuencia de la radiación, la convección natural o convección forzada mediante mezcladores de la atmósfera (ver Fig. 1.10).

Habitualmente, los hornos presentan sistemas de refrigeración acelerada después del tratamiento térmico. Ello se alcanza utilizando sopladores que impulsan aire entre el aislamiento y la pared exterior de la retorta. El aire frío que circula alrededor de la retorta capta el calor y se calienta, a continuación, se escapa hacia el exterior a través de una compuerta superior abierta. Existen asimismo sistemas interiores de refrigeración que funcionan en un circuito cerrado. A continuación, la atmósfera se extrae directamente

desde el interior de la retorta, impulsada a través de un intercambiador térmico y, una vez enfriada, se devuelve a la retorta.



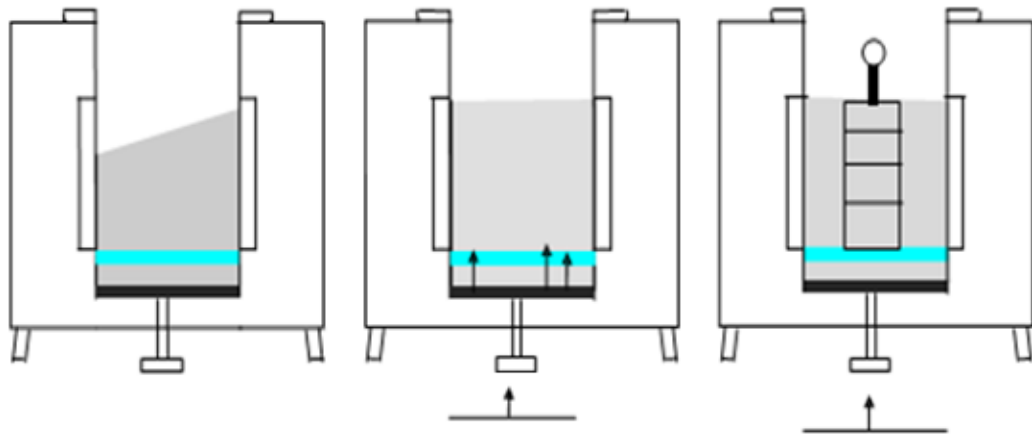
Fig. 1.10. Horno de nitruración gaseosa TRT.1010 [7].

Algunos datos y características del del horno, TRT.1010 se detallan a continuación:

- Fabricante: Wild Barfield,
- Medidas internas: 275 mm de diámetro y 300 mm de altura,
- Medidas externas: 750 x 1,100 x 1,620 mm, y
- Temperatura máxima: 650 °C.

#### E) Horno del lecho fluidizado.-

El lecho fluidizado es una masa de partículas de alúmina (similares a la arena) situadas en una retorta de acero de alta aleación las cuales “flotan” elevándose por efecto del flujo de gas o aire situado en la parte inferior de la retorta. Así, bajo esta condición las piezas situadas en la cesta son inmersas dentro del lecho fluidizado donde las partículas de alúmina se encuentran “flotando” (ver Fig. 1.11) [7].



Partículas de Alúmina en la retorta.

Mezcla de aire o gas, que provoca la fluidización.

La cesta con las piezas inmersas en el lecho fluidizado

Fig. 1.11. Esquema de horno Fluidizado [7].

La alta temperatura hace que el lecho fluidizado transfiera el calor muy velozmente. La velocidad de transferencia de calor es mucho más elevada que en los hornos al vacío y los de atmósfera controlada y ligeramente superior a los hornos de sales [7].

El tiempo de permanencia de las piezas tratadas es drásticamente menor en los hornos de lecho fluidizado en comparación con los hornos al vacío y los de atmósfera controlada, esto es debido a una mayor entalpía del lecho fluidizado (ver Fig. 1.12) [7].

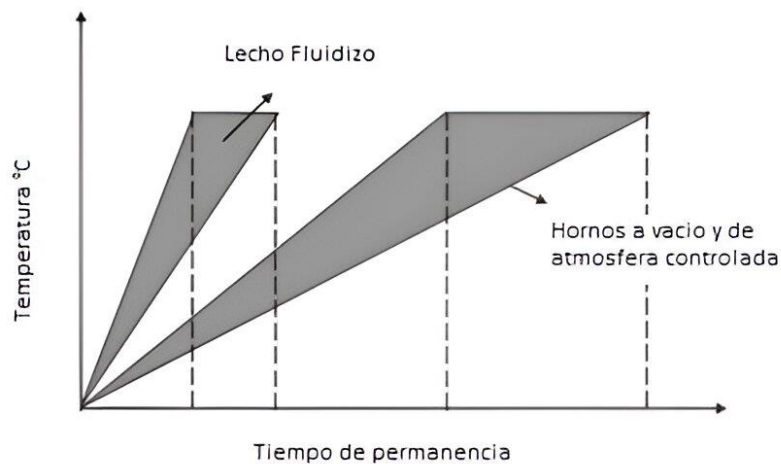


Fig. 1.12. Comparativa Hornos de nitruración [7].

Las propiedades inherentes de los hornos de lecho fluidizado son un muy alto grado de uniformidad térmica, ratios elevadas de transferencia de calor, atmósfera controlada que deriva en una gran flexibilidad del proceso además de su limpieza y naturaleza no contaminante. Aparte de estas propiedades se adicionan ventajas como mayor eficiencia energética, flexibilidad, alta calidad resultante del proceso, alta productividad, menor capital de mantenimiento y gastos operativos y gran facilidad operativa [7].

#### F) Horno de nitruración de baja presión.-

El procedimiento de nitruración de baja presión cubre el conjunto de aplicaciones clásicas en nitruración gaseosa. Es muy conveniente para el tratamiento de piezas de mecánica, tales como: herramientas de corte, herramientas de prensa o de extrusión, órganos de transmisión y de rozamiento [7].

Es un tratamiento a baja presión por vía gaseosa, realizado a baja presión. La atmósfera que se utiliza se compone de los siguientes gases: amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), protóxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ). El tratamiento se desarrolla a una presión reducida. El grupo de bombas de vacío mantiene la depresión, mientras que una inyección de la mezcla nitrurante está controlada mediante caudalímetros másicos. Las temperaturas de trabajo son las clásicas en nitruración, comprendidas entre 400 y 600 °C [7].

Se presenta a continuación la información pertinente del horno para nitruración de baja presión ALLNIT, detallándonos datos como la temperatura máxima de trabajo, sus dimensiones físicas, su peso, etc. (ver Fig. 1.13)

- Función: Nitruración a baja presión,
- Configuración: Retorta rotativa,
- Fuente de calor: Gas,
- Atmósfera: Vacío,
- Temperatura máxima: 900 °C,
- Dimensiones: 450 x 450 x 600 mm,
- Peso máximo: 2000 kg, y
- Empresa: ALLNIT, patentado por BMI.



Fig. 1.13. Horno de nitruración de baja presión BMI [7].

#### G) Horno para nitruración iónica.-

La nitruración iónica es un procedimiento plasma que permite proteger, es decir, salvaguardar una zona de la pieza que no se desea nitrurar (sencillas placas metálicas bastan para proteger la pieza) [7].

Es un tipo de nitruración gaseosa dirigida a aumentar la velocidad de difusión del nitrógeno y reducir el tiempo de tratamiento. Se realiza dentro de un reactor donde se ha hecho vacío antes de introducir los gases de nitruración. Estableciéndose un circuito eléctrico en el que la pieza a nitrurar es el ánodo, por efecto del calor, el nitrógeno molecular se descompone y se ioniza. Con ello se produce la difusión del nitrógeno por la superficie y la consiguiente formación de nitruros. Otros gases presentes y que actúan como soporte son el gas carburante, argón, entre otros [7].

La carga se pone en un potencial catódico mientras que la cámara se pone en ánodo. La diferencia de potencial que se ha creado permite, bajo una presión lo suficientemente débil, la creación de un plasma que disocia las especies gaseosas. Por lo tanto, se produce una liberación de nitrógeno activo, que se acelera en dirección a la carga para crear a su alrededor un plasma nitrurante [7].

El sistema de manipulación automático de la campana permite liberar el espacio por encima de la solera, que se caracteriza por una base fija que permite el montaje

directo y seguro de las cargas de nitruración delicada. Se puede prever una segunda base para anticipar el montaje de una carga (ver Fig. 1.14) [7].



Fig. 1.14. Horno de nitruración Iónica BMI [6].

La siguiente información presenta las características del horno para nitruración de iónica ALLNIT, detallándonos datos como la temperatura máxima de trabajo, sus dimensiones físicas, su peso, etc. (ver Fig. 1.14):

- Dimensiones: Diámetro: 1050 x 1500 mm,
- Peso: 1,500 kg,
- Temperatura: 600 °C,
- Calentamiento: Convección forzada,
- Atmósfera: Vacío,
- Configuración: Campana,
- Función: Nitruración iónica, y
- Empresa: BMI.

## 1.8. NITRURACIÓN GASEOSA

Se trata de un tratamiento térmico realizado a temperaturas relativamente bajas, que proporciona nitrógeno en la superficie del acero y su difusión hacia el interior, consiguiéndose durezas elevadas [1].

Cuando después del temple y revenido han quedado las piezas con la resistencia deseada, las piezas deben tener las dimensiones finales, ya que después del nitrurado no se debe realizar ninguna operación de maquinado, sólo un pulido.

Las fases más importantes de este proceso son: protección de superficies, limpieza, nitruración propiamente dicha y enfriamiento. A continuación, se describirán los detalles más importantes de cada una de ellas, así [1]:

### A) Protección contra la nitruración.-

Cuando se quieren conservar blandas ciertas superficies de una pieza que va a ser nitrurada, se protegen esas partes con una película de estaño. Si es posible, se sumergen las partes que se quieren conservar blandas en un baño de aleación compuesto de 60% de plomo y 40% de estaño, fundido a 400 °C. Cuando se ve que está bien adherida la capa protectora, se sacan las piezas del baño y se retira todo el exceso de dicha aleación con un cepillo de alambre. Conviene que no quede ningún exceso de esta aleación, porque la temperatura de fusión de ésta es bastante inferior al de la temperatura de nitruración, ya que cualquier partícula que haya quedado sobre la pieza goteará o se deslizará sobre las superficies que se deben endurecer y aparecerán luego zonas blandas [1].

En el caso de que la zona que se desea proteger no se pueda sumergir en el baño de estaño, se utiliza un soldador de cobre o un soplete de gas, para aplicar el estaño. Previamente se limpian las superficies a proteger con una solución que se prepara en la siguiente forma: se diluyen 1,500 cm<sup>3</sup> de ácido clorhídrico en 750 cm<sup>3</sup> de agua, luego se disuelven en esta solución la mayor cantidad posible de zinc y después se añaden 30 a 60 g de sal de amoníaco, filtrando cuando se enfrió la mezcla. Como esta es corrosiva, es necesario, después de aplicar la capa de estaño, lavar con agua caliente todas las partes que se hayan mojado con ella [1].

El estañado electrolítico produce también resultados bastante satisfactorios y es suficiente una película de 0.025 mm de espesor.

También, se pueden proteger las superficies que deben quedar blandas, recubriéndolas con una pintura preparada de la forma siguiente: 5 partes de polvo muy fino de estaño, 2 partes de polvo muy fino de plomo y 5 partes de óxido de cromo verde [1].

Los elementos se mezclan y almacenan en seco y preparando pequeñas porciones de pintura, diluyéndola, en el instante de emplearla, en la solución ácida que se ha citado para el procedimiento anterior. Es conveniente que, en el instante de ser aplicada la pintura, las superficies de las piezas estén calientes, para que se seque la pintura rápidamente. Conviene efectuar la nitruración inmediatamente, pues como la pintura es hidroscofia, existe el peligro de que en contacto con la atmósfera se humedezca y origine corrosiones en la superficie de las piezas si permanecen largo tiempo de esa forma [1].

#### B) Limpieza.-

Después de terminada la protección de las superficies que han de quedar blandas, se deben limpiar y desengrasar las piezas cuidadosamente, lavándolas con gasolina o con un baño de soda caustica o bien con tricloroetileno. Después se debe efectuar un lavado con agua hirviendo para quitar todas las trazas de gasolina o soda. Esta última operación no es necesario hacerlo si se usa tricloroetileno. Luego se tiene que secar las piezas antes de colocarlas en el recipiente de nitruración. El último método (tricloroetileno) es preferible cuando se desengrasan las piezas que tienen conductos internos para aceite o artículos con agujeros, orificios, entre otros [1].

#### C) Preparación y control de la caja de nitruración.-

Las piezas a nitrurar se colocan en la caja de manera que permitan la libre circulación del gas amoníaco. Se suelen utilizar rejillas de alambre de níquel puro para separar los diferentes pisos de piezas que se forman al colocar unas encima de otras. Cuando se nitruran piezas de tamaño muy diferentes, se debe tener cuidado de distribuir bien las masas para que el calor se transmita uniformemente y se consiga un



calentamiento uniforme, también no se debe colocar el primer piso junto al suelo de la caja, sino a una altura de 2.5 a 5 cm, sobre una rejilla de níquel, apoyada en soportes de aluminio, de modo que el gas pueda entrar debajo de la carga y penetrar por entre cada una de las piezas. Las piezas que se quieren nitrurar también por el interior, se deben colocar verticalmente para que el gas de amoníaco pueda subir libremente por los huecos, sobre todo cuando se trata de agujeros de menos de 50 mm de diámetro. El último piso de piezas debe quedar por lo menos a 15 cm por debajo del nivel del tubo de escape situado en la parte superior, porque en esa zona la nitruración se verifica en malas condiciones, ya que suele existir una alta concentración de hidrógeno [1].

Las piezas que han sido estañadas, para evitar la nitruración de ciertas superficies, se deben colocar en la parte inferior de la caja, y en forma tal que si el estaño gotea durante la nitruración no caiga sobre alguna superficie que se quiere endurecer. Antes de la operación se deben examinar las rejillas de alambre para ver si tienen manchas de estaño, en el caso de que hayan sido empleadas anteriormente, limpiadas si fuera necesario, calentando la parte estañada del alambre a un rojo vivo mediante un soplete de gas y cepillándola con cepillo de alambre rígido [1].

Después de colocada y cerrada la tapa, y antes de ser introducida la caja en el horno (ver Fig. 1.15), se produce paso al gas de amoníaco al interior de la caja y se realiza el primer control observando si existe algún escape de gas [1].

Pasado el período de nitruración se retira la caja del horno, se deja enfriar al aire, manteniendo, sin embargo, la circulación de amoníaco hasta que la carga se haya enfriado hasta 150 °C. Antes de sacar la caja del horno es aconsejable dar algo más de amoníaco, a fin de contrarrestar la reducción de presión que tiene lugar en el interior del recipiente cuando este sea sacado a una atmósfera más fría. Si la presión dentro de la caja no se mantiene por encima de la presión atmosférica, entrara aire y se oxidara la superficie de las partes nitruradas, provocando una decoloración y presentando las piezas un tono diferente de gris plata característico. Esta decoloración, cuya intensidad depende del espesor de la película de óxido, no perjudica la profundidad de la capa nitrurada ni su dureza [1].

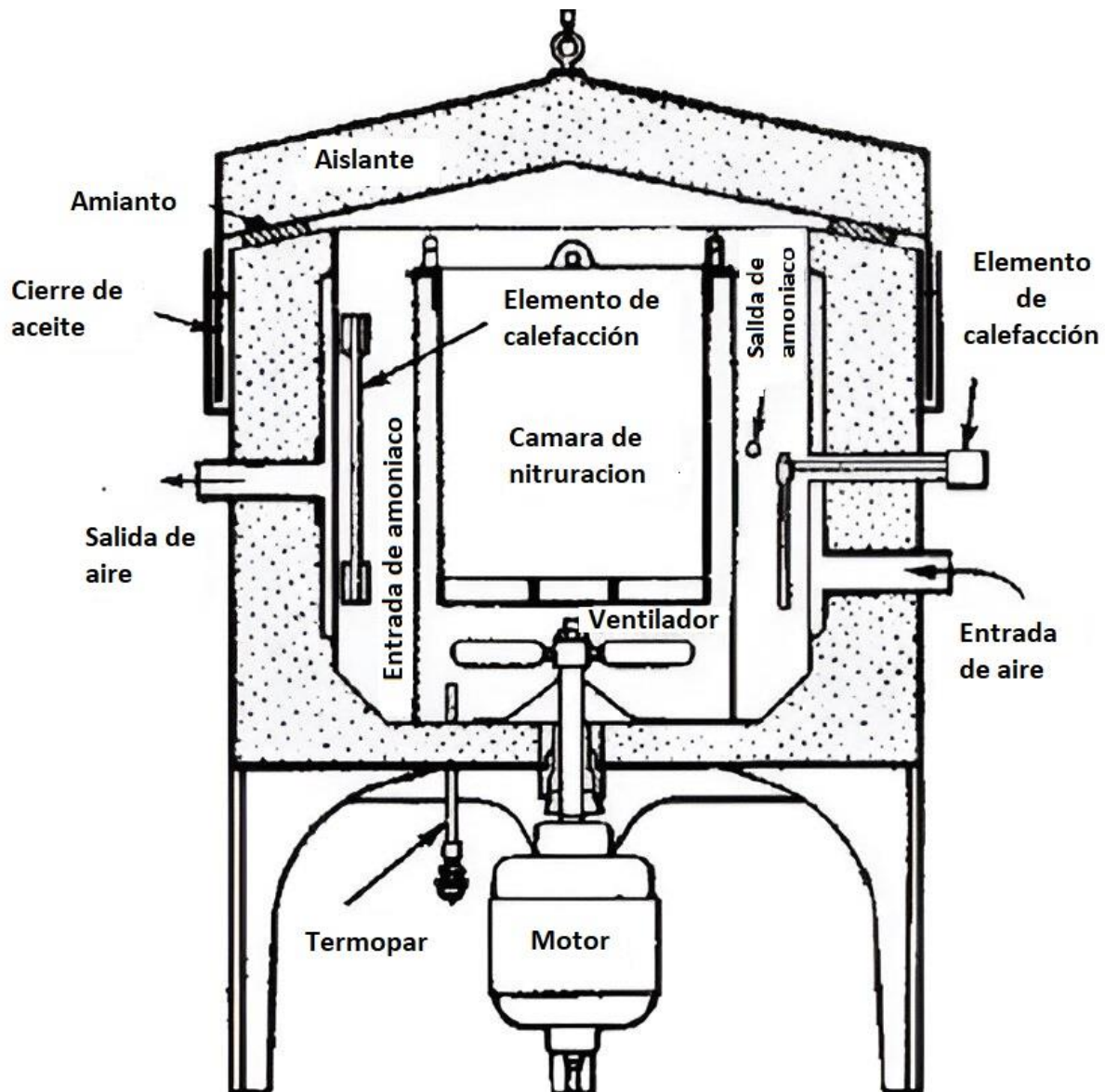


Fig. 1.15. Horno de nitruración gaseosa [1].

### 1.8.1. AGITACIÓN DE LA ATMÓSFERA

Los elementos esenciales que subyacen a la distribución uniforme de la temperatura y la precisión del control de la temperatura en este tipo de hornos de circulación de aire forzado se encuentran en el ventilador centrífugo [8].

El equipo designado para el proceso de nitruración consiste en un recipiente cilíndrico cerrado, y un agitador mecánico dentro del recipiente montado en un eje y accionado por un motor eléctrico que conecta con un eje en la parte inferior, va montado

un agitador que consiste en un ventilador de dos o tres aspas. El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, provocando la circulación del fluido que en este caso es gas por todo el recipiente y luego retorne al agitador [8].

Los agitadores se dividen en dos clases que están relacionados directamente con los patrones de flujo (ver Fig. 1.16), los agitadores radiales y axiales, los agitadores que generan corrientes paralelas al eje del ventilador se denominan impulsores de flujo axial y los que generan corrientes en dirección radial tangencial se llaman impulsores de flujo radial. A continuación, se describirán los detalles más importantes de cada uno de ellos, así [8]:

#### A) Agitador de flujo axial.-

Permiten un flujo desprendido del rodete de  $45^\circ$  y por lo tanto presenta recirculación, retornando hasta la zona central de las palas del agitador, creando un campo de flujo de ida y vuelta paralelo al eje de giro (ver Fig. 1.17). Este tipo de flujo se presenta con un Reynolds de entre 200 y 600. Y se transforma en flujo radial cuando el número de Reynolds disminuye [9].

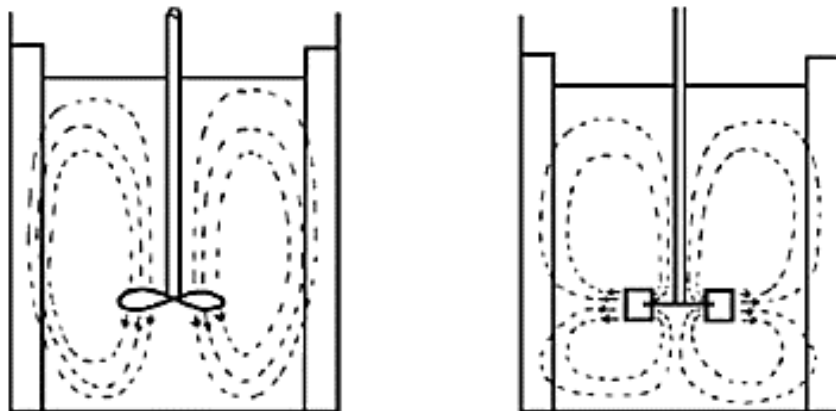


Fig. 1.16. Patrones de flujo axial y radial [8].

El agitador axial presenta unas series de características que la más importante es que crea una atmósfera homogénea y a la vez favorece el intercambio de calor, ayudando de esta manera a tener una temperatura uniforme dentro del horno (ver Tabla 1.3) [9].

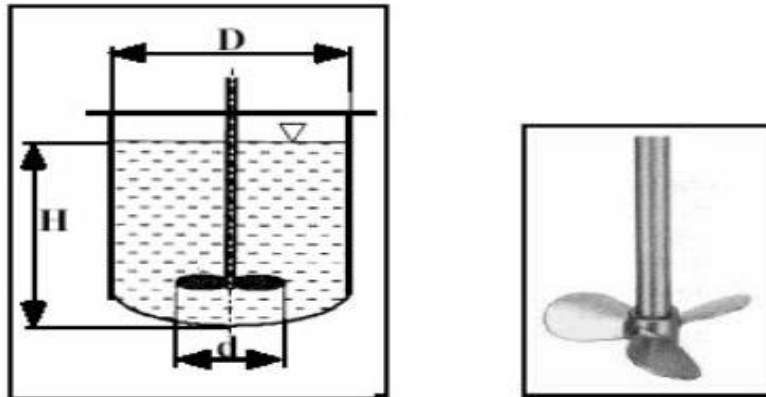


Fig. 1.17. Agitador axial [9].

Tabla 1.3. Características del agitador axial [9].

Descripción	Generalmente 3 álabes Ángulo de inclinación de aspa constante
Campo de flujo generado	Axial
Régimen alcanzado	Turbulento
Velocidad tangencial	3 – 15 m/s
Viscosidad del medio	Hasta 8 Pa·s
Posición del rodete ( $d_2/d_1$ )	0.1-0.5 (alejado de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Homogeneizar</li> <li>• Favorecer el intercambio de calor</li> </ul>

#### B) Agitador de flujo radial.-

Como sugiere el nombre, el diseño centrífugo utiliza la fuerza centrífuga generada por un disco giratorio, con aspas montadas en ángulo recto con respecto al disco, para impartir movimiento al aire o gas y aumentar su presión. El conjunto de cubo, disco y álabes se conoce como ventilador [9].

La rueda del ventilador centrífugo generalmente está contenida dentro de la carcasa del ventilador en forma de espiral, para aspirar aire de atmósfera reduce el flujo de calor dentro del eje. El aire o el gas dentro del ventilador que gira, se arroja desde el exterior de la rueda hacia una salida en el diámetro mayor de la carcasa. Esto atrae simultáneamente más aire o gas [9].

Existen muchas variedades de ventiladores centrífugos, que pueden tener ruedas de ventilador que van desde menores que 0.3 m (1 pie) a mayores que 5 m (16 pie) de diámetro [9].

Los agitadores más representativos son los de palas planas, estos incluyen aspas paralelas al eje del motor. Los más pequeños y de aspas múltiples se denominan “turbinas”; los mayores de velocidades más bajas, con dos o cuatro aspas se denominan agitadores de palas o paletas. Generan un flujo radial para cualquier Reynolds y proporcionan una alta velocidad tangencial (ver Fig. 1.18) [9].

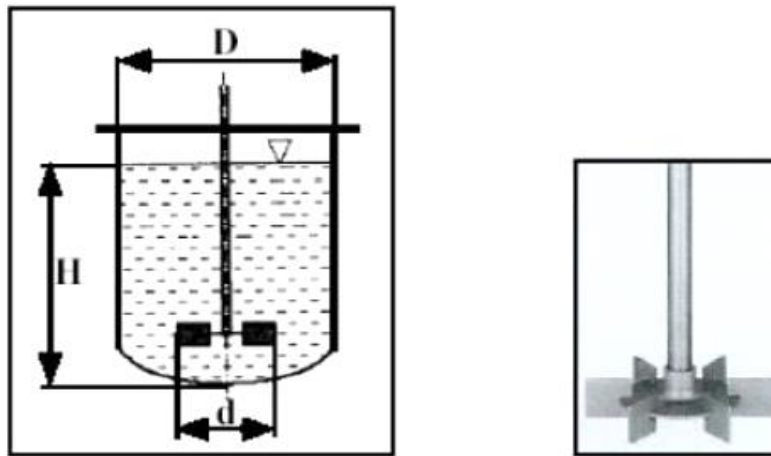


Fig. 1.18. Agitador de palas planas [9].

La característica más importante de este tipo de agitador es su facilidad de trabajo en atmósferas gaseosas y la distribución homogénea del gas y el calor dentro de la retorta (ver Tabla 1.4) [9].

Tabla 1.4. Características del agitador de palas planas [9].

Descripción	6 Palas planas y rectas
Campo de flujo generado	Radial
Régimen alcanzado	Turbulento
Velocidad tangencial	3 – 7 m/s
Viscosidad del medio	Hasta 10 Pa·s
Posición del rodete, $d_2/d_1$	0.2 – 0.5 (Alejado de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Homogeneizar.</li> <li>• Favorecer el intercambio y distribución del calor.</li> <li>• Agitación de gas.</li> <li>• Favorecer la inyección de gas.</li> </ul>

## 1.9. PROCESO DE DISOCIACIÓN DEL AMONÍACO

Todos los tipos de aceros se pueden nitrurar con éxito a la presión atmosférica mediante nitrógeno atómico procedente de la descomposición de combinaciones nitrogenadas, por ejemplo, el amoníaco.

La nitruración por amoníaco se produce en 3 etapas: 1) Disociación térmica del amoníaco. 2) Absorción del N por el  $Fe_{\alpha}$  para formar primeramente solución sólida y después nitruro de hierro ( $Fe_4N$ ). 3) Difusión del nitrógeno hacia el interior del acero [5].

El nitrógeno no absorbido inmediatamente pasa a molecular y no actúa como nitrurante. Por eso se necesita enviar a través del horno una corriente de  $NH_3$  para garantizar un grado de disociación adecuado, cuyo equilibrio depende del producto a nitrurar. Si el grado de disociación es muy alto, la absorción de nitrógeno por el metal se frena [1].

El proceso normal de nitruración se suele realizar a  $500 \pm 5$  °C produciéndose una disociación de un 30%. Los gases que se tienen en las cajas de nitruración contienen, por lo tanto, 70% de amoníaco sin disociar y 30% de nitrógeno más hidrógeno. En realidad, en este caso sólo se produce verdaderamente la disociación de un 17.7% del amoníaco que entra en las cajas, pues, aunque al hacer la medición en la forma que explicara más adelante, se obtiene el valor 30 esa medida no es la verdadera ya que existe un aumento de volumen en la disociación [1].

Recientemente se ha propuesto una nueva marcha del proceso, en la que se realiza la operación en dos etapas. La primera parte se realiza a 525 °C manteniendo la disociación a un 20% y durante la segunda parte se eleva la disociación a un 80% y la temperatura se mantiene a 560 °C se recomienda esta variación del proceso para obtener una capa dura más uniforme y tenaz y aprovechar mejor el amoníaco. Este proceso exige el uso de un disociador auxiliar colocado fuera del horno antes de la entrada del amoníaco en el mismo [1].

### 1.9.1. MEDIDA DE LA DISOCIACIÓN

El aparato utilizado para determinar la cantidad de amoníaco disociado se puede ver en la Fig. Fig. 1.19. Tiene cuatro llaves, que dejan libre cuando conviene el paso del gas, aire o agua entre los diferentes conductos.

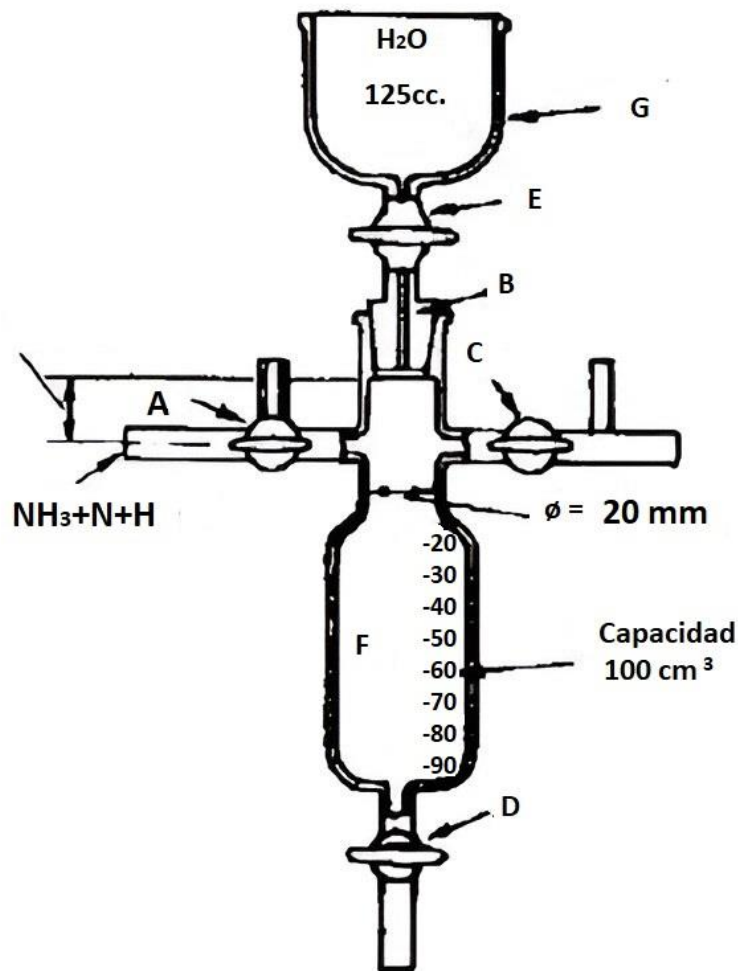


Fig. 1.19. Aparato para medir la disociación del amoníaco en los procesos de nitruración [1].

Cuando se va a efectuar la determinación del grado de disociación del amoníaco se conecta el aparato en la tubería de salida de caja y se opera de la siguiente forma: Se cierra la llave E y se llena el depósito G con agua. Luego se conecta el tubo de salida de gas del horno, al tubo de entrada y se abren las llaves A, C y D, y comenzará a circular el gas que sale del horno a través del aparato, y al cabo de un tiempo se cierra la llave

C, luego la D y finalmente la A, con lo que se tendrá el recipiente F lleno de una mezcla de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco sin disociar. Entonces se abre la llave E y caerá cierta cantidad de agua a la cámara F. El amoníaco que está sin disociar es inmediatamente absorbido por el agua y encima de ella quedará un gas compuesto de hidrógeno y nitrógeno, y la escala de la cámara F marca directamente el porcentaje de la disociación. Si el agua llega a la línea 30 se ha disociado 30%. De acuerdo con estas lecturas la corriente de amoníaco se debe regular para que el grado de disociación esté comprendido entre 25 y 30 %. Durante el proceso de nitruración conviene examinar el grado de disociación cada 2 o 4 h, regulando el paso del amoníaco de acuerdo con el grado de disociación.

La cantidad de amoníaco necesaria depende de la superficie de los objetos a nitrurar y no de su peso. Por ejemplo, un cubo de 100 mm de lado tiene una superficie de 60,000 mm<sup>2</sup> y un peso de 7.8 kg. El mismo cubo, cortado en placas de 10 mm de espesor, tendrá el mismo peso, aunque una superficie de 240,000 mm<sup>2</sup> mucho mayor y necesitará más amoníaco para la nitruración.

Si se obtiene una cifra de disociación de un 10% por ejemplo, lo que ocurre cuando el agua en el aparato de disociación sube hasta la línea 10 de la graduación, es señal de que la disociación es imperfecta, seguramente porque circula demasiado gas a través de la cámara de nitruración y conviene reducir el paso un poco. Si en otro instante se obtiene un valor del 35% o más, la circulación del amoníaco se debe aumentar hasta que el grado de disociación llegue a los 25 o 30%. Estas cifras corresponden únicamente a un trabajo normal.

Cuando se usa un recipiente grande para nitrurar pocas piezas, es fácil que haya zonas con poco nitrógeno y se formen “bolsas” de alta concentración de hidrógeno, lo que originará capas nitruradas muy delgadas que pueden dar lugar a muchos fracasos. En esos casos conviene hacer pasar mucho amoníaco con el fin de crear turbulencias alrededor de las piezas, así se debe mantener la disociación de 10 a 15 % en vez de 25 a 30 % [1].



## 1.9.2. EQUIPO DE NITRURACIÓN

En la Fig. 1.20, se presenta un esquema general de una instalación para la nitruración. Para este proceso se utilizan hornos continuos y de lotes de diferentes diseños. A los hornos de lotes se refieren los hornos de cuba (hornos estáticos) con mufla y sin mufla (cámara cerrada fabricada con materiales refractarios), así como los de cámara; a los hornos que funcionan por el ciclo continuo, pertenecen los de empuje y los de solera corrediza [4].

Los hornos que más se utilizan son los de cuba. En los hornos de cuba con mufla el gas de trabajo entra en una mufla hermetizada sin hacer contacto con los calentadores y con el revestimiento. En los hornos sin mufla el gas contacta directamente con los caloríferos y la mampostería del horno [4].

En todos los hornos de cuba la circulación del gas en el espacio útil es forzada, la potencia eléctrica se divide por zonas, lo que asegura una uniformidad alta del campo de temperatura y de la composición de la atmósfera [4].

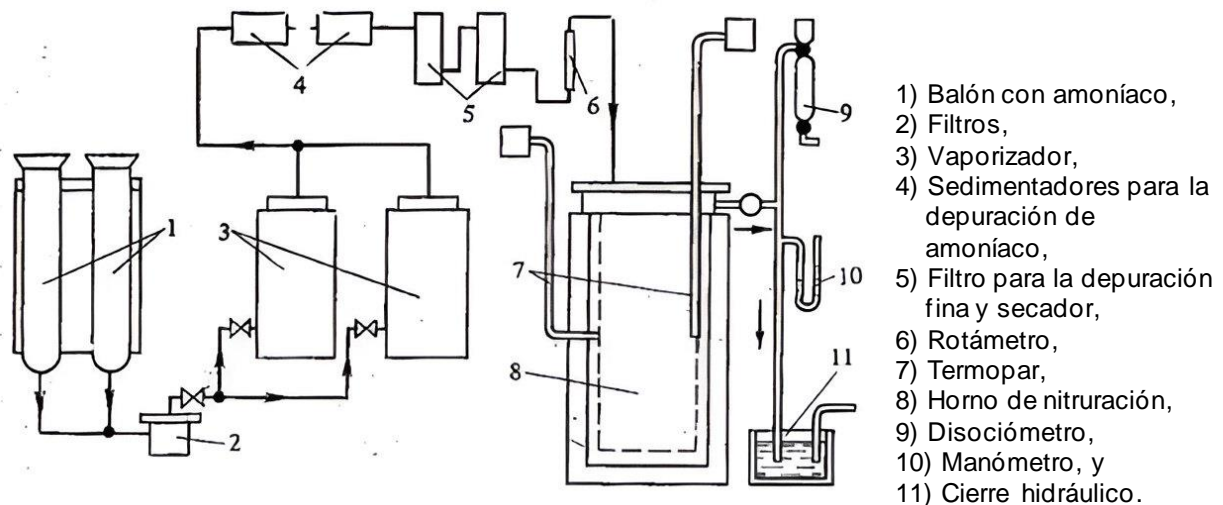


Fig. 1.20. Esquema de la instalación para la nitruración [4].

Los hornos de cuba con mufla (ver Fig. 1.21) se fabrican en dos modificaciones con dos muflas reemplazables o con una estacionaria. El consumo de gas de los hornos de mufla por 1 kg de carga constituye 40 a 50 g, mientras que en los que son sin mufla, 150 - 250 g, el consumo de energía eléctrica por un 1 kg de carga es de 0.40 a 1.1 kW.

Los hornos con dos muflas están calculados para el funcionamiento semicontinuo. Mientras que una mufla con las piezas a tratar después de la exposición se extrae del horno y se enfría al aire o en el pozo refrigerador, en el horno se carga la segunda mufla con las piezas colocadas en está de antemano [4].

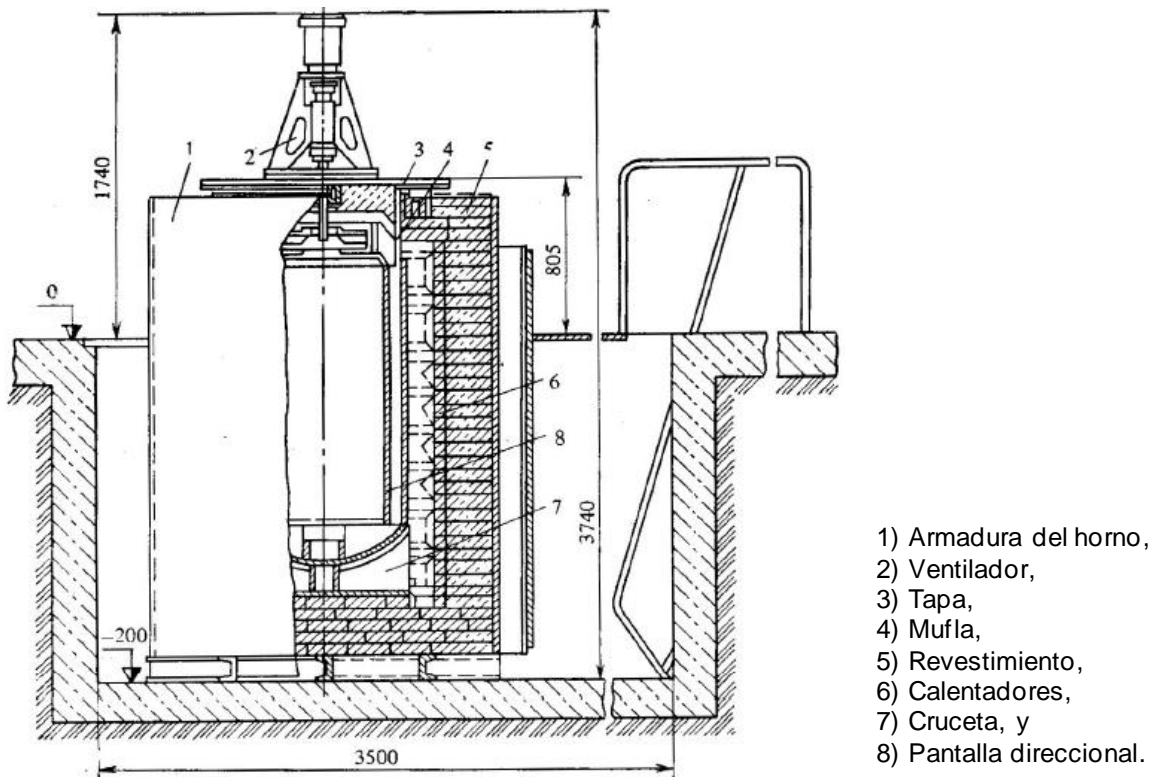


Fig. 1.21. Horno de mufla de cuba para la nitruración [4].

Para los hornos con muflas estacionarias y sin muflas se prevé el enfriamiento acelerado de la carga después de finalizar el proceso. En tales instalaciones el tiempo de enfriamiento de la carga se reduce en 3 a 5 veces. En los hornos eléctricos con mufla la refrigeración intensificada de la carga se consigue soplando la mufla con aire frío. Todo el ciclo de nitruración, incluyendo el calentamiento, la exposición y el enfriamiento hasta 150 a 250 °C, se realiza sin interrumpir la alimentación con amoníaco [4].

Entre los hornos de cámara para la nitruración los que más se utilizan son los hornos de cámara desplazable se emplean para la nitruración de camisas, de árboles acodados de pequeñas dimensiones y de otras piezas. Los hornos de gran volumen se usan para la nitruración simultánea de los cigüeñales de tres a ocho codos de 2.2 a 4.2

m de longitud. El control y regulación del proceso de nitruración en las empresas industriales se realizan por las temperaturas, el tiempo de exposición, la presión y el grado de disociación del amoníaco [4].

El grado de disociación del amoníaco es el equivalente de la actividad saturante de la atmósfera y representa la relación entre el volumen de amoníaco disociado y el volumen total del gas. Por lo común, la atmósfera se controla por la composición de la mezcla de amoníaco, nitrógeno e hidrógeno que sale del horno, mediante disociómetros manuales o automáticos. Al perder el intervalo de los valores prefijados de la disociación en el proceso, el consumo de amoníaco se regula con las válvulas de aguja en la tubería o el balón de amoníaco [4].

### **1.10. EFECTOS DE LA NITRURACIÓN Y SU PREVENCIÓN**

En el proceso de nitruración por gas pueden surgir los defectos siguientes:

#### **1) La deformación y el alabeo.-**

Son tan mayores, cuando más alta es la temperatura del proceso y más gruesa la capa nitrurada. La deformación y el alabeo de las piezas nitruradas están condicionados por la naturaleza de la capa nitrurada, composición del acero, estructura irracional de las piezas, protección asimétrica y de baja calidad contra la saturación, alteración de la tecnología de tratamiento térmico previo y por una colocación incorrecta de las piezas durante el tratamiento [4].

El aumento del volumen específico de la superficie durante la nitruración va acompañado de un incremento de las dimensiones geométricas de las piezas. Las dimensiones de la pieza aumentan por término medio un 4 a 6 %, en dependencia del espesor de la capa nitrurada, lo cual se debe tener en consideración al asignar los sobre espesores. El aumento de la concentración de los elementos formadores de nitruros contribuye a la deformación [4].

A la disminución del alabeo contribuyen el descenso de la temperatura de saturación, la reducción del espesor de la capa, la realización minuciosa del tratamiento térmico previo, la colocación y giro racional de las piezas en el proceso de nitruración [4].

## 2) La fragilidad y la descamación.-

De la capa se determinan por la pureza y calidad del metal, por la desviación respecto a los regímenes de nitruración y de rectificado. En los lugares de inclusiones no metálicas, con cascarillas, grietas y otros defectos de continuidad se observa un hinchamiento de la capa provocado por una gran concentración de nitrógeno y por la formación de una cantidad elevada de fase. Durante el rectificado semejante capa desmenuzada [4].

Los defectos de nitruración y rectificado aparecen en la superficie durante el proceso de rectificado o bruñido y tienen el siguiente aspecto: de descamación de películas finas de la capa nitrurada en dirección del avance de la piedra rectificadora; de lesión de la superficie en gran escala por una erupción menuda, o sea, de desmenuzamientos puntuales (hasta 0.05 mm de profundidad), que surgen durante las operaciones de acabado; de una red densa de grietas diminutas [4].

La microestructura de la capa nitrurada que tiende a la descamación durante el rectificado se caracteriza por la presencia en los límites de los granos austeníticos de una red de nitruro desarrollada. La fragilidad puede ser causada por la descarburación superficial antes de la nitruración y por el sobrecalentamiento durante el tratamiento térmico previo. La estructura de grano grueso de los aceros siempre contribuye a que la superficie sea más frágil. La zona frágil superficial puede ser eliminada por el rectificado a una profundidad de 10 a 50  $\mu\text{m}$  sin reducir la dureza. Para disminuir la descamación se deben observar las condiciones óptimas del rectificado. Los avances transversal y longitudinal deben tener parámetros que eviten las quemaduras; la granulosis de las muelas de rectificar es de 60 a 100 unidades. No se admite que las muelas se manchen de grasa [4].

## 3) La dureza baja e irregular.-

De la capa nitrurada está condicionada por la elevación de la temperatura de nitruración, un alto grado de disociación del amoníaco, interrupciones en el suministro de amoníaco y también por el incumplimiento de la tecnología del tratamiento térmico previo [4].

La dureza irregular de la superficie dentro de los límites de una sola pieza está provocada por la presencia en la superficie de endurecimiento de trazas de estaño o

vidrio líquido (después de la nitruración parcial); por un desengrase insuficiente de las piezas y por la heterogeneidad granular de la estructura del acero. Las partes de grano fino tienen una dureza más alta que las partes de grano grueso [4].

4) Un espesor insuficiente de la capa.-

Está provocado por el descenso de la temperatura del proceso, por el aumento del grado de disociación de amoníaco y por la reducción de la exposición. Para corregir este defecto en el espesor de la capa se recurre a la nitruración repetida [4].

### **1.11. CONTROL DE CALIDAD EN LAS PIEZAS NITRURADAS**

La calidad de la nitruración se comprueba en la muestra testigo y directamente en las piezas. Se controlan el espesor de la capa, la dureza superficial, el alabeo y la deformación, las dimensiones y la calidad de la superficie. Las muestras testigos se someten al tratamiento térmico y se fabrican del mismo acero que las piezas a nitrurar. Después de la nitruración las piezas se someten al examen visual. La superficie nitrurada debe ser de color gris mate. La presencia de colores de revenido no es defecto. En todas las piezas se comprueba la ausencia de descamaciones, cizallamientos y agrietamientos, sobre todo a lo largo de los bordes agudos, con un aumento de 15 a 30 veces. El control de la dureza (ver Fig. 1.22) se realiza en las muestras testigos y directamente en las piezas mediante medidores de dureza del tipo Vickers con una carga de 50 a 100 HV.

El control de la fragilidad de la capa nitrurada se efectúa por el aspecto de la huella de la pirámide de diamante de acuerdo con la escala de fragilidad VIAM. Los grados I y II de fragilidad de esta escala corresponden a las capas difusivas dúctiles capaces para funcionar, el grado IV indica que la pieza es totalmente inservible.

El espesor de la capa difusiva se controla en las muestras testigos examinando al microscopio con un aumento de 100 a 200, las micro probetas transversales decapadas con la solución alcohólica de ácido nítrico al 4 %. Han sido elaborados métodos no destructores de control de la cualidad de nitruración con aparatos de resonancia, los

cuales con frecuencias de 3 a 5 kHz aseguran el control del espesor de la capa en una gama de 0.1 a 0.5 mm y con una frecuencia de 500 kHz evalúan la dureza superficial.

Después de la nitruración líquida con frecuencia se determina la porosidad de la zona carbonitrurada, aplicando a la superficie una solución acuosa del cloruro cúprico amónico al 10 % (reactivo de Wocker). Si la zona de carbonitruros es de alta calidad, el color azul del reactivo se conserva, por lo menos, durante 2 min. Si la zona de las uniones es pequeña o porosa, entonces el reactivo se enrojece debido a la sustitución de los iones de cobre en la solución por iones de hierro y a la precipitación del cobre rojo.

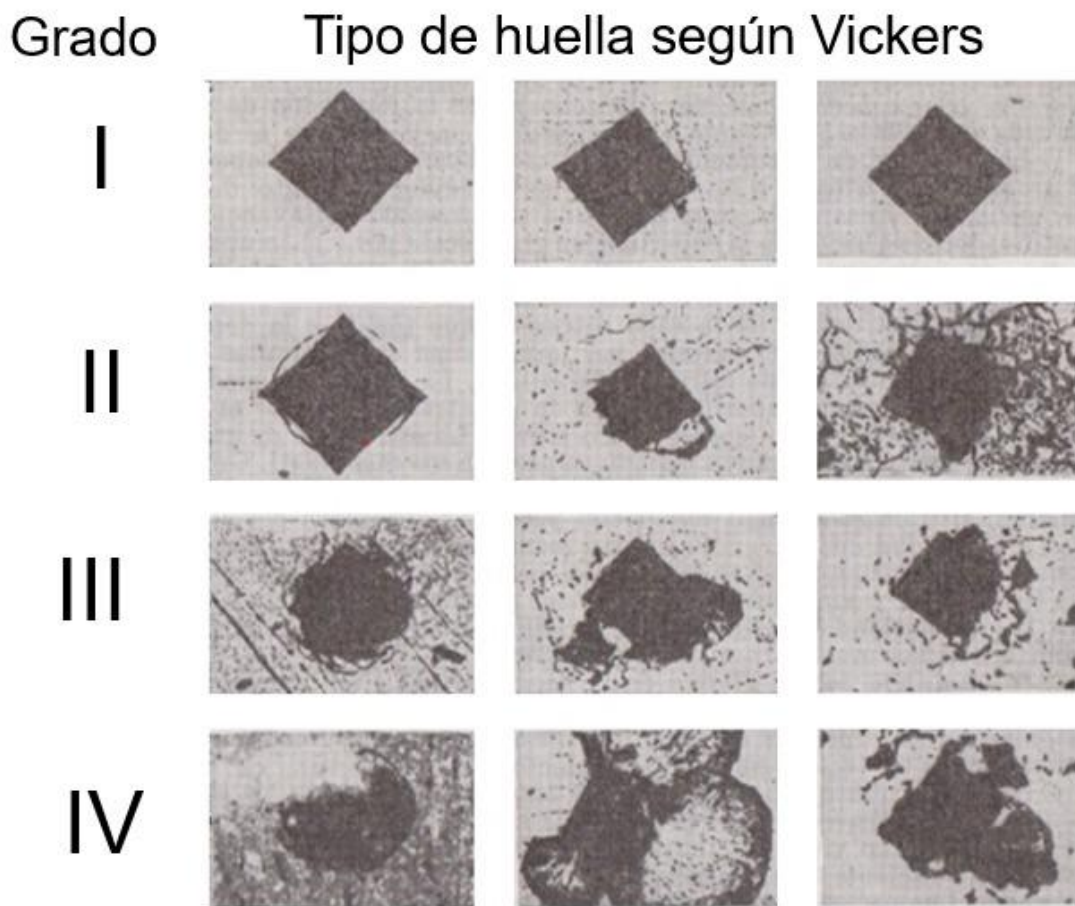


Fig. 1.22. Escala de fragilidad de la capa nitrurada: I, no frágil; II, ligeramente frágil; III, frágil; IV, muy frágil [4].

## **1.12. MANEJO Y PROCESAMIENTO DE GASES RESIDUALES DE AMONÍACO**

Para el manejo y la clasificación de los gases residuales generados en el proceso de nitruración, se consideraron los aspectos legales que establece la ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje. Y para su procesamiento y disposición final se considerará la jerarquía en la gestión de residuos.

### **1.12.1. LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS Y FOMENTO AL RECICLAJE**

Los Principios y definiciones listados en la ley de gestión de residuos y fomento al reciclaje, servirán para clasificar los gases residuales del proceso de nitruración. Una vez identificado el tipo de sustancia residual generada en dicho proceso; la ley da una serie de indicaciones a seguir, para el manejo y disposición final de los residuos, como se puede ver a continuación:

#### **A) Principios:**

- **Jerarquía en la Gestión de Residuos:** en la gestión integral de residuos deberá prevalecer una jerarquía en la que prima la prevención de generación de residuos, luego la preparación para la reutilización, el reciclaje o la valorización total o parcial de los residuos por otros medios que permita la recuperación o aprovechamiento energético del mismo, siendo la disposición final o la eliminación la última alternativa [10].
- **Prevención en la fuente:** en toda actividad la generación de residuos debe ser prevenida prioritariamente en la fuente, siendo esta la forma más efectiva de reducir la cantidad de residuos, el costo asociado a su manejo y los impactos a la salud y al medio ambiente [10].
- **Precautorio:** hace referencia a que, ante la falta de certeza científica, se deberán implementar las medidas técnicas necesarias para disminuir el riesgo de daños para el medio ambiente y la salud humana derivado del manejo de residuos [10].
- **Responsabilidad del Generador:** toda persona natural o jurídica, incluyendo las instituciones de gobierno, es responsable de los residuos que directamente

genera, asumiendo los costos de su gestión integral, su manejo adecuado, la contaminación que pueda provocar en el ambiente y la reparación del daño que produzca [10].

- Trazabilidad: la gestión integral de residuos deberá establecer el conjunto de procedimientos preestablecidos y autosuficientes que permitan conocer las cantidades, ubicación y trayectoria de un residuo o lote de residuos a lo largo de la cadena de manejo [10].

#### B) Definiciones:

- Disposición final: proceso de disponer los residuos en forma definitiva en lugares especialmente seleccionados y diseñados con criterios técnicos y sanitarios para evitar la contaminación, los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente [10].
- Residuo: es todo tipo de material, orgánico o inorgánico, sólido, líquido o gaseoso, que el generador abandona, rechaza o entrega y que puede ser o no susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien [10].
- Residuo peligroso: son aquellos en estado sólido, líquido o gaseoso que tienen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contienen agentes biológicos infecciosos que les confieran peligrosidad, así como materiales, envases, recipientes y embalajes [10].
- Unidades de contención de residuos: unidad física o área ambientalmente controlada para el almacenamiento temporal de residuos, que contribuye a prevenir cualquier tipo de exposición que pueda ocasionar un impacto negativo en la salud y al medio ambiente. Estas unidades pueden ser permanentes o temporales [10].
- Valorización: conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y el poder calorífico de los mismos. La valorización comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética [10].



### C) Residuos peligrosos:

Art. 29.- Los residuos peligrosos son aquellos que, en estado sólido, líquido o gaseoso, poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contienen agentes biológicos infecciosos que les confieran peligrosidad, así como materiales, envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan estado en contacto con residuos o material peligroso [10].

Se consideran como residuos peligrosos los catalogados en el *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación*, el Acuerdo Regional Centroamericano sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y sus respectivos anexos y normativas vigentes sobre la materia [10].

Además, se consideran residuos peligrosos aquellos productos que no siéndolo, adquieren las características de estos a través del uso, siendo responsabilidad del generador bajo el cual se da la transformación y su adecuada gestión [10].

Ninguno de los gases utilizados en el proceso de nitruración se encuentra listados en el convenio de Basilea. En el convenio se mencionan los residuos de tratamientos superficiales en metales y plásticos. Para el caso de los metales, no se especifica el tipo de tratamiento superficial, si es termoquímico o de limpieza [10].

#### **1.12.2. MANEJO Y SEGURIDAD**

El manejo seguro de gases es crucial en la industria, incluidas aquellas que utilizan amoníaco, nitrógeno e hidrógeno. Estos gases tienen propiedades químicas y físicas específicas que requieren precauciones adecuadas para garantizar la seguridad de los trabajadores, la protección del medio ambiente y la prevención de posibles incidentes. Es esencial seguir pautas y procedimientos establecidos para el manejo adecuado y seguro de estos gases, y garantizar su almacenamiento, transporte y disposición final de manera responsable, como se puede ver a continuación:

#### A) Nitrógeno.-

La atmósfera contiene aprox. 78% de nitrógeno, este gas no genera efectos adversos a la ecología, no está catalogado como contaminante marino y no se encuentra en los listados que sirven para clasificar a una actividad como de alto riesgo [11].

En caso de fugas o derrames se debe evitar el contacto con la piel de los gases fríos. Ventilar las áreas cerradas para evitar la formación de atmósferas deficientes de oxígeno, Utilice equipos de respiración autónomo en atmósferas deficientes de oxígeno, las mascarillas de cartucho no funcionan. Utilizar guantes de cuero para manipular los cilindros que contengan dicho gas [11].

#### B) Hidrogeno.-

El hidrógeno no genera efectos adversos a la ecología, no contiene ningún químico que afecte la capa de ozono, el hidrógeno no está catalogado como contaminante marino. El hidrógeno por sus características se encuentra dentro del listado de los productos que, si se almacenan, producen o transportan en cantidades iguales o mayores a la de reporte se considera la actividad como de alto riesgo, la cantidad de reporte para el hidrógeno es de 500 kg [11].

El hidrógeno al quemarse genera una flama casi invisible de baja radiación térmica. Existen casos de personas que han caminado sin saberlo a través flamas de hidrógeno. la energía mínima de ignición es muy baja (0.2 MJ) y el intervalo de inflamabilidad es muy amplio. La flama se propaga muy rápidamente. Existe peligro potencial de explosión por reignición si el fuego se extingue sin cerrar la fuente de hidrógeno. El hidrógeno se puede acumular en las áreas superiores de los lugares cerrados [11].

En caso de fugas o derrames. No entrar en áreas que contengan mezclas inflamables de hidrógeno en aire. Ventilar las áreas cerradas para prevenir la formación de atmósferas inflamables o deficientes de oxígeno. Eliminar todas las fuentes potenciales de ignición [11].

### C) Amoníaco.-

El gas en combinación con el aire forma una mezcla inflamable del 16 y 25 % en volumen, que al contacto con una fuente de ignición puede explotar. Evitar contacto con mercurio metálico, óxidos y peróxidos, percloratos y halógeno. Reacciona violentamente con ácidos. Al contacto con la piel provoca severas quemaduras. Mantener los recipientes herméticamente cerrados y alejados de cualquier fuente de calor, chispa o flama. De preferencia mantener el producto en áreas frescas y bien ventiladas. Se debe transportar y almacenar por compatibilidad. Debe estar debidamente etiquetado.

En caso de derrame o fuga, se debe usar utilizar protección respiratoria y ropa adecuada. Si es posible, se deben cerrar válvulas de la fuente de fuga. En caso de fuga, las personas se deben colocar en dirección opuesta al viento y la fuga, de manera que eviten respirar o tener contacto con el amoníaco. Se deben emplear mangueras con aspersores o pulverizadores de agua, para diluir y absorber el gas amoníaco [12].

En la Tabla 1.5 se proporcionan datos relevantes que permiten evaluar los posibles riesgos para la salud asociados con la exposición a estos gases. Se incluyen detalles sobre los límites de exposición recomendados, efectos adversos conocidos y medidas de seguridad recomendadas para minimizar los riesgos. Esta información es de vital importancia para garantizar un entorno de trabajo seguro y tomar las precauciones adecuadas al manipular o estar expuesto a gases residuales.

Tabla 1.5. Sistemas de exposición y propiedades toxicológicas de los gases residuales [11].

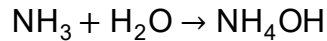
	Amoníaco	Nitrógeno	Hidrógeno
Límite de exposición	Exposiciones a un nivel de 100 ppm provocan irritaciones de las mucosas de la nariz y garganta.	Simple asfixiante. No está catalogado como cancerígeno	El hidrógeno es un simple asfixiante por lo que no tiene un valor límite de exposición
Síntomas de exposición	La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La exposición podría causar asfixia debido a inflamación de la garganta. La inhalación puede originar edema pulmonar, aunque sólo después de producir los efectos corrosivos iniciales en los ojos o las vías respiratorias.	El nitrógeno es inodoro y no toxico, aunque puede producir asfixia al diluir la concentración de oxígeno en el aire. Puede producir graves daños a los tejidos y quemaduras	El hidrógeno no es tóxico y está clasificado como un simple asfixiante. Los síntomas de anoxia sólo ocurrirán cuando las concentraciones del gas estén dentro de los intervalos de inflamabilidad y la mezcla no haya encendido.
Propiedades toxicológicas	Tóxico si se inhala. Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares. Muy tóxico para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.	El nitrógeno no es toxico, aunque puede actuar como simple asfixiante al desplazar del aire la cantidad de oxígeno necesaria para la vida	El hidrógeno no es tóxico, es extremadamente inflamable. El hidrógeno necesario para reducir las concentraciones del oxígeno en un nivel inferior al requerido para soportar la vida causaría mezclas dentro de los intervalos de inflamabilidad.
Mezclas peligrosas con otros líquidos, sólidos o gases	Reacciones violentas con ácidos, oxidantes fuertes y halógenos. Al disolverse en agua desprende calor	Ninguna	No mezclar con gases oxidantes tales como oxígeno, flúor, cloro, etc.

### 1.12.3. OPCIONES DE PROCESAMIENTO O DISPOSICIÓN FINAL DE GASES RESIDUALES

Con el fin de disminuir el impacto ambiental que pueda generar la liberación al ambiente de los gases residuales del proceso de nitruración; se presentan algunas alternativas para tratar dichos gases y poder reutilizarlos; siguiendo el principio de la jerarquía en la gestión de residuos descrito anteriormente, se obtiene:

#### A) Diluir el amoníaco en agua.-

El hidróxido de amonio se puede obtener a través de la disolución de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en agua. El proceso implica la reacción química del amoníaco con el agua, que produce hidróxido de amonio y se expresa de la siguiente manera [12]:



La fórmula química muestra que un mol de amoníaco reacciona con un mol de agua para producir un mol de hidróxido de amonio. La reacción es exotérmica, lo que significa que se libera calor durante la reacción [12].

Para llevar a cabo esta reacción, se puede utilizar amoníaco gaseoso y agua destilada en una proporción estequiométrica, es decir, una cantidad equimolar de amoníaco y agua. El resultado será una solución acuosa de hidróxido de amonio. Es importante tener en consideración que el hidróxido de amonio es una sustancia tóxica y corrosiva que debe ser manejada con precaución y bajo condiciones adecuadas de seguridad [12].

Este proceso se realizaría haciendo pasar los gases de salida del horno por un tanque con agua, o un sifón. El amoníaco gaseoso quedara disuelto en agua mientras que el nitrógeno y el hidrogeno no. Estos últimos podrían ser liberados a la atmósfera [12].

Los usos del hidróxido de amonio son:

- Producción de productos químicos: El hidróxido de amonio se utiliza en la producción de otros productos químicos como fertilizantes, plásticos, caucho y productos farmacéuticos [12].
- Limpieza: El hidróxido de amonio se utiliza en la limpieza de superficies, especialmente en la industria alimentaria, ya que es un agente limpiador efectivo [12].
- 

#### B) Separación de gases.-

En el caso de que algunos de los gases residuales sean utilizados para otros procesos de fabricación o tengan algún aprovechamiento energético, es posible utilizar la tecnología de membranas para poder separar los gases, y almacenarlos

individualmente. Las membranas son barreras selectivas que permiten la separación de una corriente de alimentación en sus determinados componentes. Generalmente, el componente deseado pasa a través de la membrana constituyendo la corriente de permeado. El resto de las componentes que no pasan la barrera y forman la corriente de retenido (ver Fig. 1.23) [13].

La principal ventaja de la tecnología de membranas es la obtención de gases de alta pureza. Del mismo modo, la simplicidad de operación incrementa su compacidad y portabilidad. Adicionalmente, este proceso es fácilmente combinable con otras operaciones de separación [13].

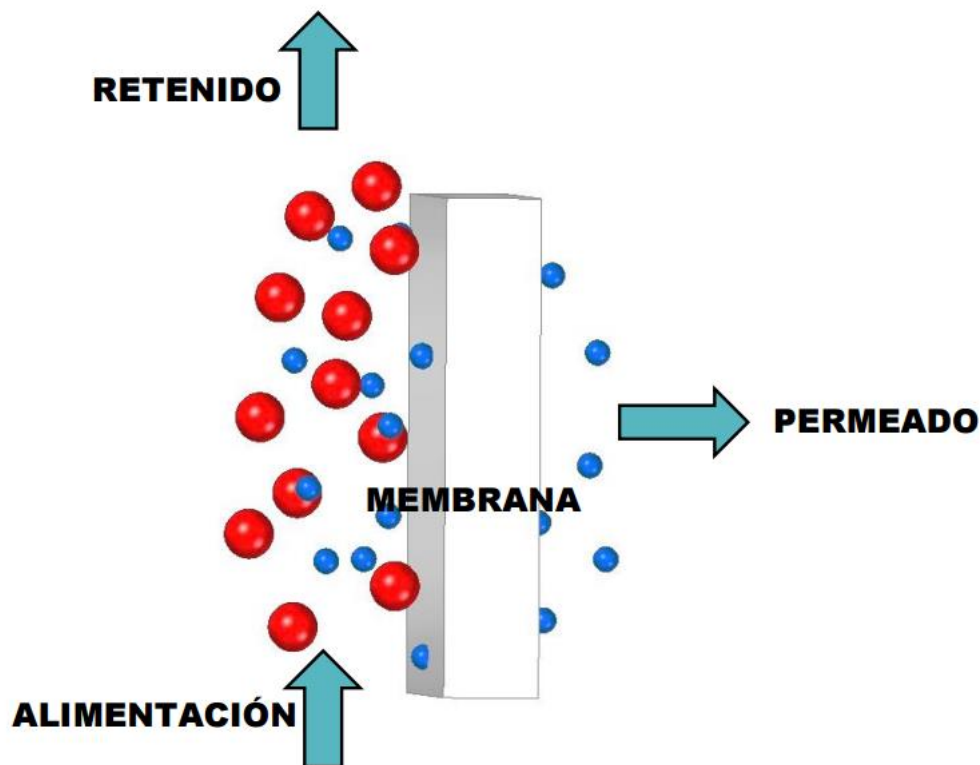


Fig. 1.23. Esquema simplificado del funcionamiento de una membrana de separación de gases [13].

### 1.13. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA NITRURACIÓN

Algunas de las propiedades más importantes obtenidas a partir del proceso de nitruración son las siguientes:

- Gran dureza: Después de la nitruración se consiguen durezas elevadísimas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial. Las piezas nitruradas pueden quedar con durezas comprendidas entre los 650 y los 1,100 HV, según la composición del acero. Cuando interesa que la capa dura sea de gran tenacidad, conviene utilizar aceros que después de la nitruración queden con durezas relativamente bajas (650 a 850 HV) porque las capas nitruradas de máxima dureza tienen menor tenacidad.
- Gran resistencia a la corrosión: Los aceros, después de la nitruración, resisten mejor la acción corrosiva del agua dulce, agua salada, vapor o atmósferas húmedas que los aceros sin nitruración, por lo que este proceso es muy utilizado para las piezas que deben sufrir la acción de ciertos agentes corrosivos. En el caso de que interese la máxima resistencia a la corrosión, no se deben rectificar las piezas después de haber sido nitruradas.
- Endurecimiento exclusivo de determinadas superficies de las piezas: Durante la nitruración se pueden proteger perfectamente las superficies de las piezas que no se desea endurecer, aunque sean de formas complicadas e irregulares, dejando libres para nitrurar exclusivamente las zonas que interesa endurecer.
- Retención de las durezas a temperaturas elevadas: Las capas nitruradas conservan gran dureza hasta los 500 °C, especialmente cuando la duración del calentamiento no es muy prolongada [1].

Algunas de las desventajas de realizar un tratamiento de nitruración son las siguientes:

- Se tiene un mayor costo en comparación a otros tratamientos superficiales, debido a los largos tiempos que se necesitan para penetrar un milímetro en la capa de la pieza a tratar, que son alrededor de 100 h.
- Se tiene una alta dificultad para cubrir las zonas que no requieren nitruración, esto mucho más en piezas que son de forma geométrica compleja.

- La capa endurecida es delgada en comparación a la cementación.
- La principal desventaja de este proceso es el costo elevado, ya que se necesitan aceros aleados y una atmósfera de amoníaco y nitrógeno en algunos casos, que generan altos costos.



## 2. DISEÑO TÉRMICO

Este apartado se ha realizado una inspección exhaustiva de los parámetros de diseño térmico relacionados con la cámara de carga del horno (ver Fig. 2.1). Esta área es de especial interés, ya que influye directamente en la distribución uniforme de la temperatura, el flujo de gas y otros factores esenciales para el proceso de nitruración.

Al considerar la importancia de la cámara de carga en el rendimiento general del horno, se busca proponer soluciones de rehabilitación específicas y ajustes en los parámetros de diseño térmico. El objetivo es mejorar la eficiencia térmica, la uniformidad en la distribución de la temperatura y, en última instancia, la calidad del proceso de nitruración.



Fig. 2.1. Inspección de la Cámara de carga del horno de nitruración.

En esta la propuesta de rehabilitación se determinó a partir de la inspección, que la forma más eficiente de aportar calor será por medio de electricidad, ya que además facilitará el control del proceso.

Las ventajas que ofrecen los hornos con resistencia eléctrica se enuncian a continuación:

- Uniformidad en la distribución del calor;
- Facilidad para regular la temperatura;
- Eficiencia y limpieza;
- Ausencia de gases nocivos de productos de combustión; y
- Facilidad de instalación.

Por lo consiguiente, en este capítulo se procederá a realizar el cálculo de la carga térmica con la cual el horno podrá estar en operación; además, se calculará la fuente de calor, la cual será una resistencia eléctrica. Al concluir el proceso completo de rehabilitación, el objetivo es lograr que el horno luzca similar al mostrado en la Fig. 2.2, habiéndole restaurado todos sus elementos y sistemas faltantes.

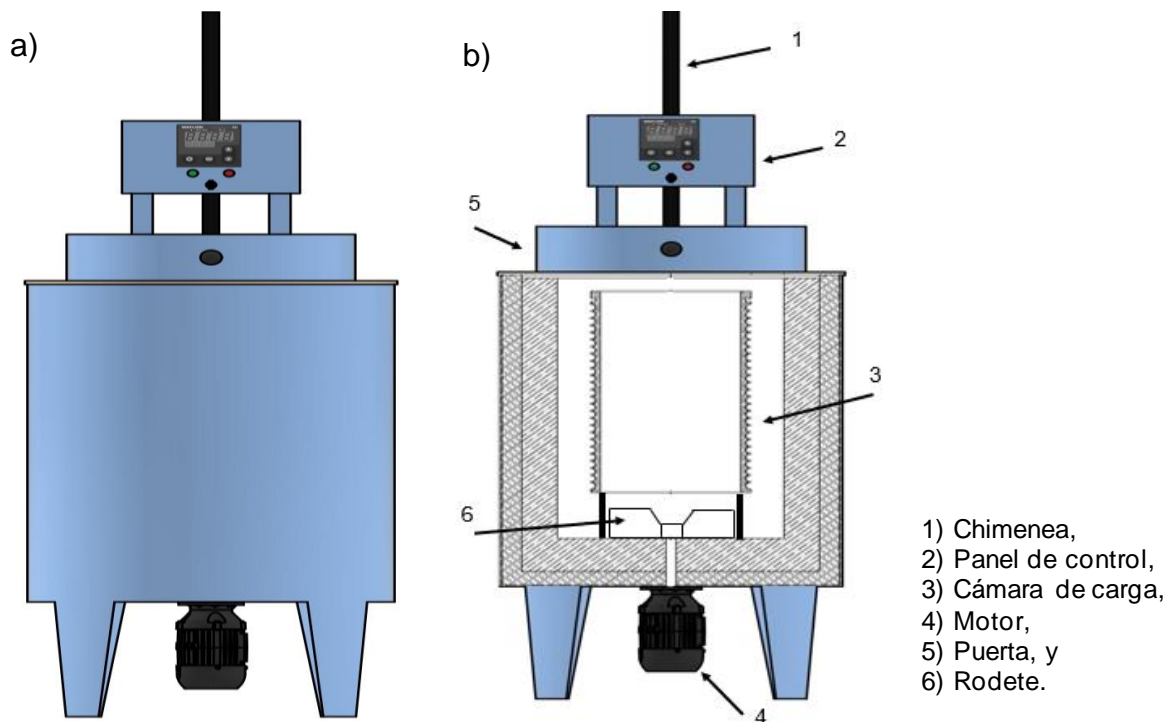


Fig. 2.2. Horno de nitruración rehabilitado: a) Vista frontal; b) Vista frontal con corte en la cámara de carga.

## **2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO**

Para realizar el cálculo de la carga térmica se necesita conocer ciertos parámetros de operación del horno de nitruración, por lo que es imprescindible evaluar los aspectos siguientes:

- a) Temperatura ambiente. Para dicha temperatura se tomará como referencia 27 °C.
- b) Temperatura de operación. Para la temperatura de operación se tomará 500 °C, ya que es la temperatura donde se alcanza una buena nitruración.
- c) Tiempo de realización del proceso. A nivel industrial es usual usar capas nitruradas de 2 mm, las cuales se alcanzan en ~17 h a 500 °C.
- d) Voltaje de operación. Se recurrirá a un voltaje a 220 V y un factor de potencia de 1.
- e) Carga de nitruración. Se pretende tener una carga total de nitruración de 8 kg, dividida en cuatro niveles de 2 kg cada uno.
- f) Valores despreciables. El calor necesario para aumentar la temperatura de los gases para realizar la nitruración será despreciable.
- g) Conductividad térmica. Se supondrá que la conductividad térmica de los componentes no varía en un intervalo de temperaturas. El error introducido debido a la suposición anterior resulta ser pequeño para esta aplicación.

## **2.2. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE CARGA**

Para realizar el cálculo de la carga térmica se debe considerar las condiciones geométricas y dimensionales, para así poder modelar de forma más pertinente el flujo de calor. Por lo que se necesita conocer cómo se distribuyen en la cámara de carga las capas de materiales que impiden la transferencia de calor, además del espesor con las que estas tienen, lo cual se puede observar en las Fig. 2.3 y Fig. 2.4.

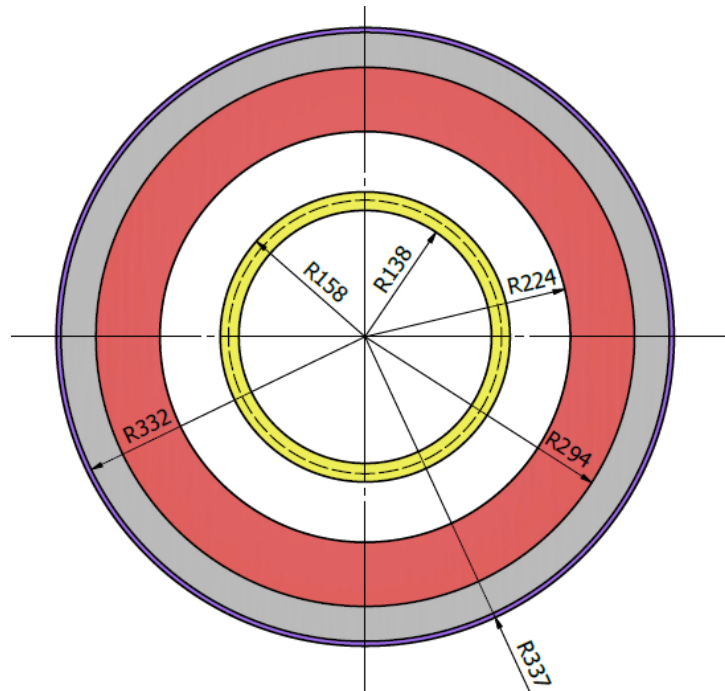


Fig. 2.3. Esquema sobre la disposición de las capas aislantes del horno con sus diámetros, dimensiones mm.

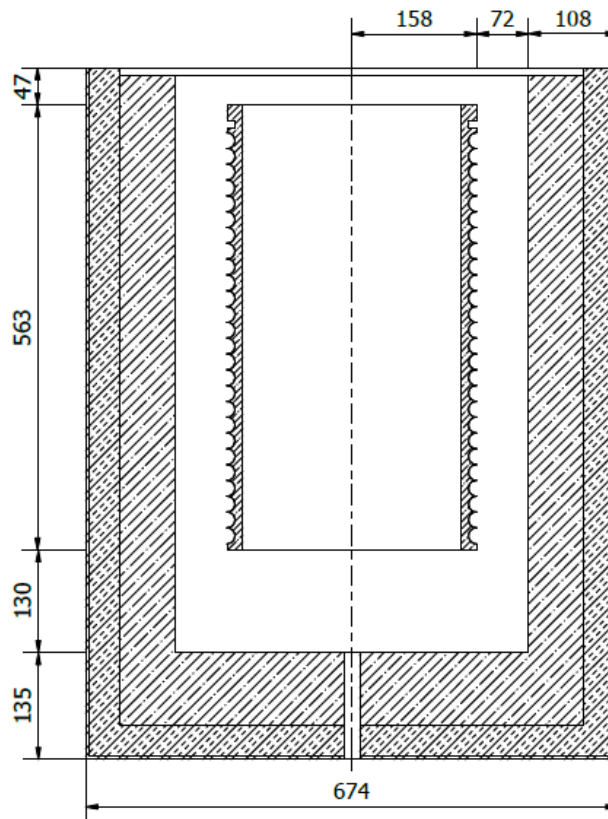


Fig. 2.4. Esquema de la Cámara de nitruración, dimensiones en mm.

## 2.3. CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DE NITRURACIÓN

Una vez que se han identificado los parámetros relevantes, es posible llevar a cabo el cálculo de la demanda energética requerida para calentar las piezas a nitrurar, así como también la determinación de las pérdidas de calor resultantes del proceso por la transferencia térmica dentro de la cámara.

### 2.3.1. ENERGÍA REQUERIDA PARA REALIZAR EL PROCESO DE NITRURACIÓN

Para iniciar se debe de tomar en consideración el calor necesario para incrementar la temperatura de la masa del elemento refractario, el cual debe llegar a la misma temperatura que las piezas a nitrurar. Por lo consiguiente, para determinar dicha energía ( $Q_{\text{refractario}}$ ), la cual se expresa por la Ec. 2.1 [14].

$$Q_{\text{refractario}} = m_{\text{refractario}} * C_{p,\text{refractario}} * \Delta T \quad (2.1)$$

donde:  $m_{\text{refractario}}$  es la masa del refractario de 21 kg;

$C_{p,\text{refractario}}$  es el calor específico del refractario con valor de 960 J/kg·K, y

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas, así  $T_o = 27 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_f = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sustituyendo en la Ec. 2.1, se obtiene que:

$$Q_{\text{refractario}} = 21 \text{ kg} * 960 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} * (500 - 27) = 9,536 \text{ kJ}$$

Para la siguiente etapa, se calcula la energía ( $Q_{\text{acero}}$ ) para calentar la carga de nitruración la cual consta de acero con alto contenido de cromo, ya que es el mejor para nitrurar como se especificó en el capítulo 1, la cual se expresa por la Ec. 2.2 [14].

$$Q_{\text{acero}} = m_{\text{acero}} * C_{p,\text{acero}} * \Delta T \quad (2.2)$$

donde:  $m_{\text{acero}}$  es la masa de acero a calentar para nitrurar, la cual es de 8 kg;  
 $C_{p,\text{acero}}$  es el calor específico del acero a nitrurar, con valor de 443 J/kg·K, y  
 $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas, así  $T_o = 27\text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_f = 500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Sustituyendo en la Ec. 2.2, se obtiene que:

$$Q_{\text{acero}} = 8 \text{ kg} * 443 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} * (500 - 27) = 1,676 \text{ kJ}$$

Además de ser necesario calcular la energía ( $Q_{\text{parrillas}}$ ) necesaria para calentar las parrillas en donde estarán colocadas las piezas a nitrurar, las cuales están hechas de níquel, para determinar dicha energía se determina a partir de Ec.2.3.

$$Q_{\text{parrillas}} = m_{\text{parrillas}} * C_{p,\text{acero inox.}} * \Delta T \quad (2.3)$$

donde:  $m_{\text{parrillas}}$  es la masa total de las parrillas, la cual es de 1.48 kg;  
 $C_{p,\text{níquel}}$  es el calor específico de las parrillas, con valor de 440 J/kg·K y  
 $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas, así  $T_o = 27\text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_f = 500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Sustituyendo en la Ec. 2.3, se obtiene que:

$$Q_{\text{parrillas}} = 1.48 \text{ kg} * 440 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} * (500 - 27) = 308 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, el calor ( $Q_{\text{total}}$ ) necesario para calentar tanto el material refractario y la carga a nitrurar, a la temperatura del proceso se expresa por la Ec. 2.4.

$$Q_C = Q_{\text{refractario}} + Q_{\text{acero}} + Q_{\text{parrillas}} \quad (2.4)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.4, se obtiene que:

$$Q_C = 9,536 \text{ kJ} + 1,676 \text{ kJ} + 308 \text{ kJ} = 11,520 \text{ kJ}$$

Esta es la cantidad de calor para elevar la temperatura del refractario y la carga hasta la temperatura de nitruración; no obstante, se debe de tomar en consideración las pérdidas que se dan en el proceso.

### 2.3.2. PERDIDAS DE CALOR

En condiciones de operación estables, con una temperatura interna de 500 °C, las pérdidas de calor representan la energía eléctrica extra que se debe proporcionar para que el horno opere a la temperatura del proceso, dichas pérdidas se originan en:

- Paredes laterales,
- Tapadera, y
- Fondo del horno.

Se destaca que las pérdidas por convección se producen en las paredes que están expuestas al aire del medio ambiente circundante. También, las pérdidas de calor por radiación en la superficie por la emisividad, más aún a altas temperaturas.

Aplicando la Ec. 2.5 para conducción de calor en paredes cilíndricas, desde la cámara hasta el material refractario, se tiene [15]:

$$Q_C = \frac{2\pi * k * L(T_i - T_e)}{\ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (2.5)$$

donde:  $Q_C$  es el flujo de calor necesario para elevar la temperatura;

$k$  es la conductividad térmica, el cual es igual a 1 W/m·K;

$L$  es la longitud del material refractario, el cual es igual a 0.563 m;

$T_i$  es la temperatura interior en la cámara la cual es igual a 500 °C;

$r_e$  es el radio exterior del horno, el cual es igual a 0.1575 m, y

$r_i$  es el radio interior del horno, el cual es igual a 0.1375 m.

Calculando  $Q_C$ , para 17 h bajo las consideraciones detalladas en el apartado de parámetros de diseño y selección de componentes anteriormente citado.

$Q_C = 188.24 \text{ W}$ , es el flujo de calor necesario para calentar la carga de nitruración y el material refractario a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Despejando  $T_e$  de la Ec. 2.5, se obtiene que:

$$T_e = T_i - \frac{Q_C * \ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi * k * L}$$

$$T_e = 773 - \frac{(188.24) \ln \frac{0.158}{0.138}}{2\pi * 1 * 0.563}$$

Sustituyendo, se tiene:

$$T_e = 780 \text{ K} = 507 \text{ }^\circ\text{C}$$

A continuación, se calculan las pérdidas en las partes del horno, así:

- Paredes: Es usual encontrar diseños de hornos que incluyen varias capas de pared, una capa es que les proporciona rigidez estructural, otra como aislante. En dichas capas se produce una transferencia unidireccional en dirección del radio del horno. Por lo consiguiente, se dará una transferencia de calor la cual se esquematiza en la Fig. 2.5. Por lo tanto, si las condiciones se cumplen, se puede utilizar la ecuación de transferencia de calor para estado estable, en la cual la pérdida de calor por conducción ( $Q_{\text{cond}}$ ) se obtiene a partir de la Ec. 2.6, así [14 y 16]:

$$Q_{\text{cond}} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.6)$$

donde: A es el área de la superficie de contacto, y  
 $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas.



Para pared cilindra la Ec. 2.6 se transforma en la Ec. 2.7, así:

$$Q_{\text{cond}} = -2\pi L \frac{\Delta T}{R} \quad (2.7)$$

donde: L es la longitud del horno, y

R es la resistencia térmica por capa del horno, la cual se expresa por la Ec. 2.8, así [15]:

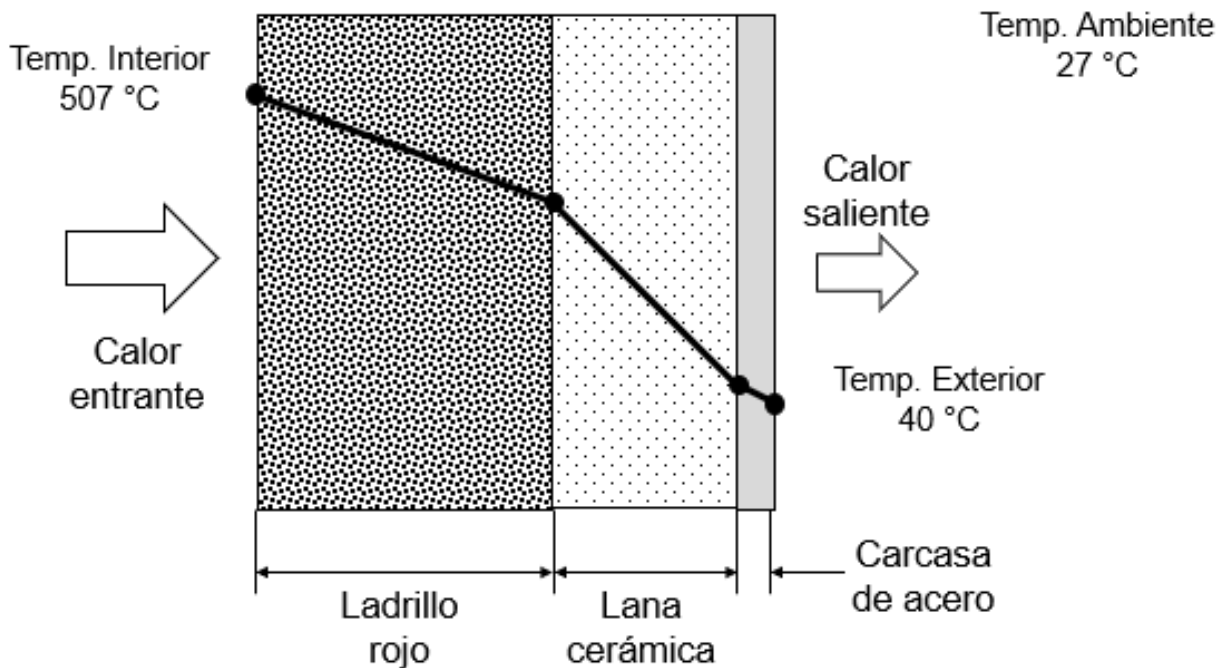


Fig. 2.5. Esquema que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno.

$$R = \frac{\ln \frac{R_e}{R_i}}{k} \quad (2.8)$$

donde:  $R_e$  es el radio externo de capa, y

$R_i$  es el radio interno de capa.

Por lo tanto, los valores de las resistencias por capa se determinan así:

Para el ladrillo rojo:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{0.294}{0.229}}{0.6 \frac{W}{m \cdot K}} = 0.42 \frac{m \cdot K}{W}$$

Para la capa de lana de cerámica:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{0.332}{0.294}}{0.3 \frac{W}{m \cdot K}} = 0.41 \frac{m \cdot K}{W}$$

Para carcasa metálica:

$$R_3 = \frac{\ln \frac{0.337}{0.332}}{50.2 \frac{W}{m \cdot K}} = 2.98 \times 10^{-4} \frac{m \cdot K}{W}$$

La transferencia de calor por convección es una combinación de los fenómenos de conducción térmica, movimientos de un fluido. El efecto de la convección se determina al conocer los coeficientes de transferencia de calor  $h$ , de las superficies. Para su cálculo se hacen las siguientes consideraciones:

- Se consideró una  $T_i$  de 500 °C
- Presión externa igual a la atmosférica.
- Temperatura de la carcasa metálica 40 °C

$$T_s = 40 \text{ °C}; T_o = 27 \text{ °C}$$

Interpolando en la Tabla 2.1, usando tablas de aire [15], las propiedades del aire a la  $T$  de película ( $T_p$ ):

$$T_p = T_s - T_o = 40 - 27 = 13 \text{ °C}$$

Tabla 2.1. Interpolación de propiedades del aire a  $T_f$ .

$T, ^\circ\text{C}$	$k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$Pr$
10	0.02439	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
13	0.02461	$1.452 \times 10^{-5}$	0.7328
15	0.02476	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323

$$k_{13^\circ\text{C}} = 0.02461 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$\nu_{13^\circ\text{C}} = 1.452 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr_{13^\circ\text{C}} = 0.733$$

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{286 \text{ K}}$$

El horno representa un cilindro de  $H \cong 740 \text{ mm} = 0.74 \text{ m}$ . Por lo tanto, se puede determinar el número de Grashof ( $G_{RL}$ ) por la Ec. 2.9, así [15]:

$$G_{RL} = \frac{g * \beta(T_s - T_o) * L_g^3}{\nu^3} \quad (2.9)$$

donde:  $G_{RL}$  es el número de Grashof;

$g$  es la aceleración gravitacional;

$\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica;

$T_s$  es la temperatura de la superficie;

$T_\infty$  es la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, y

$L_g$  es la longitud característica de la configuración geométrica.

$$T_s = 40^\circ\text{C} = 313 \text{ K} \quad T_o = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$$

$$T_p = 13^\circ\text{C} = 286 \text{ K} \quad \beta = \frac{1}{286 \text{ K}}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.9, se obtiene que:

$$G_{RL} = \frac{9.81 * \frac{1}{286} * (313 - 300) * (0.740)^3}{(1.452 \times 10^{-5})^2} = 8571\ 054,131$$

Además, verificando si el cilindro se puede analizar como placa vertical en la Ec. 2.10 [15]:

$$D \geq \frac{35L_g}{G_{RL}^{1/4}} \quad (2.10)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.10, se obtiene que:

$$0.675 \geq \frac{35 * 0.740}{(8571\ 054,131)^{1/4}}$$

$$0.675 \geq 0.151$$

Por lo consiguiente, en vista que la relación anterior se cumple, se puede analizar como placa vertical; por lo que, se puede obtener el número de Rayleigh ( $R_{aL}$ ) por la Ec. 2.11 [15].

$$R_{aL} = G_{RL} * P_R \quad (2.11)$$

donde:  $P_R$  es el número de Prandtl.

Sustituyendo en la Ec. 2.11, se obtiene que:

$$R_{aL} = 8571\ 054,131 * 0.733 = 6281\ 049,267$$

En el caso de una placa vertical el número de Nusselt ( $N_u$ ) se determina a partir de la Ec. 2.12 [15]:

$$N_u = \left( 0.825 + \frac{0.387(R_a)^{1/6}}{\left(1 + (0.492/P_r)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2 \quad (2.12)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.12, se obtiene que:

$$N_u = \left( 0.825 + \frac{0.387(628,049,267)^{1/6}}{\left(1 + (0.492/0.7328)^{9/16}\right)^{8/27}} \right)^2$$

$$N_u = 106.94$$

El número de Nusselt también es igual a la Ec. 2.13 [15]:

$$N_u = \frac{h * L_g}{k} \quad (2.13)$$

donde: h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Por lo tanto, al despejar h de la Ec. 2.13, se obtiene:

$$h = \frac{N_u * k}{L_g} = \frac{106.94 * 0.02461}{0.740} = 3.56 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con esto se puede determinar la resistencia por convección con la Ec. 2.14 [15]:

$$R = \frac{1}{hA_s} \quad (2.14)$$

donde:  $A_s$  es el área superficial de la pared del cilindro =  $\pi * D_{ext} * L_h$ ,

$D_{\text{ext}}$  es el diámetro externo del horno que es de 0.674 m, y  
 $L_h$  es la longitud del horno que es de 0.740 m.

Sustituyendo en la Ec. 2.14, se obtiene que:

$$R_4 = R_{\text{conv}} = \frac{1}{\pi * 0.740 * 0.674 * 3.56} = 0.1793 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La transferencia de calor por las paredes mediante conducción se calcula con la Ec. 2.7 [15]:

$$Q_{\text{cond}} = -2\pi L \frac{\Delta T}{R} = 2\pi * 0.740 * \frac{507 - 40}{0.42 + 0.41 + 2.98 \times 10^{-4}}$$

$$Q_{\text{cond,pared}} = 2,615 \text{ W}$$

La transferencia de calor por las paredes mediante convección se determina con la Ec. 2.15, lo cual es [11]:

$$Q_{\text{conv}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{conv}}} \tag{2.15}$$

$$Q_{\text{conv,pared}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{conv}}} = \frac{40 - 27}{0.1793} = 72.50 \text{ W}$$

donde:  $R_{\text{conv}}$  es la resistencia de convección de la pared.

Finalmente, se puede determinar la transferencia de calor por radiación mediante la Ec 2.16 [15].

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \tag{2.16}$$

donde:  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie, la cual es igual a 0.35;

$A_s$  es el área superficial de la pared del cilindro  $=\pi * D_{ext} * L_h$ , y

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, la cual es igual a  $5.67 \times 10^{-8}$ .

La emisividad de la superficie se determina al considerar que la superficie de la carcasa metálica está cubierta de una capa de pintura anticorrosiva resistente al calor, así la emisividad común para este tipo de pinturas está dada entre 0.35 y 0.40.

Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 2.16, se obtiene que [15]:

$$Q_{rad,pared} = \pi * 0.35 * 0.740 * 0.674 * 5.67 \times 10^{-8} * ((313)^4 - (300)^4)$$

$$Q_{rad,pared} = 46.58 \text{ W}$$

La cantidad de calor absorbido por las paredes laterales se calcula como la suma del calor transferido desde el interior de la cámara de nitruración hacia el exterior, más la transferencia de calor hacia el ambiente a través de las paredes laterales. Esta última se obtiene al sumar las contribuciones individuales de las pérdidas por convección y radiación. Para realizar este cálculo, se puede utilizar la Ec. 2.17:

$$Q_{total,pared} = Q_{cond,pared} + Q_{conv,pared} + Q_{rad,pared} \quad (2.17)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.17, se obtiene que:

$$Q_{total,pared} = 2,615 + 72.50 + 46.58 = 2,734 \text{ W}$$

Una vez obtenidas las pérdidas por las paredes, se procede a obtener las pérdidas por la tapadera.

- Tapadera: La tapadera del horno representa también una sección donde ocurren pérdidas porque está en contacto con el amoníaco disociado caliente que está

circulando. Por lo consiguiente las pérdidas en la tapadera de puede aplicar directamente la Ec. 2.6 [14 y 16]:

Sustituyendo en la Ec. 2.6, se obtiene:

$$Q_{\text{cond,tapadera}} = \frac{\frac{\pi}{4} * (0.53)^2 * (500 - 27)}{\frac{0.005}{50.2} + \frac{0.08}{0.6} + \frac{0.038}{0.3} + \frac{0.005}{1}}$$

$$Q_{\text{cond,tapadera}} = 394 \text{ W}$$

En el caso de las pérdidas por convección natural, se tiene que la tapadera representa un disco circular que en composición es igual que la pared y tiene un espejo. Por lo tanto, para determinar el coeficiente convectivo se puede aplicar la Ec. 2.18 [15]:

$$h_{\text{tapadera}} = 1.32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (2.18)$$

donde:  $h_{\text{tapadera}}$ , es el coeficiente convectivo de la tapadera,

L es la longitud, el cual es igual para discos circulares  $L=0.9D$ , y

$\Delta T$  es el cambio de temperatura.

Sustituyendo en la Ec. 2.18, se obtiene que:

$$h_{\text{tapadera}} = 1.32 \left( \frac{40 - 27}{0.9 * 0.53} \right)^{1/4}$$

$$h_{\text{tapadera}} = 3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Las pérdidas por convección en la tapadera se calculan con la Ec. 2.15.

Sustituyendo en la Ec. 2.15, se obtiene que:



$$Q_{\text{conv,tapadera}} = \frac{40 - 27}{\frac{1}{3 * \left( \frac{\pi}{4} (0.53)^2 + \pi(0.53)(0.128) \right)}}$$

$$Q_{\text{conv,tapadera}} = 10 \text{ W}$$

Para las pérdidas ocasionadas por la radiación de la tapadera hacia el medio ambiente, se toman las mismas consideraciones para calcular esta parte en las paredes del horno, se puede aplicar la Ec. 2.16:

Sustituyendo en la Ec. 2.16, se obtiene que:

$$Q_{\text{rad,tapadera}} = 0.35 * \left( \frac{\pi}{4} (0.53)^2 + \pi(0.53)(0.128) \right) * 5.67 \times 10^{-8} * ((313)^4 - (300)^4)$$

$$Q_{\text{rad,tapadera}} = 13 \text{ W}$$

La cantidad de calor absorbido por la tapadera se calcula como la suma del calor transferido desde el interior de la cámara de nitruración hacia el exterior, más la transferencia de calor hacia el ambiente a través de la tapadera. Esta última se obtiene al sumar las contribuciones individuales de las pérdidas por convección y radiación. Para realizar este cálculo, se puede utilizar la Ec. 2.17:

$$Q_{\text{total,tapadera}} = 394 + 10 + 13 = 417 \text{ W}$$

- Base del horno: la base del horno presenta también una serie de pérdidas importantes en el proceso y como también al igual que la tapadera representa una placa plana circular. Por lo consiguiente las pérdidas en la tapadera de puede aplicar directamente la Ec. 2.6 [14 y 16]:

$$Q_{\text{cond,base}} = \frac{\frac{\pi}{4} * (0.674)^2 * (500 - 27)}{\frac{0.005}{50.2} + \frac{0.092}{0.6} + \frac{0.038}{0.3}}$$

$$Q_{\text{cond,base}} = 603 \text{ W}$$

Para el cálculo de las pérdidas por convección natural, primero se tendría que encontrar el coeficiente convectivo para lo cual se puede aplicar la Ec. 2.18 [15]:

$$h_{\text{base}} = 1.32 \left( \frac{40 - 27}{0.9 * 0.674} \right)^{1/4}$$

$$h_{\text{base}} = 2.84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Las pérdidas por convección en la base del horno se calculan con la Ec. 2.15. Sustituyendo en la Ec. 2.15, se obtiene que:

$$Q_{\text{conv,base}} = \frac{40 - 27}{\frac{1}{2.84 * \left( \frac{\pi}{4} (0.674)^2 + \pi(0.674)(0.135) \right)}}$$

$$Q_{\text{conv,base}} = 7 \text{ W}$$

Para las pérdidas ocasionadas por la radiación en la base del horno hacia el medio ambiente, se toman las mismas consideraciones para calcular esta parte en las paredes del horno, se puede aplicar la Ec. 2.16:

Sustituyendo en la Ec. 2.16, se obtiene que:

$$Q_{\text{rad,base}} = 0.35 * \left( \frac{\pi}{4} (0.674)^2 + \pi(0.674)(0.135) \right) * 5.67 \times 10^{-8} * ((313)^4 - (300)^4)$$

$$Q_{\text{rad,base}} = 13 \text{ W}$$

La cantidad de calor absorbido por la base del horno se calcula como la suma del calor transferido desde el interior de la cámara de nitruración hacia el exterior, más la transferencia de calor hacia el ambiente a través de la base del horno. Esta última se obtiene al sumar las contribuciones individuales de las pérdidas por convección y radiación. Para realizar este cálculo, se puede utilizar la Ec. 2.17:

$$Q_{\text{base, total}} = 603 + 7 + 13 = 623 \text{ W}$$

Por lo que, los requerimientos de calor del horno pueden ser expresados por la Ec. 2.19.

$$Q_{\text{TOTAL}} = Q_{\text{tapadera, total}} + Q_{\text{pared, total}} + Q_{\text{base, total}} + Q_{\text{C}} \quad (2.19)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.19, se obtiene que:

$$Q_{\text{TOTAL}} = 417 + 2,734 + 623 + 88.24 = 3,963 \text{ W.}$$

## 2.4. DISEÑO DE SUMINISTRO DE ENERGÍA

Para poder diseñar el componente que suministrará la energía en forma de calor que se necesita para realizar el proceso de nitruración, es indispensable conocer parámetros importantes, como el consumo de calor, el cual se realizó en los apartados anteriores. Lo cual define en gran medida ciertas propiedades que debe cumplir la resistencia eléctrica, además de otros parámetros geométricos necesarios para el acoplamiento de la resistencia en la cámara de nitruración.

### 2.4.1. DISEÑO DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

Cuando se calienta por resistencia eléctrica, el elemento puede alcanzar temperaturas muy altas. La temperatura más alta alcanzada es aquella a la que la energía térmica se disipa al mismo ritmo que se libera. En otras palabras, el diseño de los elementos eléctricos está determinado por el flujo de calor que se puede disipar en el material.

El equivalente térmico de la potencia suministrada a los elementos es igual al consumo de calor del horno (calor de carga más pérdidas de calor). El consumo de calor se estimó en 3,963 W en la sección anterior.

Si se conoce la tensión eléctrica de la línea, en el cálculo de la resistencia eléctrica se deben considerar muchas variables, tales como sección, superficie, longitud, separación, tensión y la superficie que cubrirá la resistencia.

Según las dimensiones del horno la altura de calentamiento es de 56.3 cm, el diámetro del material refractario donde va montada la resistencia tiene un valor de 31.5 cm, el área en la que se distribuirá la resistencia está dada por la Ec. 2.20.

$$A_{\text{res}} = \pi D * h \quad (2.20)$$

donde:  $A_{\text{res}}$  es el área que cubrirá la resistencia eléctrica,

$D$  es el diámetro del elemento refractario donde ira instalada la resistencia, y

$h$  es la altura del elemento refractario.

Sustituyendo en la Ec. 2.20, se obtiene que:

$$A_{\text{res}} = 0.563\pi * 0.315 = 0.557 \text{ m}^2$$

Según los parámetros de diseño la alimentación será bifásica con dos hilos, a 220 V. Por lo tanto, para determinar el valor de la corriente de la resistencia se expresa por la Ec. 2.21.

$$P = V * I * \cos \varphi \quad (2.21)$$

donde: P es la potencia suministrada a la resistencia eléctrica, la cual es 3,960 W;

V es el voltaje de operación de la resistencia, el cual es igual a 220 V;

I es la corriente, y

$\cos \varphi$  es el factor de potencia, el cual tiene un valor de 1.

Sustituyendo en la Ec. 2.21, se obtiene que:

$$I = \frac{P}{V * \cos \varphi} = \frac{3,963}{220 * 1} = 18 \text{ A}$$

Para determinar el valor resistivo con éste, se debe contar con el elemento para disipar la energía suministrada en calor, el cual se expresa por la Ec. 2.22.

$$P = R * I^2 \quad (2.22)$$

donde: R es el valor resistivo.

Sustituyendo en la Ec. 2.22, se obtiene que:

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{3,963}{(18)^2} = 12.23 \text{ W}$$

Sobre la base de la disponibilidad de material para resistencia termoeléctrica existente en el país, y a las propiedades necesarias para la potencia energética del homo se seleccionó Nifethal 70, es una aleación de níquel-hierro para usar a temperaturas de hasta 600 °C. La aleación se caracteriza por una resistividad muy baja y un coeficiente de resistencia a altas temperaturas. [16].

En la

Tabla 2.2 se representa las propiedades importantes del alambre seleccionado para la construcción de la resistencia.

Tabla 2.2. Características del alambre Nifethal 70 [16].

Característica	Valor
Diámetro, mm	1.8
Resistencia, $\Omega/m$ , a 20 °C	0.0786
Resistividad $cm^2/\Omega$ , a 20 °C	719

Con estos datos se puede calcular la longitud del alambre necesario para construir la resistencia, se puede aplicar la Ec. 2.23 [16].

$$\frac{\Omega}{m} = \frac{R}{L} \quad (2.23)$$

donde:  $\Omega/m$  es el valor de la resistencia por unidad de longitud, y  
L es la longitud del alambre necesario.

Sustituyendo en la Ec. 2.23, se obtiene que:

$$L = \frac{R}{\Omega/m} = \frac{12.23}{0.0786} = 156 \text{ m}$$

Para el diseño de resistencias eléctricas existen ciertas reglas, las cuales son:

- a) El diámetro de las espiras debe estar comprendido entre 6 a 8 veces el diámetro del alambre y se puede expresar por la Ec. 2.24 [16].

$$D = 8d \quad (2.24a)$$

$$D = 6d \quad (2.24b)$$

donde: D es el diámetro de las espiras; y

d es el diámetro del alambre, el cual es de 1.8 mm.

Para el diseño de la resistencia se determinó por el espacio con el que se dispone el material refractario del horno, ya que este tiene un canal para la resistencia de 2.5 cm, por lo que al tener un diámetro de espira 8 veces mayor que el diámetro del alambre se aprovecha dicho espacio.

Sustituyendo en la Ec. 2.24a, se obtiene que:

$$D = 8 * 1.8 = 14.4 \text{ mm}$$

b) El espacio entre una espira y la siguiente debe ser por lo menos una vez el diámetro del alambre, pero en lo posible, se debe calcular a 2.25 veces el diámetro del alambre, tal como se presenta en la Fig. 2.6 y la expresión Ec. 2.25 [16].

$$S = 2.25d \quad (2.25)$$

donde: S es el espacio entre espira y alambre.

Sustituyendo en la Ec. 2.25, se obtiene que:

$$S = 2.25 * 1.8 = 4 \text{ mm}$$

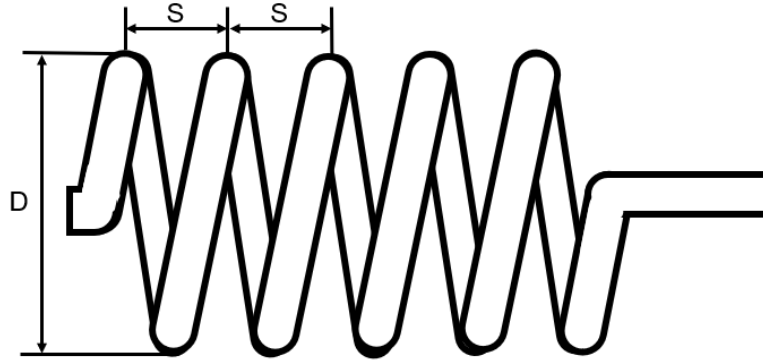


Fig. 2.6. Dimensiones de las espiras.

- c) La longitud de una bobina simple es igual al producto del diámetro del mandril más el diámetro del alambre multiplicado por  $\pi$ , tal como se expresa en la Ec. 2.26 [16].

$$l = \pi(D + d) \quad (2.26)$$

donde:  $l$  es la longitud de la bobina.

Sustituyendo en la Ec. 2.26, se obtiene que:

$$l = \pi(14.4 + 1.8) = 50.90 \text{ mm}$$

- d) El número de bobinas será igual al total de alambre dividido entre la longitud de la bobina, como se expresa en la Ec. 2.27 [16].

$$N = \frac{L}{l} \quad (2.27)$$

donde:  $N$  es el número de espiras.

Sustituyendo en la Ec. 2.27, se obtiene que:

$$N = \frac{156,000}{50.90} \approx 3,065 \text{ espiras}$$



e) Para calcular la vida útil de la resistencia (en horas), se utiliza la Ec. 2.28:

$$V_{\text{útil}} = \frac{E_a}{P_d} \quad (2.28)$$

donde:  $V_{\text{útil}}$  es la vida útil de la resistencia;

$E_a$  es la energía acumulada expresada por  $P * t$  (tiempo) , y

$P_d$  es la potencia disipada por la resistencia, con un valor de 3,963 W.

Sustituyendo en la Ec. 2.28, se obtiene que:

$$V_{\text{útil}} = \frac{3,963 * 17 * 3,600}{3,963} = 61,200 \text{ h}$$

La vida útil de la resistencia es aproximadamente igual a 61,200 h , ya que se debe de tener en consideración que este cálculo es una estimación y no se ha tenido en cuenta otros factores que pueden afectar la vida útil de la resistencia, como son las variaciones de temperatura y la calidad del material de la resistencia.

## 2.4.2. ELABORACIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

La fabricación de la resistencia eléctrica de alambre Nifethal 70, es un proceso que demanda atención y exactitud, dado que la resistencia debe ser capaz de mantenerse a la temperatura de operación y ofrecer una resistencia eléctrica específica. A continuación, se detallan los pasos generales para la elaboración de dicha resistencia destinada al horno:

1. Diseño de la resistencia: Determina la longitud y la resistencia eléctrica requerida para el horno, en el apartado anterior se puede proseguir con la construcción.
2. Corte del alambre: Cortar el alambre de Nifethal 70 a la longitud especificada en el diseño (156 m), asegurándose de que el alambre este limpio y sin residuos que puedan afectar su conductividad.

3. Enrollado del alambre: Enrollar el alambre alrededor del mandril de manera uniforme (Dicho mandril se puede realizar de una barra acero con un diámetro equivalente al diámetro de la resistencia, el cual tiene un valor de 14.4 mm y para realizar el enrollado, se puede utilizar un torno en donde se debe montar la barra de acero que servirá como mandril guía en donde se enrollará el alambre. En donde las rpm del torno deben de ser las más bajas posibles para controlar de mejor manera el espaciamiento y calidad de las espiras). Asegurarse de que las vueltas respeten las distancias de diseño para lo cual se puede usar un calibrador vernier, de modo a conseguir las 3,065 espiras.
4. Conectar los extremos: Conectar los extremos de la resistencia a un conector eléctrico adecuado que resista altas temperaturas, para lo cual se recomienda un terminal plano de níquel. Esto permitirá que la resistencia se conecte con los cables de alimentación de manera segura.
5. Probar la resistencia: Antes de instalar la resistencia en el horno, realizar pruebas para asegurarse que funcione adecuadamente. Utilizar un multímetro para medir la resistencia, corriente y otros parámetros importantes que pueden influir en su funcionamiento.

### 3. DISEÑO DE SISTEMAS AUXILIARES

El diseño de sistemas auxiliares es una parte esencial en la rehabilitación del horno de nitruración, ya que estos sistemas desempeñan un papel crucial en el funcionamiento eficiente y seguro del horno. Los sistemas auxiliares incluyen una amplia variedad de componentes y dispositivos, como sistemas de control de temperatura, sistemas de agitación y sellado de la atmósfera, entre otros.

En este capítulo, se presenta el diseño detallado de los sistemas auxiliares para el horno. El diseño se basa en la evaluación e inspección detallada (ver Fig. 3.1) de los requisitos técnicos y operativos del horno, así como en la identificación de los problemas técnicos que requieren atención y la selección de soluciones técnicas viables para abordar estos problemas.



Fig. 3.1. Inspección del panel de control de temperatura existente en el horno.

Además, se discuten las consideraciones de seguridad y protección ambiental asociadas con la operación del horno.

También, el capítulo incluye detalles sobre los componentes y dispositivos específicos utilizados en el diseño de los sistemas auxiliares, así como los cálculos realizados para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro del horno.

En resumen, este capítulo presenta un diseño detallado de los sistemas auxiliares para el horno de nitruración gaseosa, asegurando el correcto funcionamiento del horno.

### 3.1. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

En esta sección, se presentará en detalle la propuesta de diseño del sistema de control de temperatura para un horno de nitruración.

Como parte del diseño de control de temperatura se realizó, una inspección detallada de las instalaciones donde se pretende hacer la instalación del horno de nitruración (el lugar donde se pretende instalar es el Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica), en donde se pudo observar la necesidad de cambiar ciertos componentes del sistema eléctrico del lugar, entre los cuales se observó que el en panel general (ver Fig. 3.2 ) se requiere un interruptor termomagnético nuevo, ya que el actual presenta un deterioro por el uso.

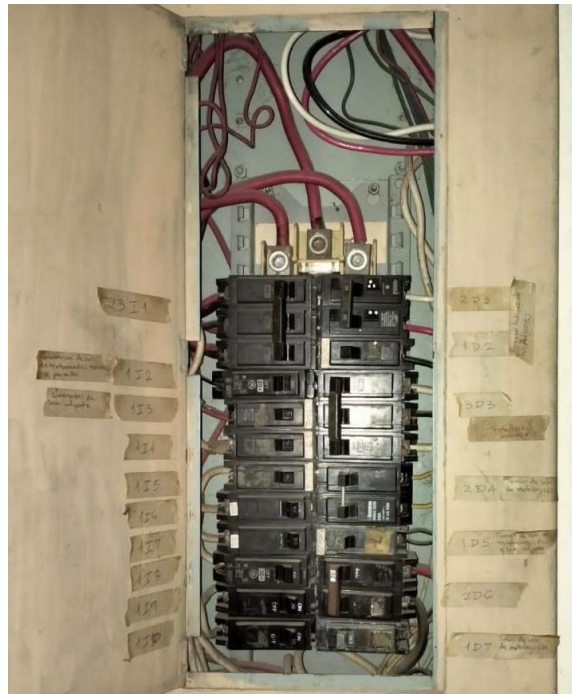


Fig. 3.2. Panel general del Laboratorio de Tratamientos Térmicos.

Además de que en el lugar opera otro horno de tratamientos térmicos (ver Fig. 3.3) el cual recibe alimentación trifásica pero se pudo constatar que el alimentador

hembra no se encuentra en las mejores condiciones (ver Fig. 3.4), además hay que considerar si existe la necesidad de instalar otro (alimentador hembra) para el horno de nitruración o reparar el existente ya que al consultar con la persona encargada del laboratorio indicó que es poco probable que los dos hornos operen simultáneamente.

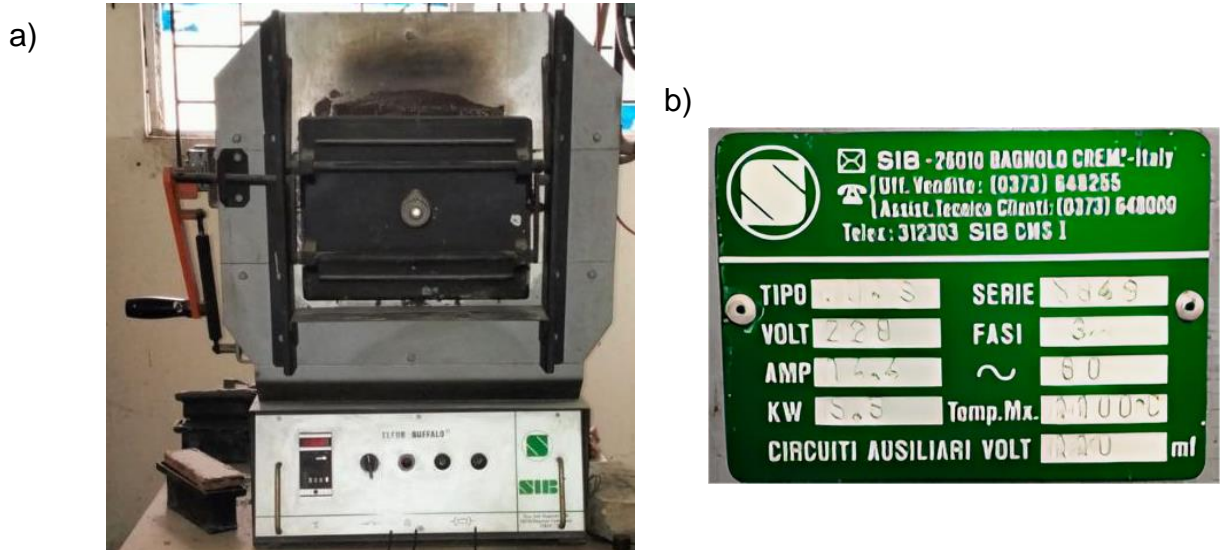


Fig. 3.3. Horno de tratamientos térmicos ubicado en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos: a) Vista frontal; b) Viñeta de referencia.



Fig. 3.4. Alimentador hembra.

Posterior a la inspección y recopilación de información para el diseño del panel de control, se explicará el funcionamiento del sistema de control de temperatura que permitirá mantener un intervalo específico de temperaturas requeridas para llevar a cabo el proceso de nitruración de manera eficiente. Se abordarán los métodos y estrategias utilizadas, como el control PID, para regular y estabilizar la temperatura en la cámara del horno.

En la segunda sección, se llevará a cabo la selección y descripción de los componentes que formarán parte integral del sistema de control de temperatura. Se analizarán las características técnicas de cada componente, como sensores de temperatura, actuadores, controladores y relés, y se detallarán las conexiones eléctricas necesarias para su correcto funcionamiento.

En la última sección, se presentarán los elementos seleccionados que son esenciales para la construcción y puesta en marcha del sistema de control de temperatura para el horno de nitruración. Esto incluirá los componentes físicos, como sensores, actuadores y controladores, así como las consideraciones técnicas y prácticas para su instalación y operación eficiente.

### **3.1.1. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

Se han evaluado varias alternativas para el control de la temperatura de nitruración en la cámara del horno. La mejor opción es un control electrónico basado en un controlador PID. Este tipo de control ofrece una interfaz gráfica de usuario intuitiva y fácil de aprender para el operador, además de ser económico y autónomo. Esto garantiza una precisión óptima en las tareas de control de temperatura.

El sistema de control utiliza una lógica de encendido/apagado para controlar una resistencia eléctrica calefactora. Esto asegura un intervalo de temperaturas adecuado para el proceso de nitruración. La resistencia se ubicará en el interior de la cámara del horno, permitiendo un calentamiento controlado y uniforme del ambiente, para lograr los resultados deseados.

Aquí hay algunos beneficios adicionales de usar un control electrónico basado en un controlador PID para el control de temperatura de nitruración:

- Mayor precisión: el controlador PID puede mantener la temperatura dentro de una ventana estrecha, lo que es esencial para el proceso de nitruración.
- Mayor repetibilidad: el controlador PID puede garantizar que el proceso de nitruración se realice de manera consistente cada vez, lo que es importante para garantizar la calidad del producto.
- Mayor eficiencia energética: el controlador PID puede apagar la resistencia calefactora cuando no es necesaria, lo que ayuda a ahorrar energía.

En general, un control electrónico basado en un controlador PID es la mejor opción para el control de temperatura de nitruración en la cámara del horno. Ofrece una serie de beneficios, como mayor precisión, repetibilidad, eficiencia energética y facilidad de uso.

### **3.1.2. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL**

El control de temperatura se logra mediante la integración de periféricos que se conectan al controlador PID fabricado por WATLOW, perteneciente a la serie SD y con el modelo 1/4 DIN. Estos periféricos son esenciales para el sistema de control de temperatura y se describen a continuación:

#### **a) Controlador WATLOW modelo 1/4 DIN, serie SD.-**

El controlador PID de la marca WATLOW (ver Fig. 3.5), representa una solución confiable y robusta para regular la temperatura en la operación de hornos de nitruración como es en este caso. Su principal ventaja radica en su capacidad para ajustar automáticamente la potencia y el tiempo de calentamiento según las necesidades del proceso, con el objetivo de mantener la temperatura en el punto deseado de manera continua.

Un beneficio adicional del controlador PID de WATLOW, modelo 1/4 DIN, serie SD, es su capacidad para interactuar y permitir la conexión con otros periféricos, ya que posee una capacidad de programar 3 alarmas tanto de baja como en alta temperatura,

las cuales están ligadas al proceso de calentamiento. Los periféricos que se planean incluir son una termocupla y una alarma auditiva (buzzer).

En este contexto en específico de la rehabilitación del horno de nitruración, la incorporación de este controlador ofrece la promesa de un proceso optimizado, con resultados más uniformes y de mayor calidad en la producción de productos nitrurados.



Fig. 3.5. Controlador WATLOW modelo 1/4 DIN, serie SD.

#### b) Interruptor termomagnético.-

Dentro del marco de la rehabilitación de un horno de nitruración, es de suma importancia garantizar la seguridad y la protección del equipo. Un componente crucial que puede incorporarse como medida de protección es el interruptor termomagnético (ver Fig. 3.6).

Los interruptores termomagnéticos, se pretenden instalar en las líneas eléctricas que alimenta el horno de nitruración bajo el criterio de consumo de corriente eléctrica, se han seleccionado valores de amperajes para los interruptores que puedan proteger las cargas a las cuales estarán sometidos (resistencia eléctrica, el motor acoplado al rodete que agita la atmósfera y otros componentes que conforman el sistema de control de temperatura) que es este caso son uno de dos polos a 20 A y otro de 16 A, a un solo polo. Esto contribuiría a mantener la integridad del horno y a prevenir situaciones de



emergencia que podrían tener consecuencias graves para la operación y la seguridad del personal involucrado.

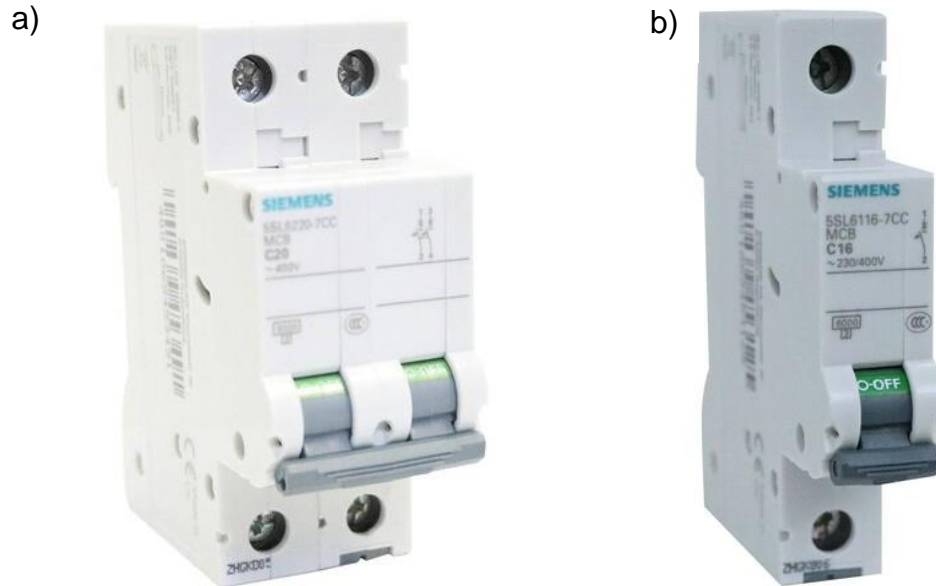


Fig. 3.6. Interruptor termomagnético: a) Dos polos, 20 A; b) Un polo, 16 A.

### c) Contactor.-

Uno de los componentes clave para controlar el suministro de corriente eléctrica será el contactor (ver Fig. 3.7), que de igual manera su selección depende de la carga al que este estará sometido la cual rondaría unos 22 A y para ello se seleccionó uno de 25 A trifásico, con un voltaje de bobina de 120 V en corriente alterna y un contacto normalmente abierto que servirá para controlarlo. El contactor se convierte también en un componente fundamental para el control preciso de la temperatura en el proceso de nitruración. Al estar incluido en el panel de control de temperatura del horno, el contactor se activa y desactiva mediante señales eléctricas, lo que permite al operador tener un control total sobre la potencia entregada a la resistencia calefactora y el motor. Esto, a su vez, se traduce en la habilidad de ajustar y mantener la temperatura del horno en el punto deseado.

El uso del contactor en este contexto también proporciona ventajas adicionales, como la protección contra sobrecargas eléctricas. Si se produce una situación de sobrecarga o una fluctuación significativa en el suministro eléctrico, el contactor está

equipado con características de protección para interrumpir la corriente y evitar daños en la resistencia y otros componentes del sistema eléctrico.



Fig. 3.7. Contactor 25 A, 120 V (CA), 1NO AC3.

d) Termopar o termocupla.-

En el sistema, se ha seleccionado una termocupla tipo K (ver Fig. 3.8) para su implementación, y esto se debe a sus propiedades y ventajas específicas. La termocupla tipo K es especialmente adecuada para entornos con atmósferas oxidantes, como podría ser el caso de un proceso que involucra el uso de amoníaco.



Fig. 3.8. Termocupla tipo K.

Una de las ventajas clave de la termocupla tipo K es su capacidad para funcionar de manera eficiente en condiciones oxidantes, lo que garantiza su estabilidad y precisión en entornos donde otros sensores se podrían ver afectados negativamente. Esto es esencial para mantener la confiabilidad del sistema de medición de temperatura en

ambientes de alta reactividad química. Es por eso que en la Tabla 3.1, se detallan algunas características importantes que posee esta termocupla.

Tabla 3.1. Características de la termocupla Tipo K.

Calibración	Elemento positivo	Elemento negativo	Intervalo de temperatura habitual, °C	Línea de error estándar (elegir la más grande)	Línea de error especial (elegir la más grande)
Tipo K	Cromel	Alumel	0 a 1200	$\pm 2.2\text{ °C}$ o $\pm 2.0\%$	$\pm 1.1\text{ °C}$ o $\pm 0.4\%$

e) Pulsadores y maneta.-

La incorporación de pulsadores y una manetas en el panel de control de temperatura de del horno, representa un avance significativo en términos de seguridad, usabilidad y eficiencia en el manejo de este equipo. Estos elementos de interfaz ofrecen una serie de ventajas que contribuyen a mejorar el rendimiento del horno y a proteger la integridad del personal involucrado en el proceso.

Los pulsadores ejecutarán funciones específicas, como iniciar el proceso de nitruración, para lo cual se pretende usar un pulsador de color verde (ver Fig. 3.10) normalmente abierto (NA) y otro de color rojo (ver Fig. 3.9) normalmente cerrado (NC) para detenerlo. Gracias a esta funcionalidad, el operador del horno tendrá un control más directo sobre el funcionamiento del equipo, lo que facilita la configuración y evita la necesidad de maniobrar con herramientas externas o procedimientos complejos.

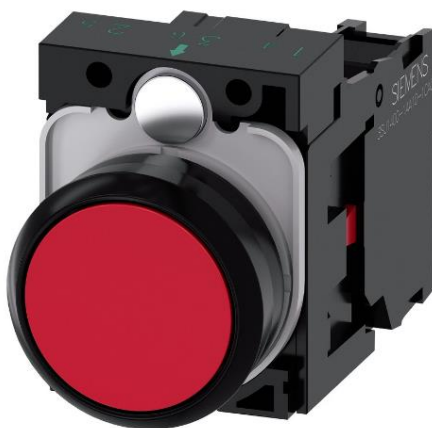


Fig. 3.9. Pulsador rojo (NC).



Fig. 3.10. Pulsador verde (NA).

Por otro lado, la inclusión de una maneta giratorias (ver Fig. 3.11) en el panel de control brinda una experiencia de uso más intuitiva y ergonómica, a la hora de encender o apagar el motor, el cual con la ayuda de un rodete hacen circular la atmosfera de amoníaco dentro de la cámara de nitruración en donde están las piezas. La ergonomía en el diseño del panel de control mejora la eficiencia operativa, ya que el personal puede interactuar con el horno de manera más cómoda y natural, lo que reduce la fatiga y aumenta la productividad.

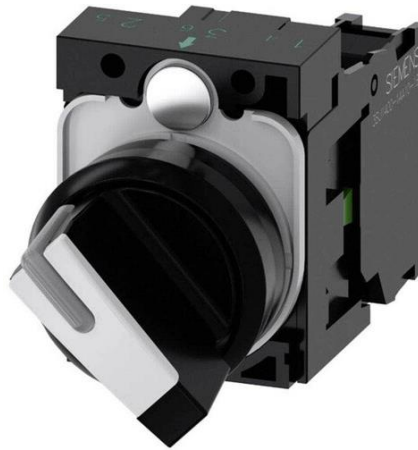


Fig. 3.11. Maneta 2 posiciones 1 NA.

Además, al usar la maneta y los pulsadores bien identificados y etiquetados de manera clara contribuye a una operación más segura, especialmente en situaciones de emergencia. Los operadores pueden accionar los dispositivos de manera rápida y precisa para detener el proceso en caso de ser necesario, protegiendo así tanto el equipo como a las personas involucradas.

f) Resistencia eléctrica (cable calefactor) y relé.-

En la Fig. 3.12, se presenta la resistencia calefactora que ha sido seleccionada para su implementación en el sistema. Esta resistencia está fabricada con un material conocido como Nifethal 70, el cual ofrece una serie de propiedades ideales para su uso en el contexto del horno de nitruración.

El alambre Nifethal 70 presenta una destacada habilidad para enfrentar temperaturas elevadas, lo que lo hace apto para su uso seguro en ambientes con

temperaturas de hasta 600 °C. Esta cualidad cobra una importancia especial en este caso, ya que el diseño está concebido para operar únicamente hasta 500 °C.

La sección 2.4.1 detalla minuciosamente los cálculos y los criterios de selección del material Nifethal 70. Esta meticulosa investigación y análisis aseguran una base sólida para la toma de decisiones respecto al material empleado, lo que mejora significativamente la comprensión de los factores influyentes en el rendimiento de la resistencia calefactora.



Fig. 3.12. Resistencia eléctrica calefactora.

En la Fig. 3.13 se presenta el relé seleccionado para ser utilizado en el sistema. Este relé está equipado con una bobina que opera con una tensión de 3 a 32 V CC y tiene la capacidad de trabajar con un intervalo de operación de hasta 380 V CA. Su contacto seco es capaz de soportar una corriente máxima de 25 A, lo que lo hace adecuado para manejar cargas eléctricas de alta potencia.



Fig. 3.13. Relé SSR-25 DA.

j) Cable eléctrico de alimentación y toma macho.-

Para garantizar el suministro de energía necesario para alimentar la resistencia eléctrica calefactora y los demás componentes del sistema, para lo cual se pretende usar la red eléctrica. Para establecer conexión con dicha red, se empleará un cable de calibre 12 AWG (ver Fig. 3.14), que ha sido seleccionado de acuerdo con las consideraciones detalladas en la sección 2.1 del capítulo anterior.

Además, el uso de un enchufe macho para conexión trifásica (ver Fig. 3.14) es esencial para establecer una conexión eléctrica confiable y estable con la fuente de alimentación externa. La configuración trifásica permite un suministro de energía más equilibrado y eficiente, distribuyendo la carga eléctrica de manera uniforme en las tres fases, lo que favorece un funcionamiento más suave del sistema.



Fig. 3.14. Cable AWG calibre 12 para un amperaje máximo de 30 A y enchufe macho.

k) Alarma auditiva (Buzzer).-

La incorporación de una alarma auditiva (ver Fig. 3.15) en el panel de control de temperatura para un horno de nitruración tiene un doble beneficio: aumenta la seguridad y mejora la facilidad de uso. La alarma desempeña un papel fundamental al mantener al operador informado sobre el estado del horno, lo que ayuda a prevenir accidentes.

La alarma cumple una función esencial al indicar al operador cuando el horno ha alcanzado la temperatura de nitruración deseada ( $\sim 500$  °C). Esta señal marca el momento en el que se deben abrir las válvulas de gas amoníaco y arrancar el motor para iniciar la agitación de la atmósfera. Esto asegura que la carga de nitruración reciba una atmósfera constante y rica en amoníaco dissociado, lo que es crucial para el éxito del proceso.

Además, la alarma agrega un nivel adicional de facilidad de uso al panel de control. La señal sonora elimina la necesidad de que el operador esté constantemente vigilando el horno, lo que le permite realizar otras tareas sin descuidar el proceso. Esto mejora la eficiencia operativa y reduce la posibilidad de errores humanos durante el manejo del horno.



Fig. 3.15. Alarma auditiva (Buzzer).

#### l) Motor eléctrico.-

Según las especificaciones del fabricante del horno WILD BARFIELD MODELO TRT.1010, se requiere la instalación de un motor eléctrico a 120V CA para agitar la atmósfera, como se detalla en la sección 3.2 del presente capítulo. Este motor se conectará a una maneta

La incorporación de este motor eléctrico para agitar la atmósfera en el horno es una medida importante para asegurar una distribución uniforme del calor y de los gases dentro del compartimento del horno. Esto contribuye a mantener una temperatura homogénea y un ambiente adecuado para el proceso de nitruración, lo que, a su vez, garantiza resultados consistentes y de alta calidad en los productos tratados en el horno.

Una vez que se han seleccionado cuidadosamente todos los componentes que formarán parte del sistema de control de temperatura, es momento de elaborar una lista detallada que enumere las características y dimensiones de cada elemento escogido.



Dicha lista se encuentra presentada en la Tabla 3.2, para una mejor referencia y organización.

Además, en la Fig. 3.16 se presenta una propuesta para la distribución y rotulación del panel de control de temperatura, diseñada para facilitar la manipulación y operación por parte del operario.

La distribución estratégica de los controles y etiquetas en el panel busca proporcionar una interfaz más clara e intuitiva, permitiendo al operario identificar y ajustar los parámetros de temperatura de manera rápida y sencilla. Esto contribuye a optimizar la eficiencia operativa, reduciendo el tiempo necesario para configurar el sistema y minimizando el riesgo de errores durante el proceso.

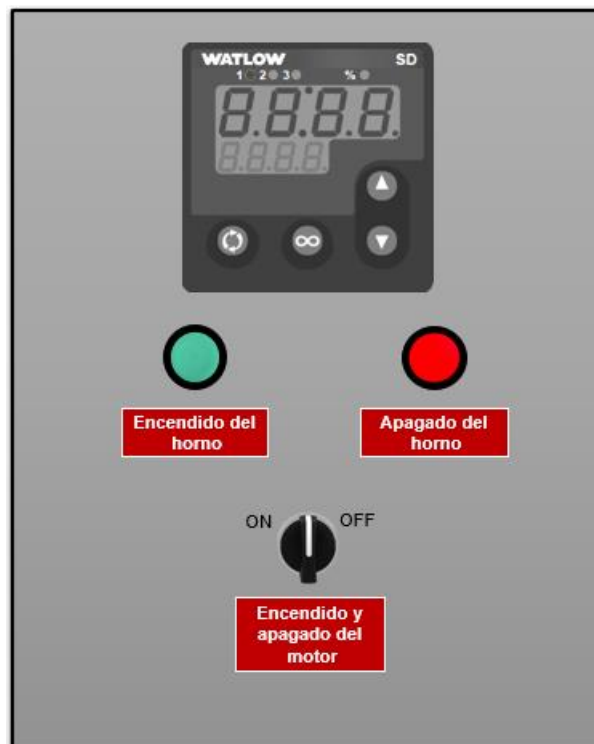


Fig. 3.16. Esquema de propuesta de distribución y rotulación del panel de control de temperatura.

Además, en la Fig. 3.17, se presenta el esquema general que representa visualmente todo el sistema de control de temperatura del horno de nitruración, proporcionando una visión integral de cómo interactúan y se conectan todos los elementos seleccionados para lograr una operación cohesiva y eficiente del equipo.



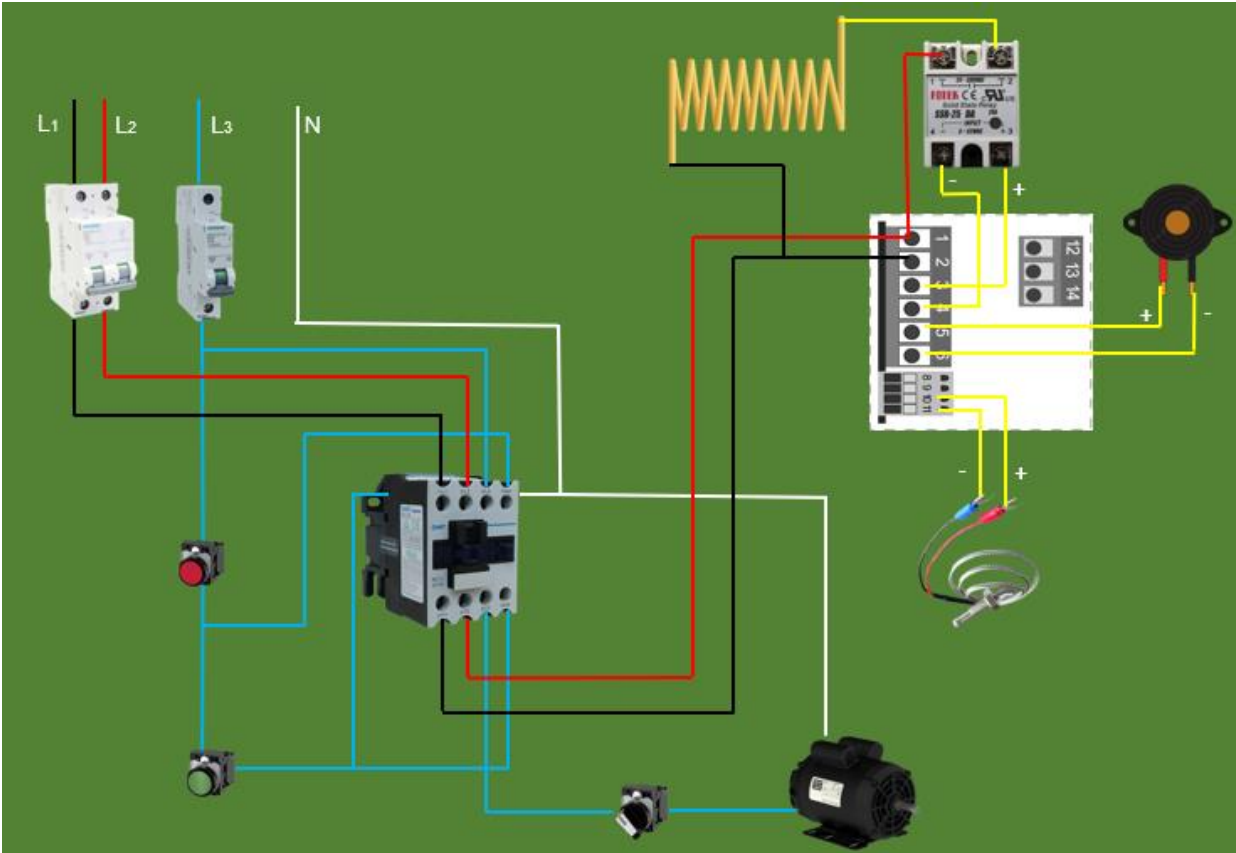







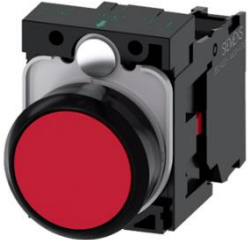




Fig. 3.17. Control de temperatura del horno de nitruración.

Tabla 3.2. Resumen de los componentes utilizados en el panel de control de temperatura del horno de nitruración.

Nombre	Marca y modelo	Dimensiones	Características	Imagen
Controlador PID	WATLOW, Modelo 1/4DIN, serie SD	Longitud: 99.8 mm. Ancho: 99.8 mm. Profundidad: 101.1 mm.	Tensión de funcionamiento: 100/240 V (CA). Voltaje de salida: 6/2 V (CC). Terminales: 14	
Interruptor termo magnético	SIEMENS, Modelo SENTRON	Profundidad: 76 mm. Ancho: 18 mm. Altura: 90 mm.	Voltaje de operación: 120/240 V. Corriente de operación: 16 A Frecuencia de operación: 50/60 Hz. Temperatura de funcionamiento: -25 a 45 °C. Numero de polos: 1.	
Interruptor termo magnético	SIEMENS, Modelo SENTRON	Profundidad: 76 mm. Ancho: 36 mm. Altura: 90 mm.	Voltaje de operación: 240/440 V (CA). Corriente de operación: 20 A Frecuencia de operación: 50/60 Hz. Temperatura de funcionamiento: -25 a 45 °C. Numero de polos: 2.	
Contactador	CHINT, Modelo NC1-2510-1	Profundidad: 95 mm. Ancho: 57 mm. Altura: 86 mm.	Voltaje de operación: hasta 690 V (CA). Corriente de operación: 25 A. Frecuencia de operación: 50/60 Hz.	

Continúa.

Continuación.- Tabla 3.2. Resumen de los componentes utilizados en el panel de control de temperatura del horno de nitruración.

Nombre	Marca y modelo	Dimensiones	Características	Imagen
Termocupla	REOTEMP	Longitud: 18 pulg (ajustable) Diámetro: 1/4 pulg	Tipo: k. Elemento positivo: cromel. Elemento negativo: alumen. Intervalo de temperaturas: 0~1,200 °C.	
Pulsador	SIEMENS, Modelo 3SB3203-0AA21	Profundidad:49 mm. Ancho: 30 mm. Altura: 40 mm.	Voltaje de operación: 5/400 V (CA/CC). Temperatura de funcionamiento: -25 a 70°C. Vida útil mecánica: 10,000,000.	
Maneta	SIEMENS, Modelo 3SB3202-2KA11	Profundidad:73 mm. Ancho: 30 mm. Altura: 40 mm.	Voltaje de operación: 5/400 V (CA/CC). Temperatura de funcionamiento: -25 a 70 °C. Vida útil mecánica: 300,000.	
Relé	FOTEK, Modelo SSR-25 DA	Longitud: 22.5 mm. Ancho:45 mm. Altura: 60 mm.	Voltaje de entrada: 3/32 V (CC). Voltaje de salida: 24/380 V (CA). Corriente de operación: 25 A.	
Resistencia eléctrica calefactora	KHANTAL	Diámetro: 1.8 mm.	Alambre Nifethal 70 Resistencia: 0.0786 Ω/m, a 20 °C Resistividad: 719 cm <sup>2</sup> /Ω, a 20 °C	
Enchufe macho	-----	-----	Corriente máxima: 35 A Voltaje: 415 V (CA) Espigas: 4	

Continúa.

Continuación.- Tabla 3.2. Resumen de los componentes utilizados en el panel de control de temperatura del horno de nitruración.

Nombre	Marca y modelo	Dimensiones	Características	Imagen
Cable eléctrico	-----	Longitud: 5 m (cortable). Diámetro: 1/4 pulg	Voltaje máximo: 600 V Corriente máxima: 24 A	
Alarma auditiva (Buzzer)	Steren	-----	Voltaje de operación: 3/24 V (CC) Frecuencia oscilatoria: 3.5 kHz Nivel de presión de sonido: 90 dB	
Motor eléctrico	-----	Longitud: 30 cm. Vástago: 5 cm.	Tensión de funcionamiento: 120 V (CA) Velocidad: 2800 rpm Potencia: 1/2 Hp. Monofásico	

### 3.2. SISTEMA DE AGITACIÓN Y SELLADO DE LA ATMÓSFERA GASEOSA

En la actualidad el horno no dispone del sistema de agitación de la atmósfera, el cual hace circular el amoníaco por toda la cámara de nitruración, y distribuye la temperatura de manera uniforme. El rotor o impulsor debe de ser comprado o fabricado; al ser un rotor con una geometría sencilla, es viable su fabricación. Además, se debe adquirir un motor que cumpla con los requisitos de funcionamiento del horno. Para la selección del motor se toma en consideración los parámetros de referencia que se encuentran en el manual de usuario; como lo son la potencia y los rpm.

En la Fig. 3.18 a se presenta un bajo relieve, que es el espacio que ocupara el rodete o impulsor. Además, en la Fig. 3.18 b se presenta los tornillos de sujeción del motor, que están ubicados en la parte inferior del horno.

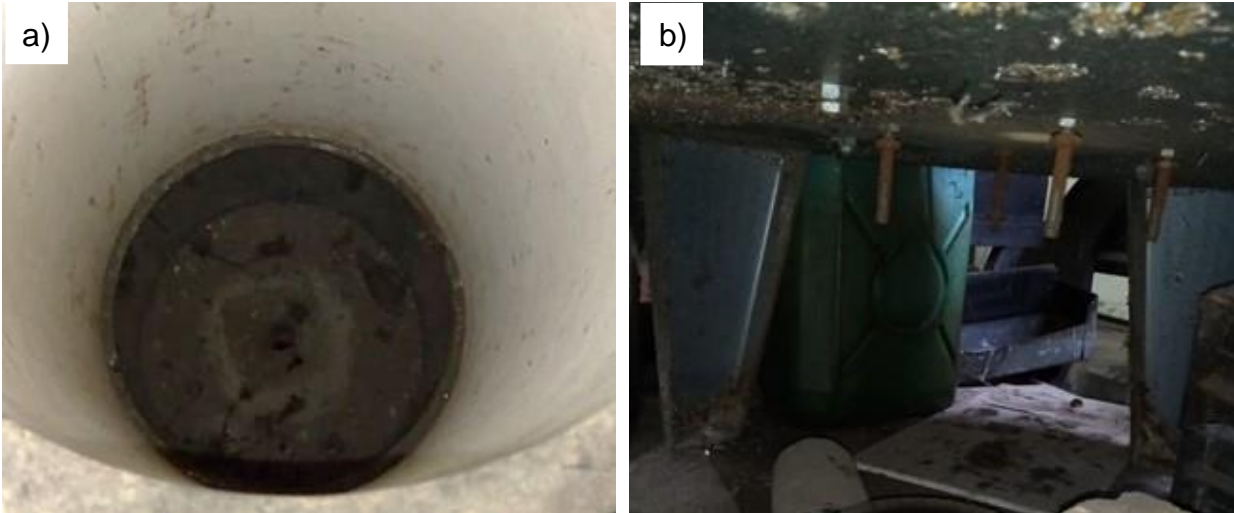


Fig. 3.18. Sistema de agitación de la atmósfera: a) Espacio disponible para el rodete; y b) tornillos que sujetan del motor.

### 3.2.1. AGITACIÓN

El gas es aspirado por el ventilador centrífugo a través de la cesta cargada con las piezas a nitrurar, a continuación, es impulsado hacia las paredes laterales del horno y llega hasta la parte superior de la cámara donde es nuevamente aspirado. En la Fig. 3.19 se presenta las líneas de forma en la que recircula la atmósfera y como está llega a todas las partes del horno y de las piezas de trabajo. Gracias a la recirculación de la atmósfera gaseosa se logra un control y distribución uniforme de la temperatura en el interior del horno [5].

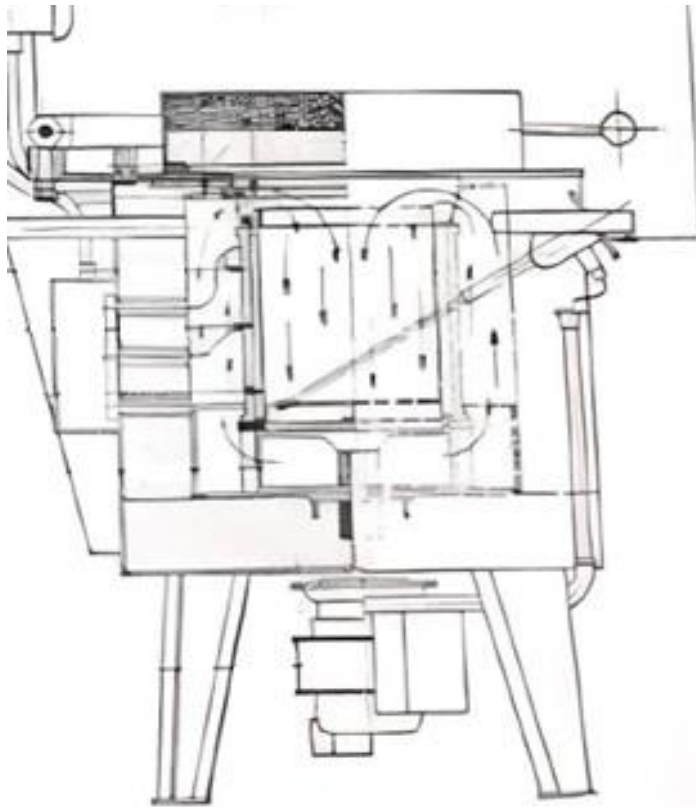


Fig. 3.19. Recirculación de la atmósfera [5].

a) Variación de las propiedades mecánicas con la temperatura.-

Las propiedades de los metales se calculan en base a su comportamiento a temperatura ambiente, pero en algunas ocasiones la temperatura de trabajo del material puede ser mayor o menor que la temperatura ambiente; por lo que se necesita conocer el comportamiento de las propiedades mecánicas del material a diferentes temperaturas, para poder diseñar adecuadamente las piezas o elementos de máquina. En la Tabla 3.3 se presentan los esfuerzos de fluencia y de tracción del acero inoxidable AISI 304 a diferentes temperaturas, ya que es el material seleccionado para fabricar el rodete.

Tabla 3.3. Características del acero inoxidable AISI 304 a diferentes temperaturas [17].

Material	Temperatura, °C	Esfuerzo de fluencia a 1000 h, MPa (ksi)	Resistencia a la tracción en tiempo corto, MPa (ksi)
Acero inoxidable tipo 304	538	117 (17)	413 (60)
	649	48 (7)	317 (46)
	704	26 (3.9)	255 (37)

b) Resistencia mecánica.-

Al girar el rodete de un ventilador, los álabes están sometidos a una fuerza centrífuga que tira de ellos radialmente hacia fuera. Para comprobar si la carga de tensión generada por la fuerza centrífuga puede romper el aspa del ventilador desde el cubo, se debe calcular esta fuerza centrífuga. Para ello, sólo se necesita conocer tres magnitudes: el peso  $W$  de un aspa, la distancia  $R$  del centro del aspa respecto al centro de rotación y la velocidad de giro del ventilador. Si se conoce estas tres magnitudes, se puede calcular la fuerza centrífuga  $F$  mediante la Ec. 3.1 [18].

$$F = 3.409 \times 10^{-4} * W * R * \text{rpm}^2 \quad (3.1)$$

donde:  $F$  es la fuerza centrífuga que sufre las aspas en lb;

$3.409 \times 10^{-4}$  es un factor de conversión;

$W$  es el peso del aspa en lb;

$R$  es la distancia del centro de las aspas al centro de rotación en pies; y

rpm es la velocidad de giro del motor.

Haciendo uso de Inventor se calculó la distancia del centro del álabe al centro de rotación el cual es 74.05 mm (0.243 pies). También, se calculó la masa de uno de los álabes, el cual da como resultado 0.033 kg considerando una lámina de acero inoxidable con un espesor de 0.6 mm; entonces:

$$W = m * g \quad (3.2)$$

donde:  $m$  es la masa de un álabe en kg; y

$g$  es la aceleración de la gravedad con valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$

Sustituyendo en la Ec. 3.2, se obtiene:

$$W = 0.033 * 9.81$$

$$W = 0.324 \text{ N} = 0.073 \text{ lbf}$$

Cálculo de la fuerza con la Ec. 3.1:

$$F = 3.409 \times 10^{-4} * 0.0727 * 0.2429 * (2800)^2$$

$$F = 47.25 \text{ lbf} = 210.18 \text{ N}$$

Si la sección transversal del álabe es de  $42 \text{ mm}^2$  ( $0.0651 \text{ pulg}^2$ ) se puede calcular el esfuerzo simple de tracción mediante la Ec. 3.3 [18]:

$$\sigma = 3 * F/A \tag{3.3}$$

donde:  $\sigma$  es el esfuerzo de tracción en psi;

3 representa el factor de seguridad;

F es la fuerza en lb; y

A es el área de la sección transversal del álabe en  $\text{pulg}^2$

Sustituyendo en la Ec. 3.3, se obtiene:

$$\sigma = 3(47.25 \text{ lb}/0.065 \text{ pulg}^2)$$

$$\sigma = 9.23 \text{ psi}$$

$$\sigma = 63.62 \text{ kPa} = 0.6362 \text{ MPa}$$

Si un factor de seguridad de 3 parece más alto de lo necesario, se tiene que considerar dos efectos secundarios que requieren este alto factor de seguridad:

- 1) En los ventiladores centrífugos los álaves se pueden doblar antes de que se rompan.



- 2) Una ligera vibración del álabe puede provocar un fallo por fatiga incluso antes de que se alcance el límite elástico. La vibración del álabe es un peligro particular si la velocidad de giro produce una frecuencia natural en el álabe [18].

Dado que el esfuerzo de tracción calculado es mucho menor al esfuerzo de fluencia y a la resistencia a la tracción del acero inoxidable 304 a la temperatura de 538 °C (ver Tabla 3.3), este puede ser utilizado para la fabricación del rodete. La selección definitiva del material se debe realizar considerando la disponibilidad en el mercado y los precios.

c) Diseño de la soldadura.-

El rodete este compuesto por 3 piezas la barra central, el disco inferior y los álabes. Estos deberán de ser soldados por lo que se necesita diseñar la soldadura, el álabe estará soldado por la parte inferior al disco y a la barra central por uno de sus extremos (ver Fig. 3.20).

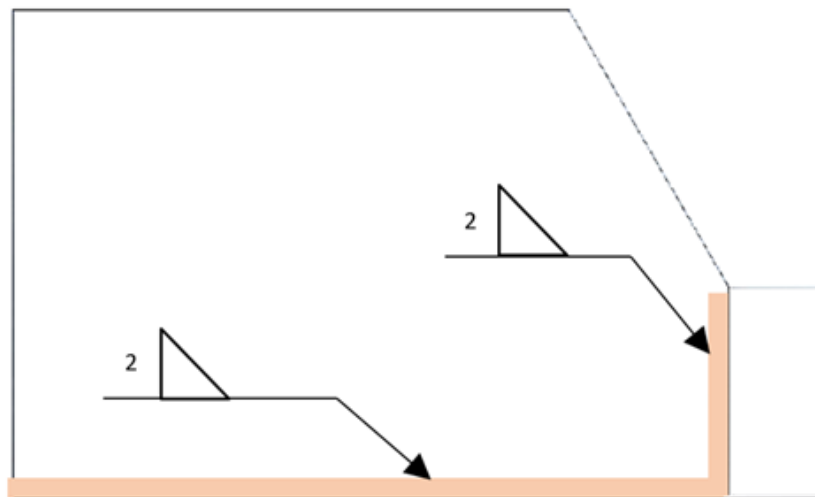


Fig. 3.20. Esquema de las soldaduras.

Para los cálculos de las cargas a las que está sometida la soldadura se usará la fuerza calculada en el literal anterior. En la Fig. 3.21, se presentan las dimensiones del álabe y la ubicación de la fuerza.

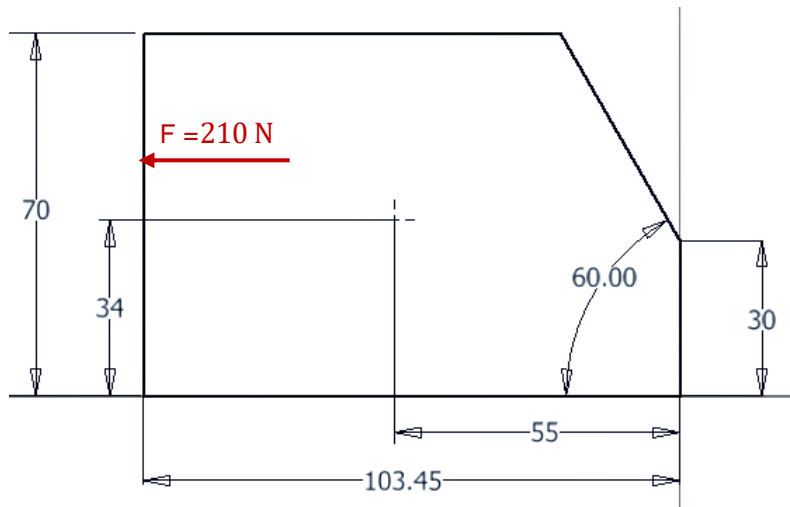


Fig. 3.21. Diagrama del ábabe, dimensiones en mm.

Se iniciará identificando las esquinas de los cordones de soldadura con una letra y ubicando el punto donde está ubicado el centroide de la geometría del cordón de soldadura (ver Fig. 3.22). Observe que  $v$  y  $M$  representan cargas aplicadas por la soldadura al ábabe.

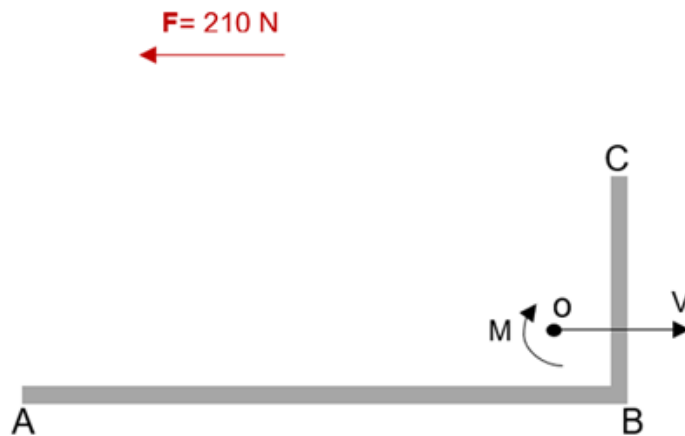
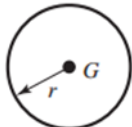
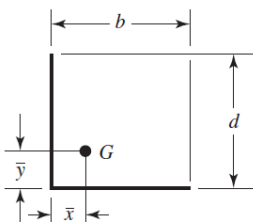


Fig. 3.22. Geometría de la soldadura.

Para determinar el esfuerzo cortante primario se necesita calcular el área del cordón de soldadura, para lo cual, se hará uso de las ecuaciones que se disponen para el caso número 4 (ver Tabla 3.4) [19].

Tabla 3.4. Propiedades torsionales de las soldaduras de filete [19].

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento polar unitario del área
	$A = 1.414\pi hr$	Centro	$J_u = 2\pi(r^3)$
	$A = 0.707h(b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)}$	$J_u = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$

$$A = 0.707h(b + d) \quad (3.4)$$

donde: A es el área de la garganta del cordón de soldadura;

h es el tamaño del cordón de soldadura;

b es el largo del conjunto de soldaduras y

d es la altura del conjunto de soldaduras.

$$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)} \quad (3.5)$$

donde:  $\bar{x}$  es la distancia en el eje x, desde el origen hasta la ubicación del centroide de la geometría formada por el cordón de soldadura.

$$\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)} \quad (3.6)$$

donde:  $\bar{y}$  es la distancia en el eje y, desde el origen hasta la ubicación del centroide de la geometría formada por el cordón de soldadura.

$$J_u = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)} \quad (3.7)$$

donde:  $J_u$  es el segundo momento polar unitario del área.

Sustituyendo para el Cálculo del área del cordón de soldadura utilizando la Ec. 3.4, se obtiene:

$$A = 0.707(2)(103.45 + 30)$$

$$A = 188.7 \text{ mm}^2$$

Sustituyendo para conocer la ubicación del punto G usando las Ec. 3.5 y 3.6, se obtiene:

$$\bar{x} = \frac{(103.45)^2}{2(103.45 + 30)}$$

$$\bar{x} = 40.10 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{30^2}{2(103.45 + 30)}$$

$$\bar{y} = 3.37 \text{ mm}$$

Sustituyendo para calcular el segundo momento polar unitario del área con la Ec. 3.7, se obtiene:

$$J_u = \frac{(103.45 + 30)^4 - 6(103.45)^2(30)^2}{12(103.45 + 30)}$$

$$J_u = 161,962 \text{ mm}^4$$

Para calcular el esfuerzo cortante primario se utilizará la siguiente ecuación [19].

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad (3.8)$$

donde:  $\tau'$  es el esfuerzo cortante primario en MPa,

V es la fuerza cortante en N, y

A es el área de la garganta del cordón de soldadura mm<sup>2</sup>.

Sustituyendo en la Ec. 3.7, se obtiene:

$$\tau' = \frac{210}{188.7}$$

$$\tau' = 1.11 \text{ MPa}$$

En la Fig. 3.23, se presenta el esfuerzo cortante primario y secundario en cada esquina del cordón de la soldadura

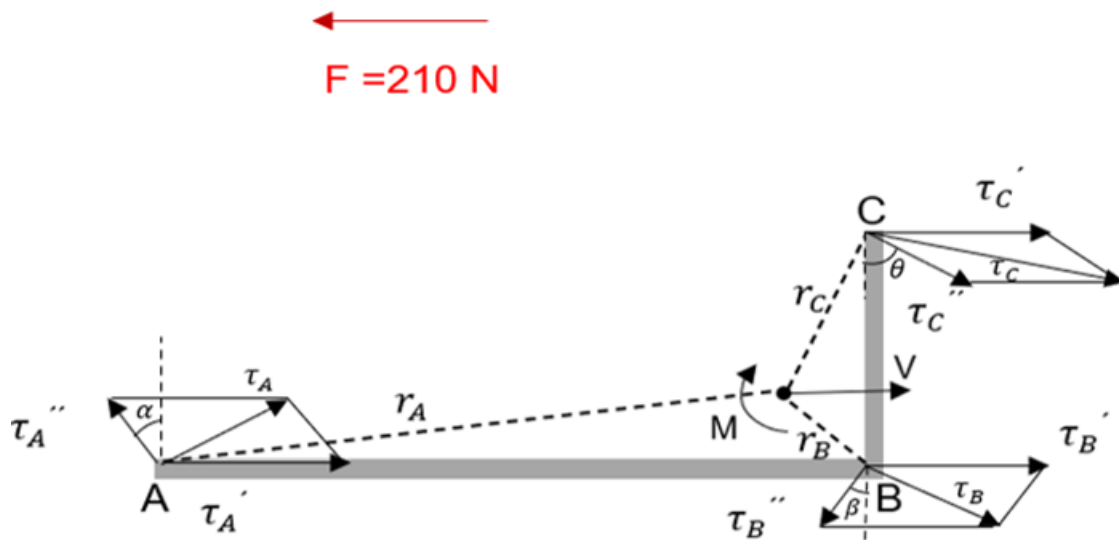


Fig. 3.23. Ubicación de los esfuerzos cortantes primarios y secundarios.

Para calcular el esfuerzo cortante secundario se necesita conocer las distancias  $r_A$ ,  $r_B$  y  $r_C$  (ver Fig. 3.24). Estas distancias van desde el centroide hasta los puntos de interés A, B Y C.

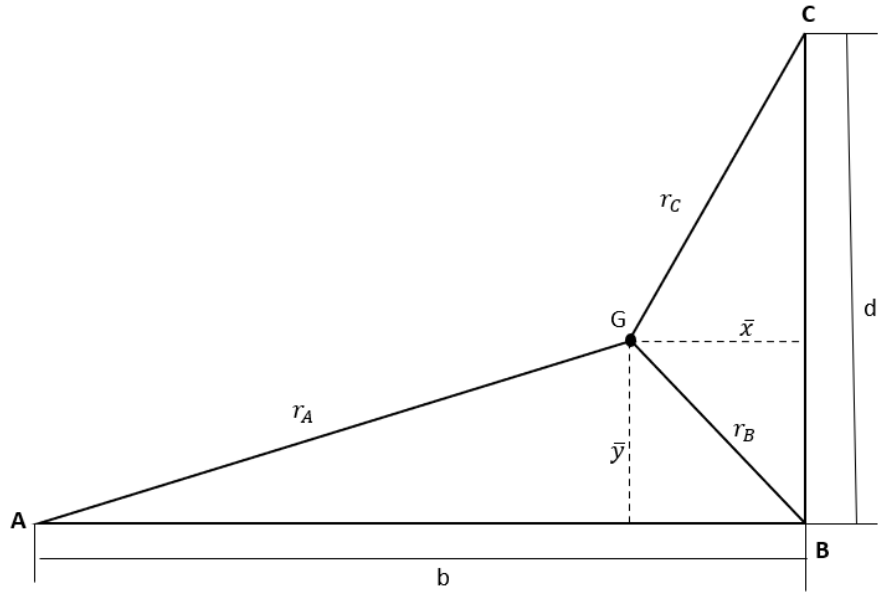


Fig. 3.24. Esquema, distancias del centroide a los puntos de interés.

En base a la geometría de la Fig. 3.24, se obtiene la Ec. 3.9, se obtiene:

$$r_A = \sqrt{\bar{y}^2 + (b - \bar{x})^2} \quad (3.9)$$

donde:  $r_A$  es la distancia del centroide hasta el punto A, y  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las ubicaciones del centroide.

Sustituyendo en la Ec. 3.9, se obtiene:

$$r_A = \sqrt{(3.37)^2 + (103.45 - 40.10)^2}$$

$$r_A = 63.44 \text{ mm}$$

En base a la geometría de la Fig. 3.24 se obtiene la Ec. 3.10

$$r_B = \sqrt{\bar{y}^2 + \bar{x}^2} \quad (3.10)$$

donde:  $r_B$  es la distancia del centroide hasta el punto B.

Sustituyendo en la Ec. 3.10, se obtiene:

$$r_B = \sqrt{(3.37)^2 + (40.10)^2}$$

$$r_B = 40.24 \text{ mm}$$

En base a la geometría de la Fig. 3.24 se obtiene la Ec. 3.11.

$$r_C = \sqrt{\bar{x}^2 + (d - \bar{y})^2} \quad (3.11)$$

donde:  $r_C$  es la distancia del centroide hasta el punto C

Sustituyendo en la Ec. 3.11, se obtiene:

$$r_C = \sqrt{(40.10)^2 + (30 - 3.37)^2}$$

$$r_C = 48.13 \text{ mm}$$

Como el ancho de la garganta de una soldadura de filete es de  $0.707h$ , la relación entre  $J$  y el valor unitario es [19].

$$J = 0.707h * J_u \quad (3.12)$$

donde:  $J$  es el segundo momento polar de inercia del área del grupo de soldaduras respecto del centroide del grupo, y  
 $h$  es la garganta de la soldadura.

Sustituyendo en la Ec. 3.12, se obtiene:

$$J = 0.707(2)(161,962)$$

$$J = 229,015 \text{ mm}^4$$

Para calcular el momento en el punto O de la se utilizará la siguiente ecuación [19].

$$M = F * l \quad (3.13)$$

donde: M es el momento Nm,

F es la fuerza en N, y

l es la distancia del punto O a la fuerza.

Sustituyendo para el cálculo del momento con la Ec. 3.8, se obtiene:

$$M = (210)(0.003)$$

$$M = 0.63 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para calcular los esfuerzos cortantes secundarios en cada uno de los puntos del cordón de la soldadura se realizará usando la siguiente ecuación [19]:

$$\tau'' = \frac{Mr}{J} \quad (3.14)$$

donde:  $\tau''$  es el esfuerzo cortante secundario, y

r es la distancia desde el centroide del grupo de soldaduras hasta el punto de interés.



Sustituyendo para el cálculo de los esfuerzos cortantes secundarios con la Ec. 3.14, se obtiene:

Cálculo del esfuerzo cortante secundario en el punto A con la Ec. 3.14:

$$\tau_A'' = \frac{Mr_A}{J}$$

$$\tau_A'' = \frac{(0.63)(63.44)(10)^3}{229,015}$$

$$\tau_A'' = 0.175 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo cortante secundario en el punto B con la Ec. 3.14:

$$\tau_B'' = \frac{Mr_B}{J}$$

$$\tau_B'' = \frac{(0.63)(40.24)(10)^3}{229,015}$$

$$\tau_B'' = 0.11 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo cortante secundario en el punto C con la Ec. 3.14:

$$\tau_C'' = \frac{Mr_C}{J}$$

$$\tau_C'' = \frac{(0.63)(48.13)(10)^3}{229,015}$$

$$\tau_C'' = 0.132 \text{ MPa}$$

Cálculo de los ángulos formados por los esfuerzos cortantes secundarios con respecto a la línea vertical (ver Fig. 3.23).

Con la Ec. 3.15 se calcula el ángulo  $\alpha$  formado por  $\tau_A''$  y el eje vertical.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{y}}{b - \bar{x}} \right) \quad (3.15)$$

donde:  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las ubicaciones del centroide, y

B es el largo del conjunto de soldaduras.

Sustituyendo en la Ec. 3.15 se obtiene:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{3.37}{103.45 - 40.10} \right)$$

$$\alpha = 3^\circ$$

Con la Ec. 3.16 se calcula el ángulo  $\beta$  formado por  $\tau_B''$  y el eje vertical.

$$\beta = 90 - \tan^{-1} \left( \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right) \quad (3.16)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.16 se obtiene:

$$\beta = 90 - \tan^{-1} \left( \frac{40.10}{3.37} \right)$$

$$\beta = 4.8^\circ$$

Con la Ec. 3.17 se calcula el ángulo  $\theta$  formado por  $\tau_C''$  y el eje vertical.

$$\theta = 90 - \tan^{-1} \left( \frac{\bar{x}}{d - \bar{y}} \right) \quad (3.17)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.17 se obtiene:

$$\theta = 90 - \tan^{-1} \left( \frac{40.10}{30 - 3.37} \right)$$

$$\theta = 33.6^\circ$$

En cada uno de los puntos se combinarán las magnitudes de los esfuerzos como si fueran componentes de un vector para obtener el esfuerzo resultante en cada punto.

Cálculo de los esfuerzos resultantes:

Con la Ec. 3.18 se calcula el esfuerzo cortante resultante en el punto A

$$\tau_A = \sqrt{(\tau'_A - \tau''_A \sin \alpha)^2 + (\tau''_A \cos \alpha)^2} \quad (3.18)$$

donde:  $\tau_A$  es el esfuerzo cortante resultante en el punto A;

$\tau'_A$  es el esfuerzo cortante primario en el punto A;

$\tau''_A$  es el esfuerzo cortante secundario en el punto A, y

$\alpha$  es el ángulo formado por  $\tau''_A$  con el eje vertical.

Sustituyendo en la Ec. 3.18, se obtiene:

$$\tau_A = \sqrt{(1.11 - 0.175 \sin(3)) ^2 + (0.175 \cos(3)) ^2}$$

$$\tau_A = 1.11 \text{ MPa}$$

Con la Ec. 3.19 se calcula el esfuerzo cortante resultante en el punto B.

$$\tau_B = \sqrt{(\tau'_B - \tau''_B \sin \beta)^2 + (\tau''_B \cos \beta)^2} \quad (3.19)$$

donde:  $\tau_B$  es el esfuerzo cortante resultante en el punto B;

$\tau'_B$  es el esfuerzo cortante primario en el punto B;

$\tau''_B$  es el esfuerzo cortante secundario en el punto B, y

$\beta$  es el ángulo formado por  $\tau''_B$  con el eje vertical.

Sustituyendo en la Ec. 3.19, se obtiene:

$$\tau_B = \sqrt{(1.11 - 0.11 \sin(4.8))^2 + (0.11 \cos(4.8))^2}$$

$$\tau_B = 1.10 \text{ MPa}$$

Con la Ec. 3.20 se calcula el esfuerzo cortante resultante en el punto C.

$$\tau_C = \sqrt{(\tau'_C + \tau''_C \sin \theta)^2 + (\tau''_C \cos \theta)^2} \quad (3.20)$$

donde:  $\tau_C$  es el esfuerzo cortante resultante en el punto C;

$\tau'_C$  es el esfuerzo cortante primario en el punto C;

$\tau''_C$  es el esfuerzo cortante secundario en el punto C, y

$\theta$  es el ángulo formado por  $\tau''_C$  con el eje vertical.

Sustituyendo en la Ec. 3.19, se obtiene:

$$\tau_C = \sqrt{(1.11 + 0.132 \sin(33.6))^2 + (0.1324 \cos(33.6))^2}$$

$$\tau_C = 1.18 \text{ MPa}$$

Al comparar los esfuerzos resultantes, se identifica el punto donde se presenta el mayor esfuerzo, que es en C.

$$\tau_{\text{máx}} = \tau_C = 1.18 \text{ MPa}$$

Para calcular el esfuerzo permisible del material de aporte se utilizará la Ec. 3.20 y la Tabla 3.5.

Para Carga cortante:

Tabla 3.5. Esfuerzos permisibles [19].

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	n°
Tensión	A tope	0.60 S <sub>y</sub>	1.67
Aplastamiento	A tope	0.90 S <sub>y</sub>	1.11
Flexión	A tope	0.60-0.660 S <sub>y</sub>	1.52-1.67
Compresión simple	A tope	0.60 S <sub>y</sub>	1.67
Cortante	A tope o de filete	0.30 S <sub>ut</sub>	-----

Para calcular el esfuerzo permisible en el material de aporte se utilizará la Ec. 3.20 y un valor se S<sub>ut</sub> = 413 MPa.

$$\tau_{\text{perm}} = 0.30S_{\text{ut}} \quad (3.20)$$

donde:  $\tau_{\text{perm}}$  es el esfuerzo permisible en el material de aporte, y

S<sub>ut</sub> es el esfuerzo último a la tracción del material de aporte.

Sustituyendo en la Ec. 3.20, se obtiene:

$$\tau_{\text{perm}} = 0.30(413)$$

$$\tau_{\text{perm}} = 124 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder el  $0.40 \cdot S_y$  para lo cual se utilizará el valor de  $S_y = 117 \text{ MPa}$ .

$$\tau_b = 0.4S_y \quad (3.21)$$

donde:  $\tau_b$  es el esfuerzo cortante en el metal base, y  
 $S_y$  es el esfuerzo de fluencia o limite elástico del metal base.

Sustituyendo en la Ec. 3.21, se obtiene:

$$\tau_b = 0.4(117)$$

$$\tau_b = 46 \text{ MPa}$$

Dado que el  $\tau_{\text{máx}} < \tau_{\text{perm}}$  y  $\tau_{\text{máx}} < \tau_b$ , la unión es satisfactoria.

Ahora se analizarán las cargas en el cordón de soldadura entre el cubo y el anillo inferior del rodete tal como se presenta en la Fig. 3.25.

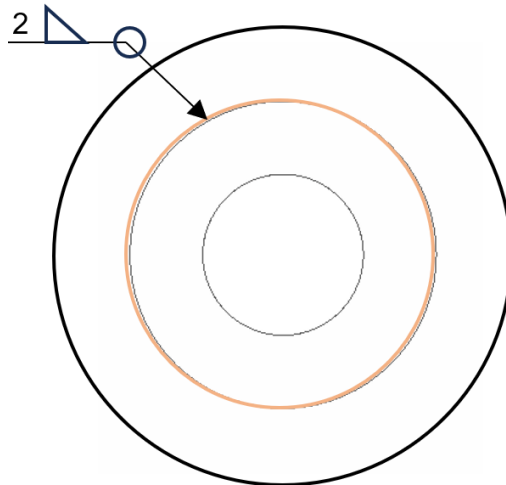


Fig. 3.25. Esquema de soldadura entre cubo y anillo inferior del rodete, dimensiones en mm.

Con la Ec. 3.22 se calcula el torque que suministra el motor al rodete

$$T = \frac{33,000 * P}{2\pi * n} \quad (3.22)$$

donde: T es el torque en lb·pulg;

P es la potencia en hp, y

N son las rpm.

Sustituyendo valores en la Ec. 3.22, se tiene:

$$T_M = \frac{33,000 * P_M}{2\pi * n}$$

$$T_M = \frac{33,000(1/2)}{2\pi(2,800)}$$

$$T_M = 0.938 \text{ lb·pulg}$$

De la Tabla 3.4, se toma la Ec. 3.23 para calcular el segundo momento polar unitario para la geometría del cordón de soldadura:

$$J_u = 2\pi(r^3) \quad (3.23)$$

donde:  $J_u$  es el segundo momento polar unitario del área,

r es el radio de la geometría.

Sustituyendo para calcular el segundo momento polar unitario del área con la Ec. 3.23, se obtiene:

$$J_u = 2\pi \left(\frac{3}{4}\right)^3$$

$$J_u = 2.65 \text{ pulg}^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.12 para encontrar segundo momento polar de inercia, se tiene:

$$J = 0.707(0.0787)(2.65)$$

$$J = 0.148 \text{ pulg}^4$$

Con la Ec. 3.24, se calculará el esfuerzo cortante secundario

$$\tau'' = \frac{T_M r}{J} \quad (3.24)$$

donde:  $\tau''$  es el esfuerzo cortante secundario;

$r$  es el radio de la geometría, y

$J$  segundo momento polar de inercia.

Sustituyendo en la Ec. 3.24, se tiene:

$$\tau'' = \frac{(0.938) \left(\frac{3}{4}\right)}{0.148}$$

$$\tau'' = 4.77 \text{ psi} = 32.88 \text{ kPa}$$

Con la Ec. 3.25 se calcula es fuerza cortante máximo.

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{(\tau')^2 + (\tau'')^2} \quad (3.25)$$

donde:  $\tau_{\text{máx}}$  es el esfuerzo cortante máximo,

$\tau'$  es el esfuerzo cortante primario, y

$\tau''$  es el esfuerzo cortante secundario.



Sustituyendo en la Ec. 3.25, se tiene:

$$\tau_{\text{máx}} = \sqrt{(0)^2 + (32.88)^2}$$

$$\tau_{\text{máx}} = 32.88 \text{ kPa} = 0.033 \text{ MPa}$$

Dado que el  $\tau_{\text{máx}} < \tau_{\text{perm}}$  y  $\tau_{\text{máx}} < \tau_b$ , la unión es satisfactoria.

d) Dilatación por temperatura.-

Para dimensionar correctamente el agitador se consideró que el material del cual se fabricó; en este caso se seleccionó el acero inoxidable, ya que este puede resistir la atmósfera de amoníaco que es altamente corrosiva. Además, se tomó en consideración el espacio disponible. En la Tabla 3.6 se presenta las medidas del espacio disponible para el rodete; también, se presentan las medidas iniciales y las temperaturas inicial y final con las que trabaja el horno [5].

Tabla 3.6. Parámetros de diseño del rodete.

Material	Acero inoxidable
Coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ), 1/C	$17.3 \cdot 10^{-6}$
Largo (disponibles), mm	250
Altura (disponibles), mm	130
$L_0$ , mm	245
$h_0$ , mm	125
$T_0$ , °C	27
$T_f$ , °C	500

Ya que el horno trabaja con temperaturas relativamente altas y el rodete estará sometido directamente a ellas se prevé que este sufrirá tanto expansiones lineales y superficiales durante su operación, por lo que al contar con un espacio ya determinado podría chocar con las columnas que soporta el material refractario el cual tiene la función de cámara de nitruración. Por lo consiguiente, para determinar dichas expansiones se calculan a partir de las Ecs. 3.26 y 3.27, respectivamente [19].

$$L_f = L_0 (1 + \alpha * \Delta T) \quad (3.26)$$

donde:  $L_f$  es la expansión lineal que sufre el rodete;

$L_0$  es la longitud inicial del rodete;

$\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica, y

$\Delta T$  es el delta de temperatura.

Sustituyendo en la Ec. 3.26, para determinar la longitud final del rodete, se obtiene:

$$L_f = 245 \text{ mm} (1 + ((17.3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}) * 473 ^\circ\text{C}))$$

$$L_f = 247 \text{ mm}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.26, para determinar altura final del rodete, se obtiene:

$$h_f = 125 \text{ mm} (1 + ((17.3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}) * 473 ^\circ\text{C}))$$

$$h_f = 126 \text{ mm}$$

Para conocer la expansión superficial que sufre el rodete se debe utiliza la Ec. 3.27.

$$A_f = A_0 (1 + \alpha * \Delta T) \quad (3.27)$$

donde:  $A_f$  es el área final del rodete;

$A_0$  es el área inicial del anillo del rodete;

$\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica, y

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas.

Sabiendo que  $A_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2$  y sustituyendo en la Ec. 3.27 se tiene:

$$A_f = \frac{\pi}{4} D_0^2 (1 + \alpha * \Delta T)$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} (245)^2 (1 + ((17.3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}) * 473 ^\circ\text{C}))$$

$$A_f = 47,529 \text{ mm}^2$$

Sabiendo que  $A_f = \frac{\pi}{4} D_f^2$  y resolviendo para  $D_f$  se tiene:

$$D_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_f}$$

$$D_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} (47,529 \text{ mm}^2)}$$

$$D_f = 246 \text{ mm}$$

Las medidas finales calculadas por expansión lineal y superficial son menores al espacio disponible en el horno, por lo que no habría ninguna interferencia entre el rodete y las paredes del horno o con los pilares que soportan cámara de nitruración.

e) Parámetros del motor.-

Para la selección del motor se tomarán en consideración los parámetros disponibles en el manual los cuales se presentan la Tabla 3.7 [5].

Tabla 3.7. Parámetros del motor.

Parámetro	Descripción
Potencia, kW (hp)	0.37 (1/2)
Velocidad de giro, rpm	2,800
Tipo de motor	Monofásico
Cantidad de pernos	4
Forma de sujeción	Con brida

En la Fig. 3.26 se presenta la forma en la que el motor está instalado en la parte inferior del horno, así como parte del sistema eléctrico [5].

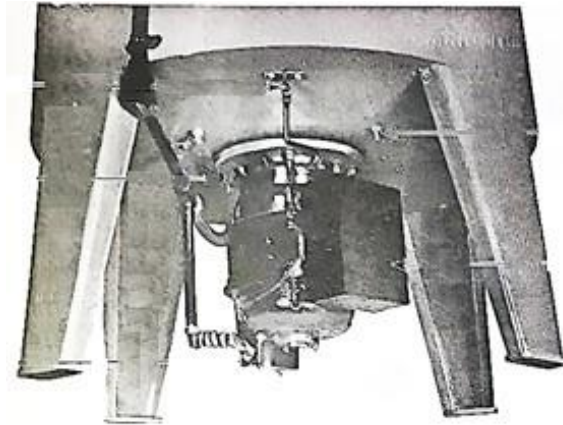


Fig. 3.26. Instalación del motor en la parte inferior del horno [5].

### **3.2.2. SELLADO**

Actualmente el horno no dispone de la placa superior aislante (ver Fig. 3.27a), según el manual del horno esta placa cubre la parte superior del horno, excepto la abertura de la cámara, que está cubierta por la puerta del horno. Además, esta placa dispone de un anillo interior metálico que sirve como soporte en la parte central, el conjunto placa superior y anillo de soporte se puede apreciar mejor en la Fig. 3.18b.



Fig. 3.27. Sistema de sellado de atmósfera: a) Horno sin la tapadera superior o top plate, b) horno con tapadera superior y anillo de soporte.

Según el manual, el material del cual está fabricada la placa es de *ELECFURNITE*, la cual es una palabra en inglés que no tiene una traducción al español, al investigar se obtuvo la siguiente información:

"Elecurnite" es un tipo de material utilizado en la fabricación de placas de cubierta (top plate) para electrodomésticos y equipos electrónicos.

Las placas de cubierta son la superficie superior de los dispositivos electrónicos que tienen aislamiento y protección contra la electricidad estática. El Elecurnite es un material que se utiliza a menudo en estas placas debido a su alta resistencia dieléctrica, lo que significa que puede soportar altas tensiones eléctricas sin permitir que la corriente fluya a través de éste.

Además, Elecurnite también es resistente a altas temperaturas, lo que lo hace adecuado para su uso en dispositivos electrónicos que generan calor. En resumen, Elecurnite es un material utilizado en la fabricación de placas de cubierta (top plate) para proporcionar aislamiento y protección contra la electricidad estática y las altas temperaturas.

La placa superior del horno debe soportar temperaturas de por lo menos 600 °C, ya que el horno tiene una temperatura de operación de 500 °C. Además, la placa no debe conducir la corriente eléctrica y también debe ser fabricada de un material rígido

debido a que tiene que soportar parte del peso de la cubierta del horno; el anillo de soporte también ayuda a la palca a soportar el peso de la cubierta (ver Fig. 3.28).

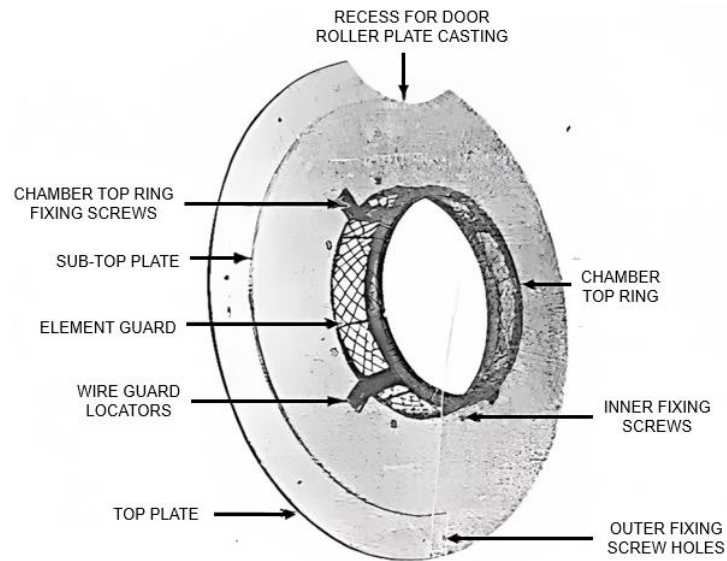
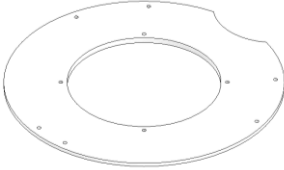




Fig. 3.28. Conjunto de tapadera y anillo de soporte [5].

En la Tabla 3.8 se presenta los componentes del sistema de sellado y el material del cual deberán ser fabricados tomando en consideración las propiedades descritas en el manual del horno.

Tabla 3.8. Componentes del sistema de sellado.

Componente	Material	Imagen
Top plate	Silicato de calcio	
Anillo de soporte	Acero al carbono	
Cuerda para sellado	Cuerda de asbesto	

### 3.3. PANEL DE CONTROL DE AMONIACO

Otro de los componentes que se debe fabricar es el panel de control de amoníaco (ver Fig. 3.29), el cual tiene la función de mantener, controlar y regular el caudal de amoníaco suministrado al horno, así como el porcentaje o grado de disociación.

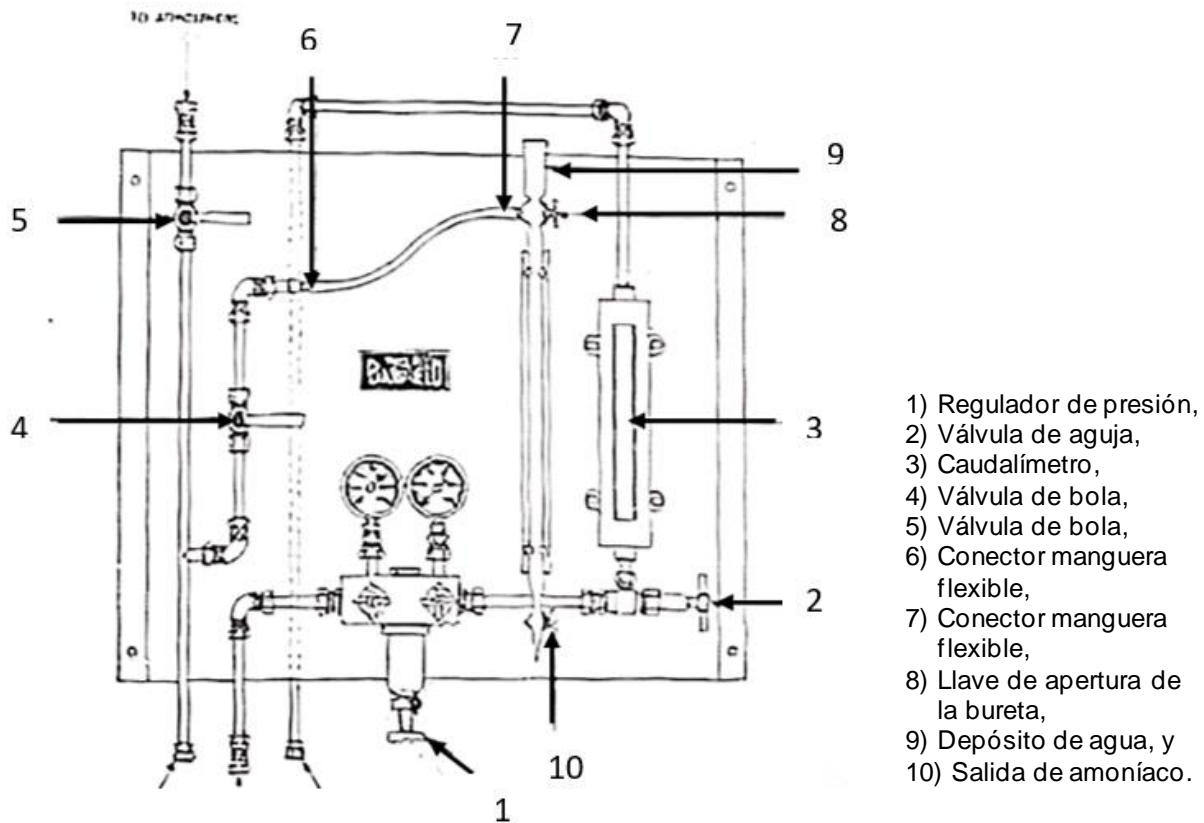


Fig. 3.29. Descripción del esquema del panel de control de amoníaco.

Para ello se realizó la identificación de cada elemento que se describe en el manual de usuario del horno, en la Tabla 3.9 se presenta los componentes necesarios para la fabricación del panel de control de amoníaco.






Tabla 3.9. Componentes del panel de control de amoníaco [5].

Nombre del componente	Función	Imagen
Mangueras flexibles (6,7)	Manguera para la conducción del amoníaco al panel de control y suministrar el gas al horno.	
Válvulas de aguja (2)	Una válvula de aguja de ajuste fino de construcción de acero, completa con uniones, para el ajuste fino de la tasa de flujo de amoníaco	
Regulador de presión (1)	Una unidad reductora de presión completa (Código N° A.5) con manómetros de entrada y salida	
Caudalímetro (3)	Un caudalímetro de tubo cónico, que indica un caudal de amoníaco de 0.5 a 5 pies <sup>3</sup> /h.	
Medidor de disociación (Bureta Bunte)	Sirve para medir el grado de disociación del amoníaco. Para el proceso de nitruración se necesita mantener el grado de disociación en 30%.	

*Continúa.*



Continuación.- Tabla 3.10. Componentes del panel de control de amoníaco [5].

Nombre del componente	Función	Imagen
Tuberías	Tuberías para el transporte de amoníaco	
Válvula para gas de 3 vías C29	Las mangueras que salen de los cilindros de amoníaco se conectan a la válvula de 3 vías.	
Válvula de bola (4,5)	Dos válvulas de bola ubicadas en la en la tubería de escape de los gases de nitruración. Una está conectada a la tubería que libera los gases a la atmósfera y la otra a la rama que suministra los gases de salida hacia el disociómetro.	
Codos a 90°	Para conectar los diferentes tramos de tubería. Según la disposición de los elementos que conforman el panel de control.	
Chapa para soporte	Los elementos mencionados anteriormente están montados adecuadamente en un panel de acero que se puede atornillar a una pared o ser transportada en montantes angulares colocados en el piso de manera similar al panel de control automático de temperatura del horno	

### 3.4. SISTEMA DE EVACUACIÓN DE GASES

El horno actualmente no dispone de un sistema de evacuación de los gases; por lo que, se considera utilizar para la tubería principal acero inoxidable cédula 40 con un diámetro nominal de 2.54 cm (1 pulg), debido a que la tubería actual del horno tiene un diámetro similar, el sistema constará de un bidón fluorado de agua donde saldrá el amoníaco y lo neutralizará, teniendo como resultado hidróxido de amonio, se considera

utilizar un bidón fluorado de plástico, con el propósito de que este no reaccione con el amoníaco en la Tabla 3.11 se presenta los componentes necesarios para la fabricación del sistema de evacuación y tratamiento de amoníaco.

Se consideró el uso de acero inoxidable debido a su resistencia a la corrosión y su durabilidad en entornos con altos niveles de humedad o exposición a sustancias químicas corrosivas presentes en el gas evacuado. Además, este material es ampliamente disponible en el mercado nacional, lo que facilita su adquisición. La forma de la tubería se ha considerado en la configuración que se presenta en la Fig. 3.30, debido a la expansión térmica del acero y para que este no sufra alguna ruptura en sus bases.



Fig. 3.30. Tubería de evacuación de gases.

Al tener en consideración estos materiales, se buscó garantizar la calidad y la eficacia del sistema de evacuación de gas al utilizar materiales confiables y ampliamente disponibles en el mercado nacional. Para tal fin, se elaboró la siguiente tabla:

Tabla 3.11. Materiales del sistema de evacuación de gases.

Componente	Material	Imagen
Tubería	Acero inoxidable	
Codos a 90 grados	Acero inoxidable	
Bidón neutralizador	Plástico fluorado	

### 3.5. TRATAMIENTOS DE LOS GASES RESIDUALES

Los gases residuales son productos en forma gaseosa que pueden contener contaminantes atmosféricos gaseosos, sólidos o líquidos, resultantes de algún proceso u operación, en este caso serán gases en el instante de utilizar el amoníaco para el tratamiento termoquímico, parte del gas amoníaco no logra disociarse, esto indica que cierto porcentaje de nitrógeno quedará como remanente, el cual se necesita evacuar del horno, esto lo hará por medio del sistema de evacuación de gases, La solubilidad del amoníaco en el agua es de 89.9 g/100 ml; por lo cual, se consideró un taque con capacidad de 50 L de agua, el cuál será capaz de neutralizar 44.95 kg de amoníaco y posteriormente el agua contenida en el recipiente se renovará, el agua que contenga el tanque mezclada con amoníaco se denomina “hidróxido de amonio”, esta agua se puede utilizar como fertilizante, productos de limpieza entre otros usos (ver Fig. 3.31).

Fluoropolímeros es el término genérico para plásticos fluorados total y parcialmente tales como PTFE, PFA y muchos más. Estos son plásticos de alto rendimiento que, debido a su alto contenido de flúor, tienen una resistencia química particularmente buena a casi todos los ácidos, bases y solventes. Además, otros materiales como los adhesivos o los alimentos apenas se adhieren a los fluoropolímeros o son fáciles de limpiar, por lo que estos plásticos se utilizan como revestimientos y cubren una amplia gama de aplicaciones [20].

Además de sus propiedades antiadherentes, tienen un efecto de reducción de la fricción, por lo que también proporcionan los llamados recubrimientos de fricción deslizantes para una lubricación en seco, sin grasa ni aceite.



Fig. 3.31. Sistema de evacuación y tratamiento de gases de escape.

## **4. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA REHABILITACIÓN**

El análisis técnico y económico es un aspecto crucial en cualquier proyecto de ingeniería. Este proceso implica la evaluación detallada de los aspectos técnicos y económicos asociados con la rehabilitación del horno, incluyendo la identificación de las necesidades de reparación, el diseño de soluciones técnicas viables y la estimación de los costos asociados a ellos.

El análisis técnico involucra la evaluación de las condiciones actuales del horno, la identificación de los problemas técnicos que requieren atención y el diseño de soluciones técnicas eficaces para abordar estos problemas.

Por otro lado, el análisis económico involucra la evaluación de los costos asociados con la rehabilitación del horno, incluyendo los costos de los materiales, mano de obra y los costos asociados con la adquisición de equipos.

En este capítulo, se presenta un análisis técnico y económico detallado de la rehabilitación del horno de nitruración. Se discuten los diferentes aspectos técnicos y económicos asociados, y se presentan todas las indicaciones pertinentes de fabricación y construcción de las piezas necesarias

### **4.1. INDICACIONES DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS AUXILIARES**

A continuación, se describirán los componentes necesarios para la construcción de estos sistemas, los materiales recomendados, los procedimientos de construcción e instalación. Además, se incluirán recomendaciones para el mantenimiento y operación de los sistemas auxiliares para asegurar su buen desempeño a largo plazo. El objetivo de este apartado es proporcionar información práctica y útil para aquellos que realizarán el trabajo de recuperación del horno.

#### 4.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL AGITADOR Y SELLADO DE ATMÓSFERA

En este apartado se abordarán las instrucciones para la fabricación y ensamblaje del agitador o impulsor, así como del sistema de sellado atmosférico y el anillo de soporte de la tapadera superior del horno. Estas indicaciones se basarán en consideraciones de diseño y los requisitos específicos de los materiales utilizados. Lo que se detalla a continuación:

##### A) Construcción del agitador o impulsor:

- ✓ Se empleará una lámina de acero inoxidable de calibre 24, con un espesor de 0.6 mm, y dimensiones de 2 m de largo por 1 m de ancho.
- ✓ En la lámina se trazarán los alabes y el disco inferior del agitador con las medidas indicadas en los planos.
- ✓ En el caso del disco inferior se debe marcar su centro para posteriormente realizar un agujero.
- ✓ Luego se procede a cortar las piezas trazadas en la lámina con tijeras o con guillotina.
- ✓ Instalar el disco inferior del agitador en el taladro de banco, usar un centro punto para marcar el centro del disco, luego se procede a realizar el agujero con una broca de 20 mm.
- ✓ Luego se utilizará una barra sólida de acero inoxidable de 38.1 mm (1 1/2 pulg) de diámetro SAE 304. La barra deberá de ser cortada con una longitud de 34 mm con una sierra manual o mecánica.
- ✓ El segmento cortado se colocará en el torno y se deberá refrentar ambas caras de la barra.
- ✓ Luego se colocará el porta brocas en el contra punto del torno.
- ✓ Se utilizará el centro punto para marcar el centro de la barra
- ✓ Luego se utilizará una broca para realizar un agujero pasado con un diámetro de 20 mm.
- ✓ Luego se debe instalar la barra en la fresadora o en el taladro de banco y realizar dos agujeros perpendiculares al agujero anterior y luego con machuelos se debe

hacer la rosca para los tornillos que servirán para que el eje del motor y el agitador giren de forma simultánea.

- ✓ Se debe de soldar el disco inferior del agitador con la barra utilizando soldadura TIG y el material de aporte especificado.
- ✓ Por último, se soldarán los alabes de la forma especificada en los planos.

B) Construcción de la tapadera superior y anillo de soporte:

- ✓ La tapadera superior del horno estará fabricada de silicato de calcio.
- ✓ Esta deberá de ser fabricada fuera del taller de mecánica con las medidas especificadas en los planos.
- ✓ Para la fabricación del anillo de soporte se utilizará una pletina de acero de un espesor de 2.7 mm (1/4 pulg), ancho de 38.1 mm (1 1/2 pulg) y una longitud total de 6 m.
- ✓ Se deberá cortar un segmento de 92.77 cm, el cual se deberá doblar en forma de anillo con un diámetro interior de 29.46 cm.
- ✓ Luego se deberán soldar sus extremos.
- ✓ Luego usando la misma pletina se cortarán 4 segmentos con una longitud 10 mm.
- ✓ Se soldará 1 a 45° en cada cuadrante del anillo.

C) Montaje de la tapadera superior y el anillo de soporte:

- ✓ Como paso previo se debe de desinstalar la puerta del horno como se indica en el manual.
- ✓ Se debe colocar la cuerda de asbesto.
- ✓ Luego se debe colocar sobre la cámara el anillo superior de soporte.
- ✓ Coloque la placa superior en su posición, asegurándose de que el anillo superior de la cámara se asiente de forma segura alrededor de la cámara para mantenerla en su posición.
- ✓ Aseguré la placa superior con los tornillos.

D) Instrucciones para instalar el rodete:

- ✓ Retire los tornillos de fijación del ventilador de arrastre, unte sus roscas con grasa de grafito de buena calidad y enrósquelas parcialmente en el saliente.
- ✓ El ventilador se debe bajar verticalmente sobre el eje del ventilador y no debe forzarse.

- ✓ El ventilador se debe bajar sobre el eje de manera que los dos tornillos de fijación del ventilador queden en contacto con el eje. La orientación correcta se obtiene cuando la ranura de la parte superior del eje del ventilador está alineada con las dos ranuras de la parte superior del saliente del ventilador.
- ✓ Cuando el ventilador se haya bajado lo suficiente sobre el eje, la parte superior del eje estará a ras con la parte superior del saliente del ventilador.
- ✓ Apriete los dos tornillos de fijación del ventilador en el orificio que atraviesa el eje del ventilador, apretando primero uno media vuelta y luego el otro de forma similar, hasta que ambos estén apretados.
- ✓ Fije los dos tornillos prisioneros con alambre resistente al calor, como el cromo-níquel de calibre 18, pasándolo por los orificios de la cabeza hexagonal y termine enroscando los extremos del alambre sobre la parte superior del eje del ventilador.
- ✓ Vuelva a colocar el protector del ventilador.

#### E) Instrucciones para instalar el motor:

- ✓ Inserte el eje del ventilador en la entrada de la parte inferior del horno y pase los orificios de fijación de la brida del motor sobre los pernos en la misma posición en la que estaban montados originalmente. Vuelva a colocar las tuercas de fijación inferiores y apriételas contra la brida y las tuercas de fijación superiores. Siempre que sea posible, apriete sucesivamente las tuercas diagonalmente opuestas.
- ✓ Rodee el eje del ventilador con una cuerda de asbesto nueva cubierta con grasa de grafito en el hueco de la pared de ladrillo en la parte inferior de la cámara, y vuelva a colocar la placa de cubierta cuadrada para sellar esta empaquetadura.
- ✓ Vuelva a instalar el ventilador como se indica en la sección anterior.
- ✓ Comprobación de la holgura entre el ventilador y la pieza fundida del anillo inferior de la cámara, como se detalla en la sección siguiente.
- ✓ Vuelva a colocar el protector del ventilador.
- ✓ Vuelva a colocar el clip para sujetar el tubo de engrase extendido a la parte inferior del horno. Vuelva a conectar los cables del motor a sus respectivos terminales y vuelva a colocar la tapa de terminales. El ventilador debe girar en el sentido de las agujas del reloj; para invertir el sentido de giro en el caso de un motor trifásico, intercambie dos cables cualesquiera del motor.



#### 4.1.2. CONSTRUCCIÓN DEL PANEL DE AMONÍACO

Los dos cilindros de amoníaco están amarrados en posición vertical con líneas centrales separadas ~92 cm (3 pies).

Se desenroscan los tapones de ambos cilindros, junto con la tuerca hexagonal en la salida de cada cilindro. Guarde los tapones de las botellas y las tuercas hexagonales en un lugar seguro, ya que los necesitará cuando se devuelvan los cilindros vacíos.

A continuación, se realizan las conexiones ajustables a cada cilindro de amoníaco, insertando las arandelas especiales de aluminio en cada unión y atando el tubo de alimentación principal, si es posible, a la pared o a otro soporte adecuado. La disposición de los elementos que componen el panel de control de amoníaco se presenta en la Fig. 3.29. A continuación, coloque el panel de control de amoníaco a la altura normal de los ojos, ya sea en la pared o en soportes empotrados en el suelo, junto al horno. Conecte la tubería ajustable del cilindro de amoníaco y el panel de control de amoníaco con las uniones y la tubería sólida de 1/4 pulg. La tapadera superior de Elec furnite (top plate) del horno está ranurada a ambos lados para que el panel se pueda colocar en cualquiera de ellos. Coloque la bureta bunte (disociómetro) y conéctela entre 6 y 7 con el tubo de goma, y asegúrese de que las válvulas 8 y 10 tengan siempre colocadas sus bandas de goma de retención. No engrase en exceso o se obstruirán los orificios pequeños de los grifos de vidrio esmerilado. Es una precaución que vale la pena, renovar las bandas de goma de retención a intervalos de unos dos meses para evitar el deterioro de la goma.

Todas las válvulas deben estar en posición de cierre; es decir, los mangos de las válvulas de bola deben formar un ángulo recto respecto a la tubería, las demás 2, 8 y 10 deben estar enroscadas hacia dentro y la válvula 1 con su parte moleteada enroscada hacia afuera. Parte importante que conlleva la construcción del panel es, descartar las posibles fugas que podría sufrir el sistema por la mala sujeción de los componentes, para ello se realiza la prueba de fugas que se describe a continuación:

- ✓ Cierre la válvula de bola 4 y 2, y luego abra la válvula 5 y desenrosque la parte alargada y moleteada de 1 hasta el tope. La válvula de 3 vías ya debe estar en posición cerrada.
- ✓ Abrir la válvula de un solo cilindro de amoníaco, mediante la llave suministrada, hasta 3 o 4 vueltas completas.

- ✓ Abrir la válvula de 3 vías, en la dirección que conecta con este cilindro de amoníaco. La presión total del cilindro de amoníaco está ahora en la línea hasta 1.
- ✓ Pruebe todas las juntas, y válvulas hasta este punto con una mecha de azufre encendido, tal como se presenta en la Fig. 4.1. La más mínima fuga de amoníaco se indica mediante un humo blanquecino que forma un depósito blanco en las proximidades de la fuga. En caso que se descubran fugas en las juntas o válvulas, rectifíquelas antes de continuar.



Fig. 4.1. Prueba de fuga de amoníaco con una mecha de azufre.

- ✓ Atornille la parte extendida moleteada de 1 hasta que el manómetro de baja presión (en el lado derecho) indique una presión de 69 a 103 kPa (15 a 20 psi).
- ✓ Abra la válvula 5 completamente y luego abra la válvula 2 con cuidado hasta que el caudalímetro indique un flujo de amoníaco de 2 a 3 pies por hora.
- ✓ El amoníaco anhidro fluirá ahora hacia la retorta de nitruración y de vuelta por la tubería metálica flexible, hasta 5 y luego a la atmósfera.
- ✓ Aumentar el flujo hasta la lectura máxima en el caudalímetro y mantener este flujo durante 10 a 15 min, a continuación, cierre la llave 5.
- ✓ El sistema está ahora bajo presión de amoníaco y todas las juntas restantes válvulas y la tubería después del punto 1 hasta 5 deben ser probados para fugas de la manera descrita anteriormente.

- ✓ Todas las fugas se deben subsanar antes de iniciar la nitruración. Una vez subsanadas las fugas, cerrar el paso de amoníaco cerrando la válvula 2 y abriendo la válvula 5. El equipo está listo para su uso normal.

#### **4.1.3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE GASES RESIDUALES**

Se utilizarán tubos de acero inoxidable de 1 pulg de diámetro SCH40, para cortar el tubo se puede realizar con un cortatubo o una sierra de diente fino, tratando de no dejar rebabas en los extremos de los tubos, se debe cortar la tubería a la medida necesaria.

Se realiza el proceso de roscado con una herramienta llamada tarraja, la cual desbasta y talla una rosca en el tubo, en el que se enroscan las conexiones, se realizará la rosca de la tubería con una tarraja para tubería de 1 pulg con rosca NPT, aplicando los pasos siguientes:

- 1) Se debe asegurar que la tarraja este en escuadra respecto al tubo. De no lograrlo se obtiene una rosca imperfecta y descentrada.
- 2) Verificar que el largo de rosca corresponda al diámetro del tubo a roscar, en este caso sería una rosca de 1 pulg.
- 3) Colocar aceite para tallar roscas en el extremo que se realizará la rosca, con el fin de lubricar y evitar un sobrecalentamiento en la tarraja.
- 4) Hacer la rosca extrayendo rebabas o residuos girando cada 3/4 de vuelta, 1/4 en sentido contrario. Esto permitirá un tallado más limpio y un proceso menos forzado, evitando deformar la cresta de los hilos ya tallados.
- 5) Desenrosque la tarraja acompañando con una leve presión hacia el extremo del tubo, ya que los peines cónicos al despegar de la rosca ya tallada pierden paulatinamente superficie de contacto con los hilos de rosca del tubo, apoyándose cada vez más cerca del extremo del hilo, pudiendo dañarlo.
- 6) Limpie la rosca recién terminada, eliminando restos de rebaba y el lubricante utilizado.

Después de este proceso se procede a conectar las tuberías por medio de codos a 90° hasta obtener la tubería de evacuación de gases.

#### 4.1.4. INSTRUCCIONES DE COLOCACIÓN DE LA CARGA DE NITRURACIÓN

La colocación de las piezas dentro del horno de nitruración es un aspecto crítico del proceso de nitruración. A continuación, se presentan algunas indicaciones que pueden ayudar a garantizar una colocación adecuada de las piezas dentro del horno.

Pero antes de colocar la pieza de trabajo en la cesta, es muy importante asegurarse de que esté lo más limpia y libre de aceite posible. Nunca se insistirá lo suficiente en la importancia de limpiar la pieza de trabajo, ya que, si no se sigue esta instrucción, la vida útil del elemento calefactor se reducirá considerablemente; los siguientes son algunos de los métodos que se pueden emplear para limpiar el trabajo:

- 1) Si dispone de un desengrasante de tricloroetileno, utilícelo para eliminar el aceite y la grasa de la pieza.
- 2) Lave la pieza con cualquier otro tipo de material desengrasante estándar.
- 3) Si ninguno de los métodos anteriores es practicable, la pieza debe ser drenada tanto como sea posible. Además de evitar que el interior del horno se cubra de aceite carbonizado, este procedimiento permite recuperar cantidades considerables de aceite de temple que, de otro modo, se desperdiciarían.

La denominada cesta de trabajo está provista de 4 parrillas, las cuales son (ver Fig. 4.2) montables de forma independiente una sobre otra para así poder cargar el horno más fácilmente. Después de que la pieza se haya limpiado estará lista para ser cargada en la cesta; si la carga consiste en varias piezas pequeñas, cargarlas de modo que se distribuyan uniformemente en la cesta y no se amontonen en un lado.



Fig. 4.2. Parrillas para colocación de piezas.

Para mejorar la carga del horno se diseñó de esta forma la cesta de trabajo para así en el caso de necesitar la nitruración de una pieza grande se puede colocar la parrilla principal que cuenta con una distancia de 8 cm desde la pieza fundida del anillo inferior y las otras tres cuentan con 14 cm de altura, permitiendo un buen flujo de gas entre niveles (ver Fig. 4.3.).

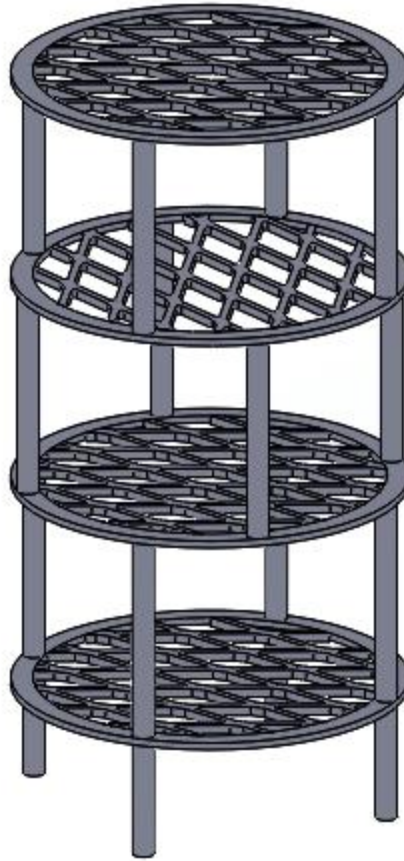


Fig. 4.3. Acoplamiento de las parrillas para formar la cesta de trabajo donde se montan las piezas a nitrurar.

Si la cesta de trabajo se carga correctamente cuando está completa, la circulación de aire forzado tendrá todas las oportunidades para funcionar con la máxima eficiencia, lo que resulta en una mayor producción de trabajo. Un cesto lleno de piezas ligeras se calentará más rápidamente que una carga de piezas más sólidas.

Para la carga, abra la puerta del horno; introduzca la mesa principal de 8 cm de altura coloque de forma ordenada las piezas que se desean nitrurar, dejando un espacio entre ellas de 5 cm, posterior a esto puede colocar la otra mesa de 14 cm de alto, siempre respetando el espaciamiento entre las piezas de trabajo y así sucesivamente hasta instalar los cuatro niveles si se desea usar la carga máxima de nitruración del horno, sino disponer de las parrillas de forma que la pieza a nitrurar lo requiera. No permita que la mesa principal o las demás parrillas se encuentre con la pieza fundida del anillo inferior con un golpe, o se pueden producir daños en las parrillas y en la pieza fundida. Si la cesta de trabajo se ha cargado correctamente en el horno, la puerta se cerrará sin

ocasionar ningún problema. El cesto de trabajo se puede introducir en el horno tanto con el horno frío como con el horno a temperatura. Sin embargo, no se debe suponer que todo el equipo ha alcanzado la temperatura tan pronto como el termostato entra en funcionamiento; se debe dejar transcurrir un corto tiempo antes de que se pueda suponer con seguridad que se ha alcanzado la temperatura.

#### **4.1.5. INSTRUCCIONES DE USO DEL PANEL DE CONTROL DE TEMPERATURA DEL HORNO**

Para utilizar el panel de control de temperatura del horno con el controlador WATLOW, modelo 1 /4 DIN, serie SD y el proceso de nitruración, se deben seguir las siguientes instrucciones:

- 1) Encendido del horno: Asegurarse de que el horno esté conectado a una fuente de alimentación adecuada y que los dos interruptores esté en posición "ON" (encendido). Además de revisar que tanto el pulsador rojo de apagado este accionado y la maneta que acciona el motor en posición de apagado "OFF".
- 2) Configuración del controlador WATLOW: Utilizar los botones y la pantalla del controlador WATLOW para ingresar la temperatura deseada para el proceso de nitruración. Se Puede ajustar el valor usando los botones de aumento (+) y disminución (-) hasta alcanzar la temperatura adecuada para el proceso (Para mayor información del proceso descrito anteriormente y otras configuraciones importantes antes de realizar el proceso de nitruración de piezas, se recomienda leer minuciosamente el manual de usuario de dicho controlador, el cual puede ser proporcionado por el vendedor o descargado de internet).
- 3) Inicio del proceso de nitruración: Una vez que la temperatura deseada está configurada en el controlador WATLOW, presionar el pulsador verde (Siempre y cuando se haya finalizado de cargar las piezas que se van a nitrurar y el respectivo sellado del horno) para iniciar el proceso de nitruración. Al presionar este botón, el horno comenzará a calentar hasta alcanzar la temperatura configurada.
- 4) Alerta de temperatura alcanzada: Cuando el horno alcance la temperatura de nitruración establecida, la alarma auditiva (Buzzer) sonará para avisar al operario

que el proceso ha llegado a la temperatura deseada. Esto indica que es el momento adecuado para tomar acción.

- 5) Accionamiento del motor agitador y apertura del gas amoníaco: Para iniciar el movimiento del motor que acciona el rodete y agita la atmósfera dentro del horno, gira la maneta correspondiente en la dirección apropiada. Esto permitirá que el proceso de nitruración tenga una distribución homogénea de la atmósfera en el interior del horno. Además de abrir las llaves que permiten el ingreso de gas amoníaco a la cámara de nitruración (Para ajustar la acción mencionada se puede revisar el apartado 3.3 del capítulo anterior).
- 6) Parada del proceso de nitruración: Si es necesario detener el proceso antes de tiempo, presiona el pulsador rojo. Esto detendrá el calentamiento y posteriormente se debe girar la maneta del motor agitador a la posición "OFF", además de cerrar las llaves de gas amoníaco del panel de control de este, esto permitirá un enfriamiento seguro y controlado del horno.

Es importante seguir las medidas de seguridad y tener el conocimiento adecuado para operar el horno y realizar el proceso de nitruración de manera segura y eficiente. Además, se debe usar equipo de protección personal adecuado al trabajar con este equipo.

#### **4.1.6. INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO**

El siguiente apartado proporcionará las instrucciones de mantenimiento para el horno de nitruración. Estas instrucciones están diseñadas para garantizar el óptimo rendimiento del horno y prolongar su vida útil. Se abordarán aspectos clave del mantenimiento, como la limpieza, el reemplazo de componentes, y cualquier otra tarea necesaria para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente del horno. Siguiendo estas instrucciones, se maximizará la productividad y se minimizarán los tiempos de inactividad no planificados. A continuación, se detallan algunas instrucciones de mantenimiento:

- a) Limpieza del horno.-



Antes de comenzar cualquier tarea de limpieza, se debe asegurar de apagar el horno y dejarlo enfriar por completo. Esto garantiza la seguridad de que ningún componente funcionará y además se evitan quemaduras.

Si el trabajo se trata en el horno directamente desde el tanque de enfriamiento rápido de aceite con una cierta cantidad de incrustaciones, los hornos recogerán con el tiempo estas incrustaciones que serán expulsadas del trabajo por la circulación de aire forzado. Es recomendable, por lo tanto, desinstalar el horno de dicho material periódicamente, éste variará según la cantidad, al ser de naturaleza metálica acabará provocando un cortocircuito entre las espiras de la resistencia, y en consecuencia provocará un agotamiento. El suministro de aire a alta presión habitual en el trabajo es un método conveniente para soplar material extraño; alternativamente, se encuentra que una aspiradora doméstica con un tubo de extensión es extremadamente eficiente para eliminar esta incrustación. Antes de usar la aspiradora, primero será necesario quitar la protección del ventilador.

Si no se dispone de una aspiradora para eliminar los contaminantes, proceda como se indica a continuación:

- 1) Retire la puerta del horno.
- 2) Retire la placa superior de Elecfurnite del horno.
- 3) Retire la protección del ventilador.
- 4) Con un cepillo suave, desempolva las incrustaciones en el piso del horno y retírela con medios adecuados.

Si hay residuos adheridos a la cámara de nitruración, se puede utilizar un cepillo de cerdas duras o una espátula para eliminarlos suavemente. Tener cuidado de no rayar o dañar las superficies internas del horno.

Para la parte externa del horno se puede utilizar un paño suave y limpio junto con un detergente suave para limpiar las paredes y la tapadera. Prestar atención a las áreas donde puede haber acumulación de grasa o suciedad. Evitar el contacto con el panel de control o las áreas eléctricas.

#### b) Limpieza de tubería de ventilación y escape del horno.-

Cuando el trabajo que se procesa en el horno es excesivamente aceitoso, existe la posibilidad de que la tubería de ventilación se obstruya con el tiempo debido a la

acumulación de aceite carbonizado. Esta obstrucción puede dar lugar a una fuga de vapor de aceite alrededor del asiento de la puerta del horno. Si no se aborda este problema a tiempo, se generará más aceite carbonizado en el elemento del horno, lo que resultará en un fenómeno conocido como "quemado".

Asimismo, es esencial prestar atención a la tubería de escape de gases. Para su limpieza, se recomienda utilizar un cepillo de humos del diámetro adecuado o incluso de un diámetro menor para evitar posibles atascos. Para una limpieza más efectiva, también se sugiere el uso de una aspiradora conectada al extremo de salida de la tubería. Sin embargo, es importante asegurarse de que el horno esté abierto antes de aspirar, para evitar la creación de un vacío que pueda ocasionar problemas en el sistema.

La limpieza periódica de estos componentes es esencial para evitar acumulaciones dañinas y asegurar un funcionamiento óptimo del horno de nitruración. Mantener una adecuada limpieza y mantenimiento contribuirá a prolongar la vida útil del equipo, prevenir problemas potenciales y garantizar la calidad y seguridad en los procesos de nitruración. Es recomendable seguir las instrucciones proporcionadas por el fabricante y realizar estas tareas de mantenimiento de manera regular y cuidadosa.

#### c) Limpieza y mantenimiento del panel de control de temperatura.-

Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del horno, es importante realizar una limpieza adecuada y un mantenimiento regular. A continuación, te proporciono instrucciones paso a paso para limpiar el panel de control:

- Inspección visual: Realizar inspecciones visuales frecuentes para identificar signos de desgaste, daño o deterioro en el panel y sus componentes. Prestar especial atención a los pulsadores, maneta y conexiones eléctricas.
- Verificación de conexiones: Asegurarse de que todas las conexiones eléctricas estén firmes y bien sujetas. Al notar algún cable suelto o dañado, desconectar el equipo de la fuente de alimentación antes de realizar cualquier reparación.
- Comprobación de la funcionalidad: Realizar pruebas periódicas para asegurarse de que todos los pulsadores, maneta y controles del panel de control funcionen correctamente. Verifica que las lecturas de temperatura y otros parámetros sean precisas.

- Reemplazo de componentes dañados: Si se encuentra algún componente dañado o defectuoso durante las inspecciones, reemplazarlo de inmediato con piezas originales del fabricante o equivalentes recomendadas.
- Desconexión de la alimentación: Antes de comenzar cualquier tarea de limpieza, asegurarse de apagar y desconectar el horno de la fuente de alimentación eléctrica. Esto evitará riesgos eléctricos durante el proceso de limpieza.
- Reúna los materiales necesarios: Prepara los materiales para la limpieza, que pueden incluir un paño suave y limpio, hisopos de algodón, un cepillo de cerdas suaves y un limpiador de uso general o un limpiador especializado.
- Elimina el polvo y la suciedad superficial: Usar el paño suave para limpiar cuidadosamente la superficie del panel de control, eliminando el polvo y la suciedad acumulada. Es recomendable no ejercer demasiada presión para evitar dañar los componentes.
- Limpieza de los botones y maneta: Utilizar hisopos de algodón ligeramente humedecidos con agua o limpiador para limpiar los botones y maneta. Prestar atención a las áreas alrededor de los botones donde se puede acumular suciedad.
- Cepilla los espacios difíciles: Si hay áreas de difícil acceso o ranuras pequeñas donde se acumula suciedad, utilizar un cepillo de cerdas suaves para limpiar cuidadosamente esas áreas.
- Evitar el uso de productos abrasivos: No utilizar limpiadores abrasivos, solventes fuertes o productos químicos agresivos, ya que podrían dañar las superficies y los componentes del panel de control.
- Verificación final: Después de limpiar, realizar una verificación final para asegurarse de que no haya humedad en el panel de control. Asegurarse de que todo esté seco antes de volver a conectar el horno a la fuente de alimentación eléctrica.
- Programa de limpieza regular: Establecer un programa de limpieza regular para mantener el panel de control en buenas condiciones. La frecuencia de limpieza dependerá del entorno en el que se encuentre el horno y del uso que se le dé.

#### d) Limpieza del sistema de agitación.-

En el caso de que se produzca una acumulación de partículas de polvo, metálicas o aceite en los alabes del ventilador y en el anillo inferior, se necesita tomar medidas para asegurar el funcionamiento óptimo del equipo. Para ello, se debe proceder a retirar la tapadera protectora del ventilador y, utilizando un trapo seco, limpiar cuidadosamente las partículas acumuladas en el agitador o impulsor.

En situaciones donde el ventilador se encuentre obstruido, también será necesario retirar la tapadera protectora. A continuación, deberá girar el ventilador lentamente y con fuerza para localizar y despejar cualquier obstrucción presente. Si la obstrucción persiste y se necesita tomar medidas más drásticas, será conveniente retirar el ventilador según las indicaciones detalladas en el manual de usuario. De esta manera, se podrá eliminar completamente la obstrucción y restaurar el correcto funcionamiento del ventilador.

En el caso de que se detecte una desalineación del eje del ventilador de más de 0.005 pulgadas, se requerirá un enfoque más extenso para resolver el problema. Para ello, será necesario desmontar el motor, siguiendo las instrucciones detalladas en el apartado "Desmontaje del motor" en la página 38 del manual de usuario. Una vez desmontado, se podrá proceder a la sustitución o reparación del motor para corregir la desalineación. Es fundamental seguir rigurosamente las instrucciones proporcionadas en el manual de usuario durante este proceso para asegurar una reparación exitosa y segura.

#### e) Limpieza del sistema de sellado.-

Antes de abrir la puerta del horno para cargar las piezas que se someterán al proceso de nitruración, es de vital importancia llevar a cabo una cuidadosa limpieza de la cubierta superior de elecfurnite. Esta precaución es esencial para evitar la entrada de polvo o cuerpos extraños en la cámara del horno, ya que la presencia de estos elementos no deseados podría tener consecuencias negativas en el proceso de nitruración y comprometer la calidad de los resultados.

La cubierta superior de elecfurnite es una parte crítica del horno que desempeña un papel fundamental en la retención del calor y la distribución uniforme del mismo dentro de la cámara. Cualquier obstrucción o contaminación en esta área podría alterar el

equilibrio térmico y conducir a variaciones no deseadas en la temperatura, lo que a su vez afectaría la uniformidad del tratamiento de nitruración en las piezas.

Para llevar a cabo la limpieza de manera adecuada, se debe utilizar un método y herramientas apropiados para garantizar que no se dañe la superficie de elecfurnite ni se introduzcan residuos que puedan generar problemas en el proceso. Es recomendable emplear un paño suave y limpio, o una brocha de cerdas suaves, para retirar cualquier partícula de polvo o suciedad que se haya acumulado en la cubierta. Asimismo, es importante cerciorarse de que no queden residuos de limpieza en la superficie antes de proceder a cargar las piezas en el horno.

Además, como medida de precaución adicional, se puede verificar que la junta de la puerta del horno esté en buen estado y se encuentre correctamente sellada. De esta manera, se garantiza que no haya posibles vías de ingreso de partículas indeseadas durante el proceso de nitruración.

#### f) Ladrillos sueltos.-

En ocasiones, es posible que los ladrillos de la pared del horno se aflojen durante el transporte o debido a las vibraciones generadas después de su uso. Esta situación puede ocasionar pérdidas adicionales de calor y, como resultado, provocar un retraso en el calentamiento del horno. Para resolver este problema, se aconseja aplicar una capa gruesa de aislante o un aglutinante refractario similar en los ladrillos y las juntas entre ellos. Para facilitar este proceso, se necesita retirar la cámara de carga del horno.

Si los ladrillos del piso y la pared experimentan contracción después de su uso, podría surgir un espacio entre la parte superior de los ladrillos de la pared y la placa superior de elecfurnite del horno. Para abordar esta cuestión, se recomienda rellenar dicho espacio con uno o dos medios anillos de Silicato de calcio.

Estas medidas son fundamentales para mantener la integridad estructural y el rendimiento térmico del horno de manera óptima. La aplicación del aislante o aglutinante refractario ayudará a asegurar un sellado adecuado entre los ladrillos, evitando pérdidas de calor innecesarias y optimizando el proceso de calentamiento. Del mismo modo, el uso de medios anillos de Silicato de calcio permitirá compensar la contracción de los ladrillos y mantener una cámara de combustión eficiente y funcional.

Es importante seguir las recomendaciones del fabricante y contar con personal capacitado para realizar estas tareas de mantenimiento, garantizando así un correcto funcionamiento del horno y prolongando su vida útil. El cuidado y la atención adecuada a los ladrillos y componentes estructurales asegurarán un funcionamiento confiable y seguro del horno en el tiempo.

## **4.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LA REHABILITACIÓN**

En esta sección, se detalla minuciosamente el análisis de los recursos económicos requeridos para llevar a cabo la rehabilitación del horno de nitruración. Para lograr una estimación precisa del valor total del proyecto, se consideran todas y cada una de las partes necesarias, tanto de fabricación como de adquisición. Para presentar una visión clara y específica, se han organizado en tablas todos los componentes, su cantidad y su respectivo costo para la completa recuperación del horno.

Los costos presentados se basan en cotizaciones obtenidas de diferentes proveedores tanto en el mercado nacional como en mercados de la región. Se ha procurado obtener múltiples cotizaciones para cada componente, lo que permite evaluar las opciones disponibles y asegurar la obtención de los mejores precios. En caso de que sea necesario, se considerarán proveedores extranjeros si la adquisición de algún componente resulta complicada o no está disponible en el país.

Esta metodología de cotización, permitirá tomar decisiones informadas y estratégicas para optimizar los recursos y asegurar la viabilidad económica del proyecto de rehabilitación. Además, se tendrá en cuenta la calidad y la confiabilidad de los proveedores seleccionados para garantizar que los componentes adquiridos cumplan con los estándares requeridos para el correcto funcionamiento del horno.

La Tabla 4.1 se detalla los diferentes componentes requeridos para el sistema eléctrico y de control de temperatura, como cables, pulsadores, relés, sensores de temperatura, controladores y otros elementos relevantes. Junto a cada componente, se indica el costo individual del material. Además, se incluye una columna que presenta la cantidad necesaria de cada elemento para completar el sistema.

Tabla 4.1. Costo de materiales para el sistema eléctrico y control de temperatura.

Descripción	P/U, \$	Cant.	P/T, \$
Controlador PID marca WATLOW, 1 /4 DIN, serie SD	228.29	1 U	228.29
Interruptor termomagnético, 2 polos, 20 A	15.00	1 U	15.00
Interruptor termomagnético, 1 polos, 16 A	7.60	1 U	7.60
Contactador 3P+1NO bobina 220 V CA, 25 A	21.90	1 U	21.90
Termocupla tipo K	52.00	1 U	52.00
Pulsador ON, NA,120V,verde	27.95	1 U	27.95
Pulsador OFF, NC,120V,rojo	17.95	1 U	17.95
Maneta	23.00	1 U	23.00
Relé SSR-25 DA	15.00	1 U	15.00
Enchufe macho trifásico	6.95	1 U	6.95
Cable eléctrico AWG #12	1.62	5 m	8.10
Buzzer	4.25	1 U	4.25
Riel DIN para bornera e interruptores, 35 mm, sin agujero	3.95	1 m	3.95
Enchufe hembra trifásico	19.00	2 U	38.00
Interruptor termomagnético,3 polos, 50A	160.00	1 U	160.00
Subtotal =			629.94

La Tabla 4.2 se proporciona un desglose detallado de los costos asociados con los materiales necesarios para implementar el sistema de agitación y sellado de la atmósfera.

Tabla 4.2. Costo de materiales para el sistema de agitación y sellado de la atmósfera.

Descripción	P/U, \$	Cant.	P/T, \$
Lámina de acero inoxidable calibre 24, 0.6 mm de 2 x 1 m	94.95	1 U	94.95
Barra sólida de acero inoxidable SAE 30438.1 mm (1 1/2 pulg)	105.00	1 m	105.00
Electrodo de tungsteno 2.4 x 150 mm, 2% torio	2.95	1 U	2.95
Varilla de acero inoxidable	1.60	1 lb	160.00
Trenza de asbesto seco	5.95	1 lb	5.95
Placa de Silicato de calcio	200.00	2 U	200.00
Pletina de acero, espeso 6.35 mm (1/4 pulg), ancho 38.1 mm (1 1/2 pulg), longitud 6 m (19.68 pie)	18.20	1 U	18.20
Motor monofásico 0.37 kW (1/2 HP) 2800 rpm	218.00	1 U	218.00
Subtotal =			805.05

El propósito de la Tabla 4.3 es proporcionar una visión general de los costos involucrados en la adquisición de los materiales necesarios para implementar el panel de control de amoníaco.

Tabla 4.3. Costo de materiales para el panel de control de amoníaco.

Descripción	P/U, \$	Cant.	P/T, \$
Unidad reductora de presión	160.00	1 U	160.00
Manguera flexible	184.89	3 U	554.67
Válvula de aguja	107.14	1 U	107.14
Válvula de 3 vías	214.64	1 U	214.64
Válvula de bola	12.75	2 U	25.50
Caudalímetro	70.00	1 U	70.00
Medidor de disociación	400	1 U	400
Codos 90°	1.95	5 U	9.75
Tubería	76.50	1 U	76.50
Subtotal =			1,618.20

En la Tabla 4.4 se presenta el costo total de materiales para el sistema de evacuación y tratamiento de gases. Esta tabla proporciona una lista detallada de los materiales necesarios para implementar dicho sistema.

Tabla 4.4. Costo de materiales para el sistema de evacuación y tratamiento de gases.

Descripción	P/U, \$	Cant.	P/T, \$
Tubo de acero inoxidable de 1 pulg x 20 pie	150.00	1 U	150.00
Codos de acero inoxidable a 90°	5.50	5 U	27.50
Bidón de plástico de 50 L	50.00	1 U	50.00
Subtotal =			227.50

En la Tabla 4.5 se presentan los costos para la elaboración de la denominada cesta, en la cual se colocan las piezas a nitrurar, además de los costos para darle una capa de anticorrosivo en la parte externa del horno y del alambre utilizado para fabricar la resistencia eléctrica.

Para realizar una estimación precisa de los costos de mano de obra para la fabricación de los elementos del horno de nitruración (ver Tabla 4.6), se tomará como base un horario de trabajo de 8 horas diarias. Es importante considerar que el ritmo de trabajo del operario no es constante y que puede presentar períodos de cansancio durante su turno, lo que ocasionaría tiempos muertos. Además, se deberán tener en cuenta las interrupciones causadas por el cambio de consumibles, como discos de corte, electrodos y otros, así como la verificación de las tolerancias de las piezas a realizar.



Tabla 4.5. Otros costos necesarios para la rehabilitación del horno.

Descripción	P/U, \$	Cant.	P/T, \$
Anticorrosivo base solvente gris	36.90	1 gal	36.90
Lámina de níquel, calibre 5.0 mm de 1000 x 10000 mm	110.18	2 U	220.36
Malla de níquel, alambre 1.5 mm, abertura 8 mm	75.85	2 m	151.70
Solvente mineral spirits R1K4	13.90	1 gal	13.90
Barra de níquel 5/8"	122.32	1.5 m	122.32
Alambre Nifethal 70, Ø 1.8 mm	32.50	5 kg	162.50
Respirador cara completa termoplástico	175.00	2 U	350.00
Cartucho contra amoníaco/metilamina	16.00	4 U	64.00
Guante protector de nitrilo/poliéster contra altas temperaturas 200 °C T-10	18.50	2 Pares	37.00
Traje overol multipropósito A40	4.95	2 U	9.90
Subtotal =			1,168.58

Se partirá de un salario mensual de \$700.00 para el operario encargado de llevar a cabo la fabricación de los componentes e instalación de otros. Esto equivale a un salario por hora de \$2.92, considerando que el operario trabaja de lunes a viernes.

Para optimizar los tiempos de rehabilitación del horno, se contempla la posibilidad de contratar dos operarios, lo que permitirá agilizar el proceso de fabricación y montaje de los componentes.

Es relevante tener en cuenta todas estas variables para realizar una evaluación precisa de los costos de mano de obra y así garantizar una planificación adecuada de los recursos económicos destinados a la rehabilitación del horno. La contratación de dos operarios puede ser una estrategia efectiva para acelerar los trabajos y asegurar una pronta puesta en marcha del equipo. La atención a estos detalles será fundamental para llevar a cabo el proyecto de manera eficiente.

En la Tabla 4.7 se presenta los costos indirectos, los cuales incluyen el consumo mensual de electricidad, factura de agua, la depreciación de la maquinaria y herramientas. Además de otros gastos indirectos que surgen de la fabricación e instalación de los componentes del horno como lo pueden ser artículos de aseo, entre otros.

Tabla 4.6. Costos estimados de mano de obra para la fabricación e instalación de todos los elementos necesarios para realizar la rehabilitación del horno.

Descripción		Tiempo de operación, h	P/U, \$/h	Cant.	P/T, \$
Fabricación de mesitas para la carga de nitruración	Medición y corte de lámina de acero inoxidable.	1	2.92	4	2.92
	Medición y corte de barra de acero inoxidable.	1	2.92	16	2.92
	Medición y corte de lámina desplegada	1	2.92	4	2.92
	Soldadura de todas las piezas para formar las mesitas que conforman la cesta.	3	8.76	4	8.76
Capa de pintura del horno	Preparación de las paredes del horno para la pintura.	2	5.74	1	5.74
	Primera capa de pintura	1.5	4.38	1	4.38
	Segunda capa de pintura	1	2.92	1	2.92
Fabricación del agitador	Medición y corte de alabes y anillo inferior	1	2.92	1	2.92
	Corte de barra sólida	1	2.92	1	2.92
	Perforación de barra solida	1	2.92	1	2.92
	Soldar los componentes	2	2.92	1	5.84
Fabricación del anillo de soporte	Medición y corte de la pletina	1	2.92	1	2.92
	Soldadura de los componentes	1	2.92	1	2.92
Montaje de tapadera superior	Colocación de cuerda de asbesto, colocación del anillo de soporte, colocación de la tapadera superior	1	2.92	1	2.92
Montaje del panel de control de amoníaco	Colocación de la chapa, colocación de los componentes	2	2.92	1	5.84
Fabricación de la tubería del sistema de evacuación de gases	Medición y corte de los tubos	1	2.92	2	2.92
	Fabricación de las roscas en los tubos	1	2.92	5	2.92
	Ensamble de la tubería	1	2.92	2	2.92
Conexión eléctrica	Cableado de las conexiones	2	2.92	1	5.84
	Programación del controlador	1	2.92	1	2.92
	Verificación del funcionamiento del panel	4	2.92	1	11.68
Elaboración y montaje de la resistencia eléctrica	Maquinado de la barra de acero para fabricar el mandril guía para el enrollado de la resistencia.	1	2.92	1	2.92
	Fabricación de la resistencia	4	2.92	1	11.68
	Prueba de la resistencia	1.5	2.92	1	4.38
	Montaje de la resistencia en el refractario de cámara de carga	3	2.92	1	8.76
Subtotal =					116.70

Tabla 4.7. Costos indirectos de fabricación e instalación para la rehabilitación del horno.

Elemento	P/T, \$
Consumo de electricidad y agua	75.00
Depreciación de maquinaria y herramientas	150.00
Otros gastos	50.00
Subtotal =	275.00

Tras llevar a cabo un minucioso y exhaustivo proceso de recopilación y análisis de todos los costos directos e indirectos relacionados con la rehabilitación del horno de nitruración, se ha obtenido un conjunto de datos valioso que tiene un papel fundamental en la toma de decisiones y la planificación financiera del proyecto.

La información resultante brinda una base sólida y confiable para que los responsables del proyecto asignen los recursos de manera eficiente, garantizando una ejecución adecuada de la rehabilitación del horno en términos económicos. Al contar con este análisis financiero detallado, se asegura la viabilidad económica del proceso de rehabilitación.

En la Tabla 4.8 se presenta un resumen, claro y conciso, de todos los costos involucrados en el proceso de rehabilitación del horno de nitruración. Este resumen incluye tanto los costos directos, relacionados directamente con la adquisición de materiales y equipos específicos para la rehabilitación, como los costos indirectos, que abarcan gastos generales y otros recursos necesarios para respaldar el proyecto.

Tabla 4.8. Tabla resumen de los costos de rehabilitación del horno de nitruración.

Descripción	P/T,\$
Costo de materiales para el sistema eléctrico y control de temperatura	629.94
Costo de materiales para el sistema de agitación y sellado de la atmósfera	805.05
Costo de materiales para el panel de control de amoníaco.	1,618.20
Costo de materiales para el sistema de evacuación y tratamiento de gases.	227.50
Otros costos necesarios para la rehabilitación del horno.	1,168.58
Costos estimados de mano de obra para la fabricación e instalación de todos los elementos necesarios para realizar la rehabilitación del horno.	116.70
Costos indirectos de fabricación e instalación para la rehabilitación del horno.	275.00
Total =	4,642.97

La presentación estructurada de los costos en la tabla facilita su comprensión y permite una visualización rápida y precisa de los recursos financieros necesarios para llevar a cabo la rehabilitación con éxito. Este enfoque técnico y analítico garantiza una

gestión financiera efectiva y optimizada del proyecto de rehabilitación del horno de nitruración, maximizando las probabilidades de alcanzar los objetivos establecidos en términos económicos.

### **4.3. DISPONIBILIDAD DE MATERIALES**

La obtención de los componentes necesarios para llevar a cabo el proceso de rehabilitación del horno de nitruración se priorizará en el mercado nacional, buscando así asegurar la disponibilidad y reducir los costos asociados con impuestos y tasas aduanales. En caso de que sea necesario buscar proveedores fuera del país, se explorarán mercados cercanos para minimizar cualquier impacto negativo en los precios debido a complicaciones económicas posteriores a la pandemia de COVID-19 y problemas políticos mundiales que puedan afectar las cadenas de suministro.

Es importante tener en cuenta que los costos de los componentes no solo dependen de la proximidad geográfica de los proveedores, sino también de las fluctuaciones en los precios causadas por las condiciones económicas y políticas globales. Estos factores pueden influir en los costos de materiales y transporte, lo que se tomará en consideración durante el proceso de adquisición.

Cabe mencionar que, dentro de la disponibilidad de los componentes, no se incluyeron los cilindros de amoníaco debido a la posibilidad de que se requieran permisos especiales para su adquisición y posesión. Es fundamental respetar todas las regulaciones y requisitos legales relacionados con la obtención y uso de estos cilindros, así como evaluar los costos y trámites adicionales que esto pueda generar.

En conclusión, se realizarán esfuerzos para obtener los componentes necesarios principalmente en el mercado nacional, con la precaución de explorar mercados cercanos en caso de ser necesario. Se considerará cuidadosamente cualquier impacto económico y político que pueda afectar los precios y la disponibilidad de los materiales. Además, se tomarán en cuenta las regulaciones y permisos especiales que puedan ser requeridos para la adquisición de ciertos elementos, asegurando una rehabilitación eficiente y cumplimiento de los requisitos legales.

## CONCLUSIONES

Al culminar el presente trabajo de graduación centrado en la propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca WILD BARFIELD, modelo TRT.1010, se pueden extraer las conclusiones siguientes:

- ✓ La evaluación de las condiciones iniciales del horno emerge como un punto de partida crucial en el proceso de rehabilitación. Esta evaluación abarca aspectos como la estructura, los sistemas de control y los equipos auxiliares. Además, se ha demostrado que la selección cuidadosa de materiales, la optimización de los sistemas de control térmico y de procesos contribuyen de manera significativa a la eficiencia y calidad mejoradas en el proceso de nitruración; asimismo, es de suma importancia contar con un horno de nitruración en la universidad, con el propósito que los estudiantes logren desarrollar otras capacidades relacionadas a los diferentes tratamientos térmicos.
- ✓ La información recopilada mediante la investigación fue fundamental para comprender el funcionamiento y parámetro de diseños de los diferentes elementos y sistemas que componen el horno de nitruración. Esta información y la combinación de conocimientos adquiridos de ingeniería mecánica permitió seleccionar el uso de una resistencia eléctrica calefactora como el método más adecuado para el calentamiento.
- ✓ El sistema de control para la medición de temperatura en el horno de nitruración se basa en un controlador PID que utiliza retroalimentación de la señal analógica de la termocupla. Este enfoque permite un control más preciso de los gradientes de velocidad térmica, tanto durante el calentamiento del horno como al mantener la temperatura constante para el proceso de nitruración. Lo que demuestra ser la opción más acertada tanto para controlar como para registrar la temperatura, además de ser un entorno bastante amigable para los operarios.

- ✓ El costo total estimado para la rehabilitación del horno de nitruración asciende a aproximadamente \$4,642.97. Esta cifra abarca todos los componentes necesarios para la puesta en marcha del horno, así como los sistemas auxiliares requeridos para asegurar su funcionamiento óptimo
- ✓ Durante la rehabilitación del horno, se ha optimizado la cámara de carga para posibilitar la realización de trabajos con cargas específicas de hasta 8 kg, distribuidas en 4 niveles de 2 kg cada uno, durante un período de tratamiento de 17 horas, a una temperatura constante de 500 °C. Estas condiciones han sido rigurosamente establecidas para lograr capas nitruradas con un espesor de 2 mm, que se considera óptima para alcanzar los resultados deseados en las piezas tratadas.
- ✓ Para llevar a cabo este proceso de manera eficiente, se ha calculado un consumo de potencia de 3.96 kW, teniendo en cuenta las pérdidas por radiación, conducción y convección hacia el ambiente. Este cálculo preciso asegura una gestión adecuada del consumo energético. El diseño del horno ha sido planificado con gran detalle para mantener las condiciones necesarias de temperatura y tiempo requeridas para una nitruración efectiva, al mismo tiempo que se optimiza la eficiencia energética.

## RECOMENDACIONES

En este apartado, se presentan algunas recomendaciones de fundamental importancia con el fin de garantizar la óptima operatividad y seguridad del horno de nitruración a través de la mejora y modernización de su instalación eléctrica. La correcta gestión de la energía eléctrica es esencial para asegurar la eficiencia de los procesos térmicos y mantener un entorno de trabajo seguro para los operadores:

- Supervisar la instalación y realizar pruebas exhaustivas antes de poner en funcionamiento los hornos. Esto incluye pruebas de carga, pruebas de funcionamiento y verificación de que todos los sistemas de seguridad estén operativos.
- Mantener registros detallados de todos los aspectos del proyecto, desde el diseño hasta la implementación y las pruebas. Esto será útil para futuras referencias y mantenimientos.
- Establecer un presupuesto inicial para la rehabilitación del horno, según la estimación de costos, pero asegurarse de que este sea lo suficientemente flexible para que se adapte a posibles aumentos de costos debido a la inflación. Además, considerar un margen adicional para imprevistos.
- Proporcionar capacitación a todos los trabajadores y estudiantes, que utilizarán el horno de nitruración sobre la importancia del EPP y cómo utilizarlo correctamente. Así, se debe asegurar que los usuarios comprendan los riesgos asociados con el proceso de nitruración.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barreiro, J.A. (1986). Aceros especiales y otras aleaciones (6.<sup>a</sup> ed.). Dossat de España, S.A.
- [2] Cabo A (1982), "Tecnología de Tratamientos Térmicos", Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.
- [3] Va Larre. (s. f.). Metalografía y tratamientos térmicos (1.<sup>a</sup> ed.). [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/13.\\_Nitruracion\\_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/13._Nitruracion_v2.pdf).
- [4] Lajtín, Y., & Arzamánov, B. (1985). Tratamiento químico-térmico de los metales (1.a ed.). Editorial MIR.
- [5] Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). Tratamientos Termoquímicos. Temas Para La Educación, 14. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docuipdf.aspx?d=8426&s=>.
- [6] Wild Barfield TRT 1010 VFC. (s. f.). Riley Surface World. Recuperado 20 de febrero de 20d. C., de <https://www.rileysurfaceworld.co.uk/live/machines2/24453.pdf>
- [7] B. Hornos para nitruración, «BMI-FOURS,» BMI, [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/horno-tratamiento-termico-150799.html>.
- [8] Taghavi. (2011). "Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank". Chemical Engineering Research and Design., 300.
- [9] Medina Lezama, E., & Miranda Zanardi, L.F. (2011). Agitación y mezclado. pdfslide.net. Recuperado 11 de marzo de 2023, de <https://pdfslide.net/documents/agitacion-y-mezclado-562016e93bcec.html>
- [10] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2020). Decreto No 527.- Ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje. Diario Oficial de El Salvador, 426. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/decreto-no-527-ley-de-gestion-integral-de-residuos-y-fomento-al-reciclaje/>
- [11] Infra de El Salvador, S.A. de C.V. (2006, octubre). Hoja de seguridad del nitrógeno. Infrasal. Recuperado 11 de marzo de 2011, de
- [12] ISQUISA S.A. de C. V. (2021, enero). Hoja de datos de seguridad del hidróxido de amoníaco. ISQUISA. Recuperado 11 de marzo de 2023, de <https://isquisa.com/assets/files/HDSLISTOS/HIDROXIDOS/HDSHidr%C3%B3xido%20de%20Amonio.pdf>
- [13] Martínez Díaz, A. (2018). Estudio de la separación de hidrógeno en una mezcla gaseosa por membrana densa de paladio. Universidad politécnica de Madrid.
- [14] Cengel, Y.A., & Boles, M.A. (2011). Termodinámica (7.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. DE C.V.



- [15] Cengel, A.Y. & Ghajar, A.J. (2011). Transferencia de calor y masa (4.<sup>a</sup> ed.) McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. DE C.V.
- [16] Kanthal. (2003). Kanthal handbook: Heating alloys for electric household appliances (1.a ed.). <http://www.west-l.com/uploads/tdpdf/06080303.pdf>
- [17] Avner, S.H. (1988). Introducción a la metalurgia física (2.<sup>a</sup> ed.). Calypso, S.A. México.
- [18] Bleier, F.P. (1997). FAN HANDBOOK: SELECTION, APPLICATION, AND DESIGN (1.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- [19] Shigley, J.E. (2008). Diseño en ingeniería mecánica (9.<sup>a</sup> ed.). The McGraw-Hill.
- [20] VITLAB GmbH. (s/f-b). *Productos de plástico fluorado: VITLAB productos de lab. (ES)*. Vitlab.com. Recuperado el 6 de mayo de 2023. mailto: <https://www.vitlab.com/es/productos/conocimiento/productos-de-plastico-fluorado/h>

## ANEXOS

### ANEXOS A: ESTADO ACTUAL DEL HORNO

#### ANEXO A.1. VISTA SUPERIOR DE LA CÁMARA DE CARGA DEL HORNO



#### ANEXO A.2. ESTADO ACTUAL DEL PANEL DE CONTROL DE TEMPERATURA



**ANEXO A.3. ESTADO DEL SENSOR DE TEMPERATURA (TERMOCUPLA)**



**ANEXO A.4. VISTA DE LA UBICACIÓN DE MOTOR**



## ANEXOS B: COTIZACIONES

### ANEXO B.1. COTIZACIÓN DE TERMOCUPLA PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA



INDELPIN S.A. de C.V.

Nº COTIZACION

10396 / 2023

Empresa : UNIVERSIDAD NACIONAL DE EL SALVADOR (UES)

Fecha : 13/05/2023

Atención : Renato Cea

C.C. :

Referencia :

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	TOTAL
	1	Termocupla tipo K 1/4 x 18 largo cortable, temperatura 1260 centigrados, Reotemp	\$ 52.00	\$ 52.00

### ANEXO B.2. COTIZACIÓN DE INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO CON CONTROL DE TEMPERATURA



## AUTOMATO 20 AMP 2 POLOS

CODIGO 21190530 / MODELO 5SL62207CC

[Agregar a favoritos](#)

**\$15.00**

1

[Agregar a carrito](#)

UNIDAD: C/U  
SIEMENS

[Disponible](#)  
Despacho a domicilio

[Disponible](#)  
Retiro en tienda

#### INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

- UTILIZA PEINE ESTANDAR PARA SU INSTALACIÓN EN RIEL DIN
- INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 230/400 V 6 KA
- CURVA DE DESPARO C

### ANEXO B.3. COTIZACIÓN DE PULSADOR



Pulsador verde 1na  
3su11000ab401ba0 SIEMENS

**\$27.95** PZA

10+ Disponible(s)

Sku#: 44780 Modelo: 3SB3202-0AA41

- 1 +

AGREGAR AL CARRITO

[Consulta la disponibilidad](#)

### ANEXO B.4. COTIZACIÓN DE CONTACTOR PARA EL PANEL DE CONTROL DE TEMPERATURA



**CONTACTOR 25 AMP 120  
VAC 1NO AC3**

CODIGO 638239 / MODELO NC1-2510-1

[Agregar a favoritos](#)

**\$21.90**



Este producto no está disponible en la tienda seleccionada

[Ver disponibilidad en tiendas](#)

UNIDAD: C/U  
CHINT

#### INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

- CERTIFICADOS: CE/ KEMA/ VDE/ EK/ ESC/ UKRSEPRO/ GOST/ RCC/ UL
- CLASIFICACIONES ELÉCTRICAS: AC50 / 60HZ 690V HASTA 95A
- APLICACIÓN: FABRICACIÓN REMOTA Y CIRCUITOS DE RUPTURA



## ANEXO B.5. COTIZACIÓN DE TOMA MACHO TRIFÁSICO PARA ALIMENTAR EL HORNO



### TOMA MACHO INDUSTRIAL 415 V 32 AMP EXTENSION IP44

CODIGO 46977237 / MODELO 555238

 [Agregar a favorito](#)

**\$6.95**

UNIDAD: CU  
LEGRAND



Este producto no está disponible en la tienda seleccionada

[Ver disponibilidad en tiendas](#)

#### INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

- ASEGURA UNA CONEXIÓN FÁCIL Y RÁPIDA DE LOS CABLES EN LAS MEJORES CONDICIONES POSIBLES
- RESISTENTE AL POLVO HUMEDAD ALTAS O BAJAS TEMPERATURAS GOLPES

## ANEXO B.6. COTIZACIÓN DE LÁMINA DE ACERO PARA EL PANEL DE AMONÍACO



**VIDRI** Departamentos    

[Inicio](#) / [Ferretería y cerrajería](#) / [Ferretería](#) / [Láminas](#) / Lámina de acero inoxidable Itax



### Lámina de acero inoxidable calibre 24 0.6mm de 2 x 1 mts

**\$94.95** PLU

100% Disponible(s)

sku#: 8201 Modelo:

[Consulta la disponibilidad](#)

Advertencia de uso

Para el uso correcto de nuestros productos, seguir las indicaciones incluidas en manuales de usuario e instrucciones de seguridad establecidas por el fabricante.

## ANEXO B.7. COTIZACIÓN DE CODO DE ACERO INOXIDABLE PARA EL PANEL DE AMONIACO



The screenshot shows the product page for a stainless steel elbow on the Vidri website. The page includes the Vidri logo, a navigation menu with 'Departamentos', a search bar with 'Buscar producto', and icons for user profile and shopping cart. The product image shows a stainless steel elbow with a threaded end. The product details are as follows:

- Producto:** Codo acero inoxidable 1/4 pulg x 90 grados
- Precio:** \$1.95<sup>PZA</sup>
- Disponibilidad:** Disponible
- SKU:** 46900 **Modelo:**
- Botones:** - 1 + (quantity selector) and AGREGAR AL CARRITO (add to cart)
- Enlaces:** [Consulta la disponibilidad](#) and [Advertencia de uso](#)
- Advertencia de uso:** Para el uso correcto de nuestros productos, seguir las indicaciones incluidas en manuales de usuario e instrucciones de seguridad establecidas por el fabricante.

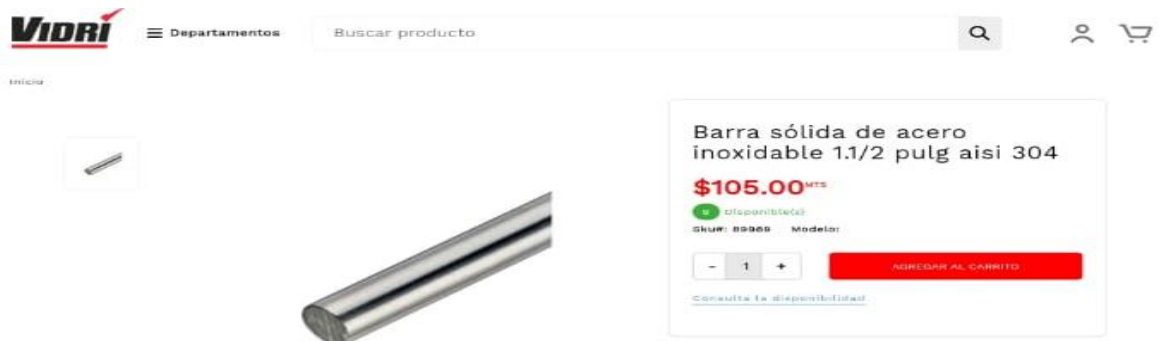
## ANEXO B.8. COTIZACIÓN DE VÁLVULA DE BOLA DE INOXIDABLE PARA EL PANEL DE AMONIACO



The screenshot shows the product page for a stainless steel ball valve on the Vidri website. The page includes the Vidri logo, a navigation menu with 'Departamentos', a search bar with 'Buscar producto', and icons for user profile and shopping cart. The product image shows a stainless steel ball valve with a blue handle. The product details are as follows:

- Producto:** Válvula de bola inoxidable 1/4 pulg GENEBRE
- Precio:** \$12.75<sup>PZA</sup>
- Disponibilidad:** Disponible
- SKU:** 48563 **Modelo:** 2014-02
- Botones:** - 1 + (quantity selector) and AGREGAR AL CARRITO (add to cart)
- Enlaces:** [Consulta la disponibilidad](#) and [Advertencia de uso](#)
- Garantía:** Garantía 3 meses
- Advertencia de uso:** \* Todos nuestros productos deben pasar la revisión correspondiente para aplicar la garantía

## ANEXO B.9. COTIZACIÓN DE PARTE CENTRAL DEL AGITADOR



The screenshot shows the product page for a stainless steel solid bar on the Vidri website. The page includes the Vidri logo, a navigation menu with 'Departamentos', a search bar with 'Buscar producto', and icons for user profile and shopping cart. The product image shows a stainless steel solid bar. The product details are as follows:

- Producto:** Barra sólida de acero inoxidable 1.1/2 pulg asi 304
- Precio:** \$105.00<sup>MES</sup>
- Disponibilidad:** Disponible
- SKU:** 89988 **Modelo:**
- Botones:** - 1 + (quantity selector) and AGREGAR AL CARRITO (add to cart)
- Enlaces:** [Consulta la disponibilidad](#)

## ANEXO B.10. COTIZACIÓN DE PINTURA ANTICORROSIVA PARA EL HORNO



### ANTICORROSIVO BASE SOLVENTE PARA METAL GRIS BRILLANTE RAL 7046 DIRECT TO METAL KEM DTM

CODIGO 586483 / MODELO E67ASA1-1

Agregar a favoritos

**\$36.90**

1 Agregar a carrito

UNIDAD: 1GLN  
SHERWIN WILLIAMS

Disponible  
Despacho a domicilio

Disponible  
Retiro en tienda

## ANEXO B.11. COTIZACIÓN DE TUBO DE ACERO INOXIDABLE PARA EVACUACIÓN DE GASES



Departamentos

Buscar producto



[Inicio](#) / [Herramientas](#) / [Industrial](#) / [Accesorios acero inoxidable](#) / [Tubería](#)



Tubo acero inoxidable 1 pulg x 20 pies cedula 40

**\$150.00**<sup>PZA</sup>

Disponible(s)

Sku#: 40243 Modelo:

- 1 +

AGREGAR AL CARRITO

[Consulta la disponibilidad](#)

Garantía 1 mes

Advertencia de uso

Todos nuestros productos deben pasar la revisión correspondiente para aplicar la garantía



## **ANEXO C: GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO**



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPTO. MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN  
ASIGNATURA:**

**PRÁCTICA DE LABORATORIO # I:  
NITRURACIÓN GASEOSA**



## I. INDICACIONES GENERALES

Se exige puntualidad. Para realizar la práctica de laboratorio. Deberán portar vestimenta adecuada, la cual consiste en la utilización de gabacha, zapatos cerrados de preferencia zapatos de seguridad, gafas de seguridad, **mascarillas** y otros implementos que le serán proporcionados según sea necesario.

## II. ANTECEDENTES

La nitruración es un proceso termoquímico utilizado para mejorar la resistencia y dureza superficial de materiales metálicos mediante la introducción de átomos de nitrógeno en la capa superficial de la pieza. El proceso de nitruración se lleva a cabo en un entorno controlado de nitrógeno, donde los átomos de nitrógeno reaccionan con los elementos presentes en la superficie del metal para formar compuestos intersticiales ricos en nitrógeno.

En 1861, Fremy descubrió que el nitrógeno endurece los aceros al experimentar con amoníaco a altas temperaturas. Aunque se mostró interés, la fragilidad de la capa endurecida impidió su éxito industrial por años. En 1905, Braune identificó un eutectoide similar a la perlita, llamado braunita, formado por hierro y nitruro de hierro en aceros nitrurados. Tras la Primera Guerra Mundial, en 1923, Fry de Krupp resolvió la fragilidad al usar temperaturas más bajas (~500 °C) y aceros con aluminio, cromo y molibdeno, en lugar de carbono. Realizar el proceso cerca de 500 °C evita la formación de braunita en la capa superficial, a diferencia de tratamientos a altas temperaturas.

En general, es muy difícil el estudio metalográfico de las piezas de aceros aleados nitrurados a temperaturas corrientes (~500 °C), por ser generalmente de tamaño submicroscópico los nitruros que se forman en ese proceso. En el diagrama hierro-nitrógeno (ver Fig. C.1.) se señalan los principales constituyentes que pueden aparecer, determinados en su mayor parte nitrurado los aceros a temperaturas mucho más elevadas que la normal, porque de esa forma se facilita mucho su estudio.

Aunque en la actualidad no existe unanimidad absoluta en la interpretación de los fenómenos de endurecimiento que se producen en la nitruración, la teoría más admitida es la desarrollada por Fry y colaboradores, que señalan que la gran dureza de la capa nitrurada es debida a que el nitrógeno o los nitruros que se forman en el proceso originan una fuerte deformación de la red cristalina del acero situado en la zona periférica de las piezas, que es la causa directa del aumento en la dureza.

En sus experiencias, Fry no consiguió resultados satisfactorios con los aceros al carbono, pues obtenía durezas relativamente bajas y las capas nitruradas tenían poca tenacidad. Más tarde, nitrurando aceros aleados alcanzó un gran éxito al descubrir la influencia decisiva del aluminio, cromo y molibdeno y al hallar ciertas composiciones con las que se obtienen capas nitruradas de extraordinaria dureza, bastante profundidad y buena tenacidad. Por lo tanto, siguiendo el diagrama Fe-N (ver Fig. C.1) se pueden distinguir las fases siguientes:

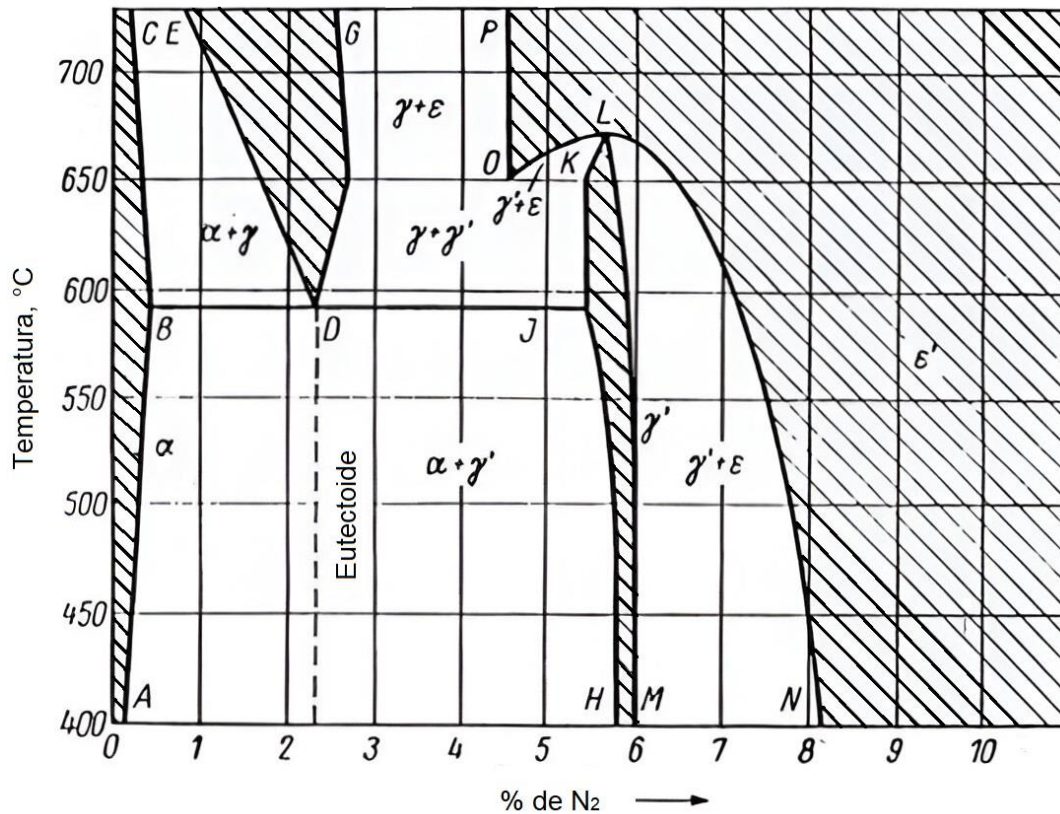


Fig. C.4. Diagrama de fases de Fe-N.

- La fase  $\alpha$ - Ferrita nitrogenada con una red BCC, según el contenido de nitrógeno, de 0.28664 y 0.2877 nm. La solubilidad del nitrógeno en el hierro  $\alpha$  a la temperatura eutectoide no supera el 10 % descendiendo a la temperatura ambiente hasta el 0.004 %. La solubilidad de la fase  $\alpha$  en nitrógeno es baja a temperatura de nitruración y prácticamente nula a temperatura ambiente.
- La fase  $\gamma$ - Austenita nitrogenada, tiene la red cúbica centrada en las caras ( $a = 0.3613$  para 1.45 % de N y  $a = 0.3648$  para el 2.79 % de N), la solubilidad máxima del nitrógeno en la fase  $\gamma$  es de 2.8 % a 560 °C. La fase  $\gamma$  sufre descomposición eutectoide  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$ .
- La fase  $\gamma'$ . Solución sólida a base de nitruro de hierro de  $\text{Fe}_4\text{N}$  con la red FCC ( $a = 0.3791\text{-}0.3801$  nm) con una zona estrecha de homogeneidad de 5.3 y 5.75 % de N (según otros datos, un 5.77 a 6.88 % de N); la fase  $\gamma'$  es estable sólo hasta 680 °C. A temperaturas más altas se forma la fase  $\alpha$ . Su dureza es de 4 a 5 veces más alta que la del hierro puro ( $\text{HV} \approx 800$ ).
- La fase  $\epsilon$ - Solución sólida intersticial, la base de nitruro  $\text{Fe}_2\text{N}$  y  $\text{Fe}_3\text{N}$  (4.5-11 % de N), la red cristalina es hexagonal ( $a = 0.270\text{-}0.2764$  nm,  $c = 0.433\text{-}0.441$  nm, dependiendo del contenido en nitrógeno). A 650 °C y con una concentración de nitrógeno de 4.5 % la fase  $\epsilon$  sufre la descomposición eutectoide en las fases  $\gamma$  y  $\gamma'$ .

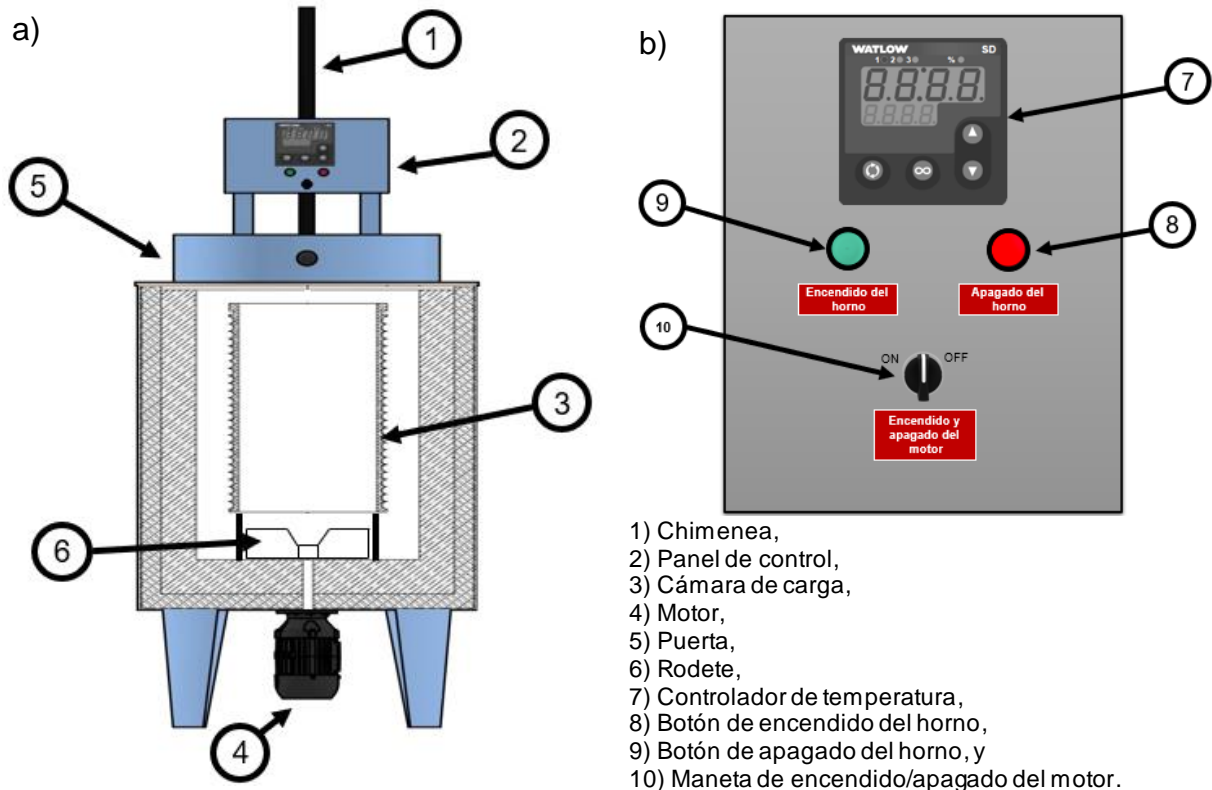


Fig. C.2. Horno de nitruración: a) vista frontal con corte en la cámara de carga; b) Panel de control.

### COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS A NITRURAR

Normalmente se emplean aceros entre 0.2 y 0.60 % de C, aleados con Al, Cr, Mo y V. El contenido de C no influye en la dureza y levemente en la profundidad de capa nitrurada, disminuyendo ésta con el % de C.

El Al es el elemento más importante para lograr las máximas durezas, aunque debe ir siempre acompañado de otros aleantes para evitar capas nitruradas muy frágiles. El Mo aumenta la dureza de la capa, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad de los aceros, cuando permanecen mucho tiempo a temperaturas próximas a 500 °C. El Cr y el V aumentan la profundidad de la capa dura.

Entre los grupos de aceros para nitruración más utilizados para dicho proceso son:

- 1) Aceros cromo-aluminio-molibdeno, con 0.80 a 1.20 % de Al, 0.9 a 1.60 % de Cr y 0.20 % de Mo, que se emplean en los casos en que interesa la máxima dureza superficial, que suele oscilar entre 1,000 y 1,100 HV. Estos aceros fueron los que más se utilizaron en los primeros tiempos cuando interesaba principalmente obtener durezas muy elevadas con gran resistencia al desgaste.
- 2) Aceros altos en cromo con molibdeno y vanadio. Aunque con estos aceros sólo se consiguen durezas superficiales comprendidas entre 800 y 850 HV, esas durezas son todavía extraordinarias y las capas nitruradas son mucho más tenaces que las de los aceros con aluminio. El contenido de cromo es de 3%; el de molibdeno de 0.40 a 1 % y el de vanadio de 0 a 0.25%. Ese elevado porcentaje de cromo aumenta ligeramente la profundidad de la capa nitrurada. Estos aceros se emplean cuando

interesa durezas muy elevadas, similares a la cementita, aunque conviene también que la capa nitrurada sea tenaz y esté bien adherida.

- 3) Aceros cromo-molibdeno-vanadio. Se obtiene durezas superficiales de 750 HV. El contenido de cromo es de 2%; el de molibdeno de 0.25% y el del vanadio de 0.15%. En estos aceros la dureza superficial es algo menos que la de los aceros anteriores, aunque la tenacidad de la capa nitrurada es mayor que en los casos anteriores.
- 4) Aceros cromo-molibdeno, que son de menor dureza superficial (650 HV), y tienen la capa nitrurada más tenaz que los anteriores. Su contenido en cromo es de 1% y en molibdeno de 1.20%.

En la Tabla C.1 se presenta de manera resumida los valores de durezas Vickers para diferentes composiciones de aceros para nitrurar.

Tabla C.4. Composiciones y características mecánicas de diversos aceros para nitruración.

Tipos de aceros	Composición, % en peso								Periferia	Núcleo
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Mo	V	Dureza Vickers	Templado y revenido a 650 °C, R <sub>máx</sub> , kg/mm <sup>2</sup>
Cr-Al-Mo	0.50	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	126
	0.40	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	98
	0.30	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	91
	0.25	0.35	0.65	-	1.60	1.10	0.20	-	1100	76
Alto Cr con Mo-V	0.40	0.30	0.50	0.30	3.00	-	1.00	0.25	850	133
	0.30	0.30	0.45	0.50	3.00	-	0.40	-	850	100
	0.25	0.30	0.45	0.50	3.00	-	0.40	-	850	79
Cr-Mo-V	0.35	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	98
	0.25	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	94
	0.22	0.30	0.50	-	2.00	-	0.25	0.15	750	83
Cr-Mo	0.30	0.30	0.60	0.60	1.00	-	0.20	-	650	92

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA NITRURACIÓN

Algunas de las propiedades más importantes obtenidas a partir del proceso de nitruración son las siguientes:

- ✓ Gran dureza: Después de la nitruración se consiguen durezas elevadísimas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial. Las piezas nitruradas pueden quedar con durezas comprendidas entre los 650 y los 1,100 HV, según la composición del acero. Cuando interesa que la capa dura sea de gran tenacidad, conviene utilizar aceros que después de la nitruración queden con durezas relativamente bajas (650 a 850 HV) porque las capas nitruradas de máxima dureza tienen menor tenacidad.
- ✓ Gran resistencia a la corrosión: Los aceros, después de la nitruración, resisten mejor la acción corrosiva del agua dulce, agua salada, vapor o atmósferas húmedas que los aceros sin nitruración, por lo que este proceso es muy utilizado para las piezas que deben sufrir la acción de ciertos agentes corrosivos. En el caso de que interese la

máxima resistencia a la corrosión, no se deben rectificar las piezas después de haber sido nitruradas.

- ✓ Endurecimiento exclusivo de determinadas superficies de las piezas: Durante la nitruración se pueden proteger perfectamente las superficies de las piezas que no se desea endurecer, aunque sean de formas complicadas e irregulares, dejando libres para nitrurar exclusivamente las zonas que interesa endurecer.
- ✓ Retención de las durezas a temperaturas elevadas: Las capas nitruradas conservan gran dureza hasta los 500 °C, especialmente cuando la duración del calentamiento no es muy prolongada.

Algunas de las desventajas de realizar un tratamiento de nitruración son las siguientes:

- ✓ Se tiene un mayor costo en comparación a otros tratamientos superficiales, debido a los largos tiempos que se necesitan para penetrar un milímetro en la capa de la pieza a tratar, que son alrededor de 100 h.
- ✓ Se tiene una alta dificultad para cubrir las zonas que no requieren nitruración, esto mucho más en piezas que son de forma geométrica compleja.
- ✓ La capa endurecida es delgada en comparación a la cementación.
- ✓ La principal desventaja de este proceso es el costo elevado, ya que se necesitan aceros aleados y una atmósfera de amoníaco y nitrógeno en algunos casos, que generan altos costos.

### **III. OBJETIVO GENERAL**

El propósito de esta práctica de laboratorio es brindar a los estudiantes de Ingeniería Mecánica la oportunidad de explorar y comprender el proceso de nitruración gaseosa, un tratamiento termoquímico utilizado para mejorar la dureza y la resistencia al desgaste en materiales metálicos. Los estudiantes llevarán a cabo la nitruración en una muestra de acero utilizando un horno de tratamiento térmico, medirán la dureza resultante y realizarán ensayos pertinentes para evaluar las propiedades mejoradas.

### **IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Optimizar los parámetros de temperatura y tiempo de exposición para lograr la máxima profundidad y dureza de la capa nitrurada en aceros específicos.
- Estudiar el impacto de diferentes pretratamientos superficiales en la adherencia y calidad de las capas nitruradas, buscando mejorar la uniformidad y adherencia de las mismas.
- Caracterizar la microestructura presente en las capas nitruradas utilizando la técnica de microscopía metalográfica.
- Realizar ensayos de dureza y desgaste para verificar el impacto de la nitruración en muestras de aceros específicos.
- Desarrollar procedimientos de inspección no destructiva para evaluar la calidad de las capas nitruradas y su conformidad con los estándares de la industria.

## V. TIEMPO REQUERIDO

200 minutos

## VI. INSTRUMENTACIÓN A UTILIZAR

Equipo de seguridad industrial:

- Gabacha
- Zapato industrial (zapatos que no permitan el ingreso de salpicaduras)
- Lentes de seguridad industrial
- Mascarilla Moldex serie 800 con filtros para amoníaco (Para toda aquella persona que esté operando o cerca del horno).



Fig. C.3. Mascarilla rostro completo Moldex serie 800 con filtros para amoníaco.

Equipo de trabajo:

- Horno de nitruración gaseosa (Fig. C.2.)
- Durómetro
- Microscopio metalográfico
- Reactivos para revelado metalográfico
- Pinzas
- Cierra de mano
- Lijas desde 500 a 1,200

Material de trabajo:

- Barra de Acero AISI 4140, 1 pulg de diámetro.



## VI. PROCEDIMIENTO

### Preparación de la Muestra:

- 1) Corte y acondicionamiento de la muestra de acero en tamaños adecuados (el tamaño dependerá de las indicaciones del encargado del laboratorio) para las pruebas.
- 2) Lijado y pulido de las muestras para obtener una superficie apta para el proceso y su posterior estudio.

### Preparación del Horno:

- 1) Asegurarse de que el horno esté limpio y en buen estado de funcionamiento.
- 2) Configurar el horno para la nitruración y ajustar los parámetros de temperatura, tiempo y flujo de gas nitrurante según los valores recomendados del encargado del laboratorio.

### Nitruración Gaseosa:

- 1) Colocar las muestras de acero en el horno (ver Fig. C.3) siguiendo las pautas de seguridad.

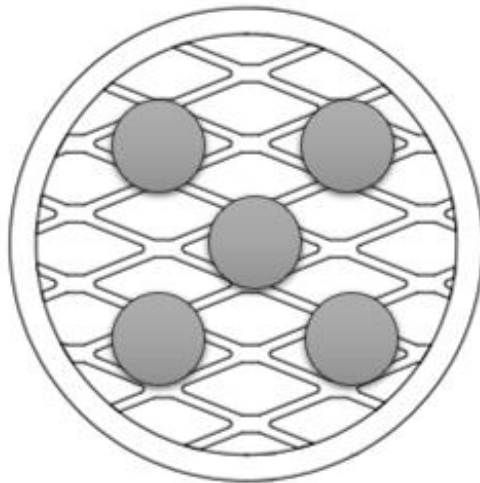


Fig. C.3. Forma de colocar las muestra a nitrurar en la parrilla.

- 2) Introducir la mezcla de gas nitrurante ( $\text{NH}_3$ ) en el horno según la configuración establecida, posterior a la indicación auditiva que el horno emite al alcanzar la temperatura del proceso.
- 3) Monitorear y registrar la temperatura a intervalos regulares para tener mayor registro del proceso.

### Enfriamiento y Preparación Post-Tratamiento:

- 1) Apagar el flujo de gas nitrurante y permitir que las muestras se enfríen dentro del horno.
- 2) Retirar las muestras del horno una vez que se haya alcanzado una temperatura segura.
- 3) Llevar a cabo una limpieza superficial de las muestras.

Medición de la Dureza:

- 1) Utilizar el durómetro para medir la dureza en diferentes puntos de las muestras nitruradas y no nitruradas.
- 2) Registrar los valores de dureza obtenidos y realizar un análisis comparativo.

Análisis Metalográfico:

- 1) Preparar las muestras nitruradas y no nitruradas para el análisis metalográfico mediante lijado y pulido.
- 2) Utilizar el microscopio metalográfico para examinar la microestructura de las muestras.
- 3) Realizar el revelado metalográfico para resaltar las fases presentes en la superficie de las muestras.

Otros Ensayos Pertinentes:

- 1) Realizar ensayos de resistencia al desgaste en las muestras nitruradas y no nitruradas.
- 2) Analizar y comparar los resultados para evaluar la mejora en la resistencia al desgaste.

## **VII. BIBLIOGRAFÍA**

- Barreiro, J. A. (1986). Aceros especiales y otras aleaciones (6.<sup>a</sup> ed.). Dossat de España, S.A.
- Va Larre. (s. f.). Metalografía y tratamientos térmicos (1<sup>ra</sup> ed.).

## ANEXO D: INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN Y ENSAMBLE

En las siguientes secciones, se encuentran las instrucciones necesarias sobre la instalación y ensamblaje de todas las partes esenciales para la rehabilitación del horno. Desde componentes internos clave hasta elementos externos de control y seguridad, se abordará cada aspecto importante para garantizar un proceso de rehabilitación exitoso.

### ➤ Elementos a instalar.

En la Tabla D.1, se detallan los componentes que deben ser instalados y previamente ensamblados en el horno de nitruración, debido a la modernización que conlleva la rehabilitación.

Tabla D.1. Componentes a instalar y ensamblar para la rehabilitación.

Nombre	Cantidad
Instalación del motor eléctrico	1
Instalación del agitador de la atmósfera	1
Instalación del anillo de soporte superior y la tapadera superior del horno	1
Resistencia eléctrica	1
Panel de control de temperatura y alimentadores	1
Termocupla	1

### ➤ Instalación del motor eléctrico

El motor eléctrico estará ubicado en la parte inferior del horno, se colocará de tal forma que facilite su conexión eléctrica (ver Fig. 3.17 ).

- 1) Ubicar el motor eléctrico en la parte inferior del horno de nitruración, si es necesario se deberá de elevar el horno con la ayuda de una grúa a una altura que permita ubicar el motor sin problemas.
- 2) Aliena los agujeros de la brida del motor con los pernos de sujeción
- 3) Introduzca el eje del ventilador en el agujero en la parte inferior del horno
- 4) Vuelva a colocar las tuercas de fijación inferiores y apriételas contra la brida y las tuercas de fijación superiores.
- 5) Coloque una cuerda de asbesto nueva cubierta con grasa de grafito alrededor del eje del ventilador en el hueco del enladrillado en la parte inferior de la cámara

- 6) Vuelva a conectar los cables del motor a sus terminales respectivos y vuelva a colocar la tapa de terminales. El ventilador debe girar en el sentido de las agujas del reloj en el caso de un motor trifásico, intercambie los dos cables del motor

➤ Instalación del agitador de la atmósfera

La instalación del anillo superior y la tapadera superior del horno se debe realizar después del agitador. Según instrucciones:

- 1) Abra la puerta del horno y retire la protección del ventilador. (Si no se han hecho las conexiones de la resistencia eléctrica y la termocupla se puede retirar el material refractario para mayor comodidad).
- 2) Realizar una limpieza del interior del horno, para evitar que la suciedad se acumule entre el fondo del horno y el agitador.
- 3) Introduzca el ventilador a través del anillo inferior de la cámara. Se han cortado dos muescas en este anillo para permitir que el ventilador pase, estas muescas se muestran a 90° de las aspas del ventilador.
- 4) El ventilador debe bajarse verticalmente sobre el eje del ventilador y no debe forzarse.
- 5) Apriete los tornillos de fijación. Primero apriete un tornillo medio vuelta y luego el otro de manera similar, hasta que ambos estén apretados.
- 6) Entrelace de forma segura los dos tornillos de fijación con un cable resistente al calor, como uno de níquel-cromo calibre 18.
- 7) Vuelva a colocar la protección del ventilador.

➤ Instalación del anillo de soporte superior y la tapadera superior del horno

Previamente a la instalación de la tapadera superior del horno, se debe hacer la instalación del agitador, la colocación de la resistencia eléctrica y su respectiva conexión eléctrica. Según instrucciones:

- 1) Retirar la puerta del horno
- 2) Colocar la cuerda de asbesto en el canal que se encuentra en el interior del horno.

- 3) Colocar el anillo de soporte superior sobre la cámara de nitruración (sobre el material refractario).
- 4) Manteniendo centrado el anillo de soporte superior, colocar la tapadera superior del horno.
- 5) Colocar los tornillos para asegurar la tapadera superior del horno
- 6) Vuelva a colocar la tapadera del horno.

➤ Ensamble e instalación del panel de control de temperatura y alimentadores

En la actualidad el horno cuenta con una caja en donde anteriormente se encontraba el panel de control (con dimensiones de largo, ancho y alto de 14.5 X 8.5 X 16.7 cm, respetivamente) (ver Fig.D.1), la cual se encuentra en buen estado, por lo que se seguirá utilizando la misma, con el detalle que será necesario cambiar la cara de dicha caja para poder encajar ahí los componentes del nuevo panel.



Fig. D.1. Panel de control de temperatura actual.

Siga los siguientes pasos para ensamblar e instalar el panel de control:

- 1) Retirar todos los elementos antiguos dentro del panel de control, sin dañar ninguna parte de este.

- 2) Colocar los rieles DIN con las dimensiones adecuadas de la caja, para poder montar los termomagnéticos.
- 3) Realizar las perforaciones necesarias en la parte frontal según las dimensiones del componente que conforman el panel de control, dicha perforaciones se pueden realizar tomando de ejemplo, la Fig. 3.16.
- 4) Ubicado cada componente en la parte frontal del horno y en su interior, se debe realizar las conexiones según la Fig. 3.17, en donde se detalla de forma gráfica la interconexión entre cada uno de los componentes.
- 5) Finalizar con la conexión del alimentador macho con los termomagnéticos ubicados en la parte interior del panel de control del horno.

➤ Instalación de la resistencia eléctrica en el material refractario de la cámara de carga  
Posterior a la construcción de la resistencia eléctrica detallada en el apartado 2.4.2 del presente documento, seguir las instrucciones de instalación:

- 1) Extraer el material refractario, con el cuidado de dejarlo caer ya que podría sufrir daños.
- 2) Identificar un punto de referencia, el cual servirá para comenzar a enrollar la resistencia en las espirales con las que cuenta el refractario, dejando las puntas de la resistencia en la misma referencia.
- 3) Posterior a la colocación de la resistencia en el refractario, introducir este último en la cámara de carga para realizar, la respectiva conexión con el panel de control de temperatura.

➤ Ensamble e instalación de la termocupla

La instalación de la termocupla en el horno es un proceso esencial para medir con precisión la temperatura dentro del horno. Seguir las instrucciones generales para llevar a cabo esta instalación correctamente:

- 1) Ubicar el lugar en donde se instalará la termocupla (El horno ya posee un lugar donde poner la termocupla, ver Fig. D.2)



Fig. D.2. Ubicación de la termocupla.

- 2) Insertar la punta de la termocupla en el agujero. Asegurarse de que la punta de la termocupla quede expuesta al ambiente del horno para medir la temperatura con precisión.
- 3) Rodear la termocupla en el punto donde sale del horno con aislante térmico para proteger el cable y mejorar la precisión de la medición. Asegurarse de que el aislante esté firmemente sujeto.
- 4) Conecta el cable de extensión de la termocupla a la termocupla respetando la polaridad. Si es necesario, utiliza un conector de termocupla adecuado para garantizar una conexión segura.

## ANEXO E: MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA LA MANIPULACIÓN DEL AMONÍACO

La nitruración con amoníaco es un proceso industrial que implica riesgos significativos debido a la presencia de amoníaco, que es un gas tóxico y altamente inflamable. Para proteger al personal que manipula el horno de nitruración con amoníaco y garantizar la seguridad de los mismos, es esencial implementar medidas de seguridad rigurosas. A continuación, se presenta algunas medidas de seguridad que se deben seguir:

### 1. Formación y capacitación de todos los operadores y estudiantes:

- Deben recibir capacitación adecuada sobre el manejo del horno de nitruración y la atmósfera de amoníaco.
- Deben estar familiarizados con los procedimientos de emergencia y saber cómo actuar en caso de un incidente.

### 2. Equipos de protección personal (EPP):

- Use ropa de protección, como overoles resistentes a productos químicos, guantes de nitrilo o caucho y botas de seguridad (ver Fig. E.1).

a)



b)

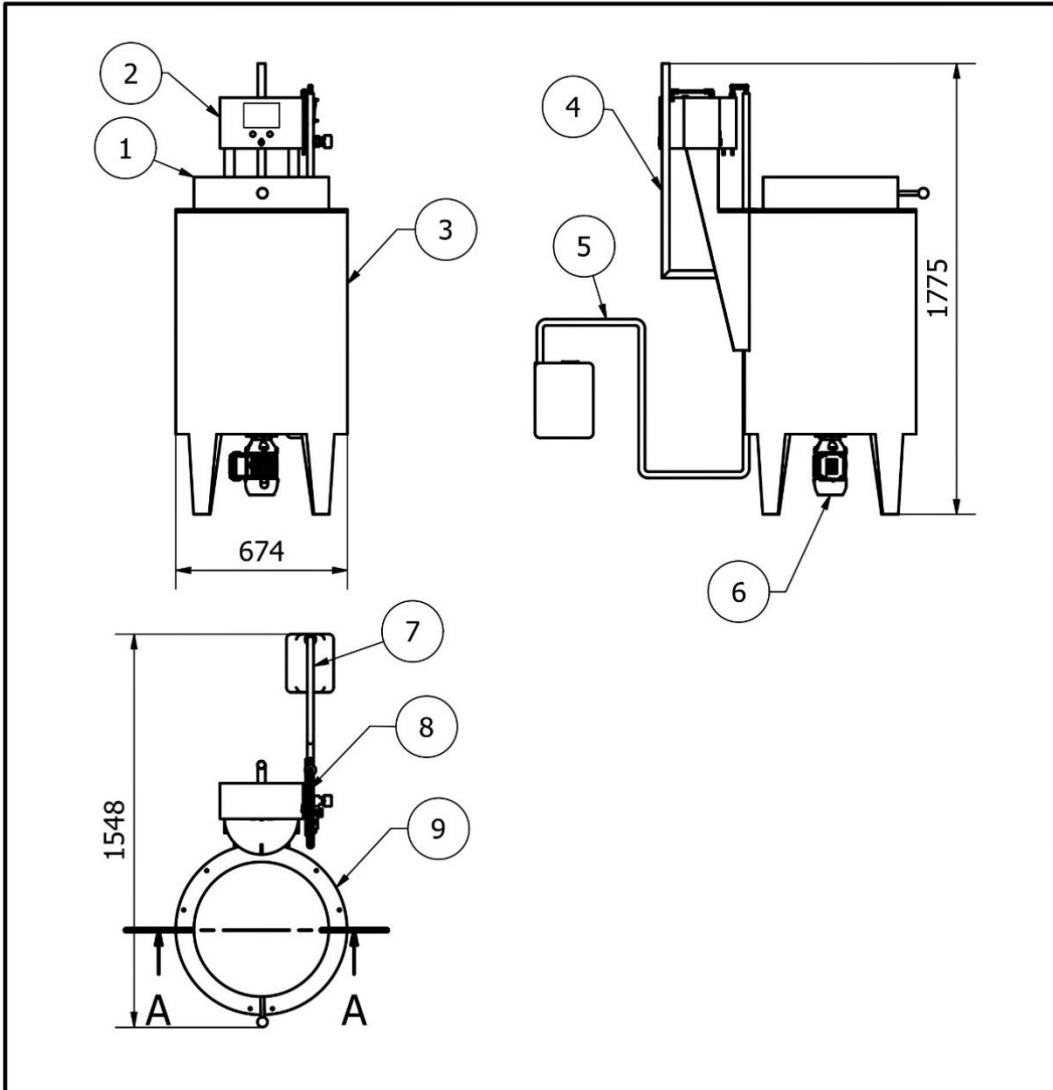


Fig. E.1. Equipo de protección personal: a) Guantes de nitrilo; y b) overol resistentes a productos químicos

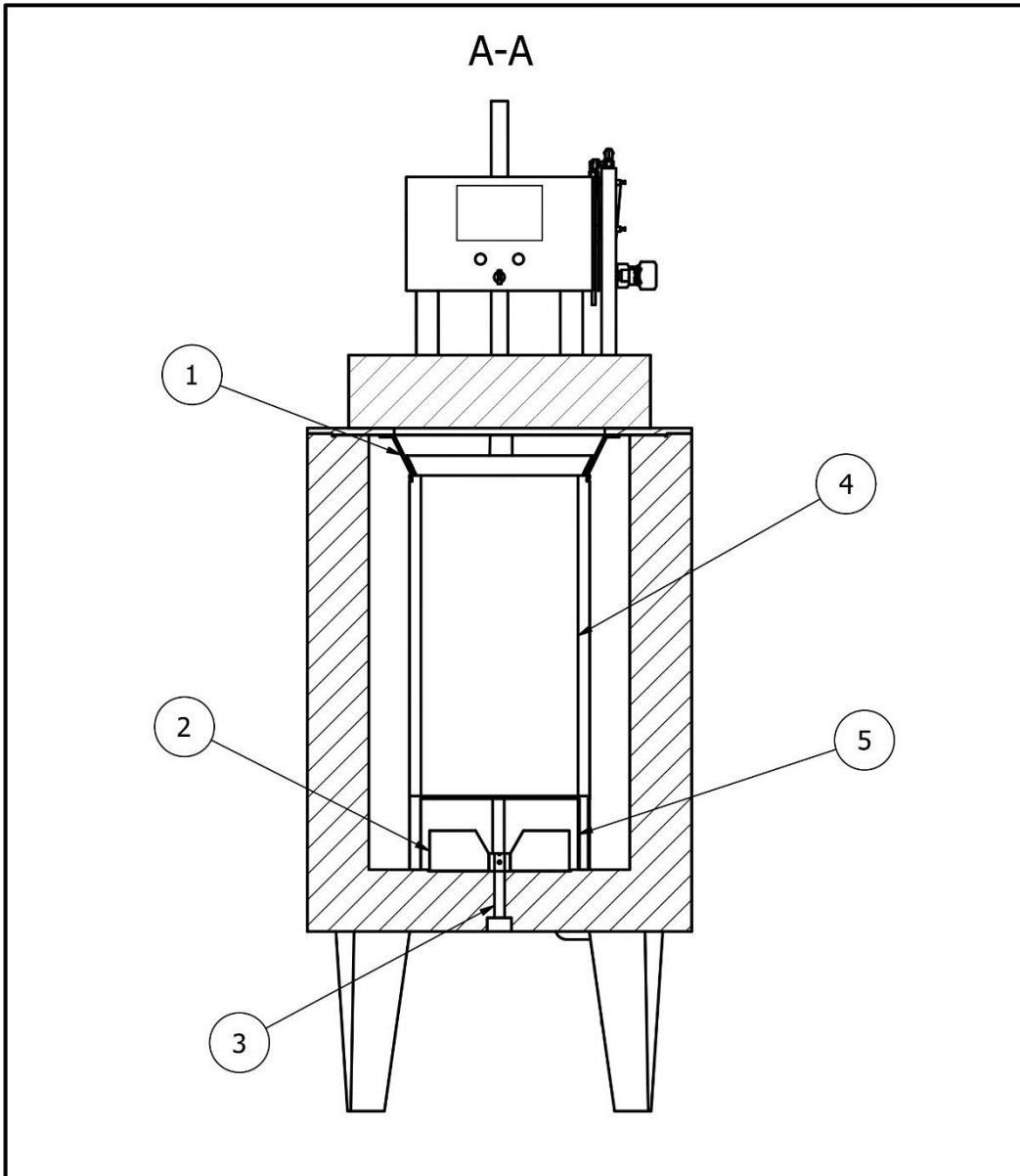


- Se deben utilizar mascarilla para rostro completo (ver Fig. C.3.) o respiradores adecuados con filtros para gases tóxicos con el fin de que se proteja de la inhalación de amoníaco en caso de un incidente.
3. Ventilación:
    - Asegurarse de que el área de trabajo esté bien ventilada para evitar la acumulación de vapores de amoníaco por si llegase a existir fugas o alguna manipulación errónea del horno.
  4. Emergencias:
    - Tener a mano equipos de primeros auxilios, como lavaojos y duchas de seguridad, en caso de contacto con amoníaco.
    - Establezca un plan de evacuación y entrenamiento para situaciones de emergencia.
  5. Almacenamiento de amoníaco:
    - Almacene el amoníaco de manera segura en áreas designadas y bien ventiladas.
    - Utilice recipientes aprobados para el almacenamiento de amoníaco.
  6. Inspecciones y mantenimiento:
    - Realice inspecciones periódicas de los equipos para detectar fugas o defectos.
    - Mantenga los sistemas de seguridad y extintores en buen estado de funcionamiento.
  7. Comunicación:
    - Comunique cualquier incidente, fuga o problema de seguridad al responsable del laboratorio o encargado.
    - Mantenga una comunicación constante con el personal y estudiantes sobre la seguridad y los procedimientos a seguir.

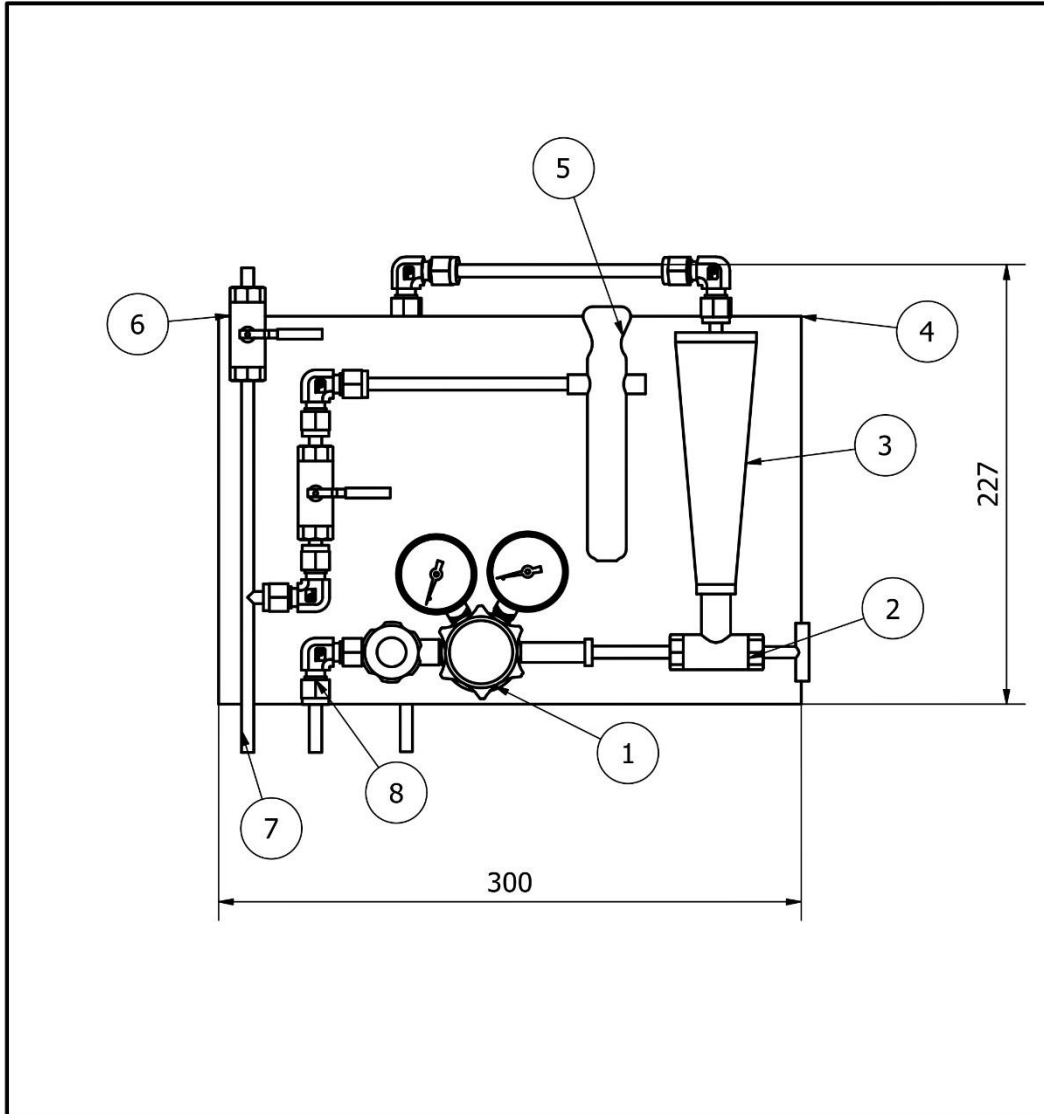
## ANEXO F: PLANOS DE FABRICACIÓN



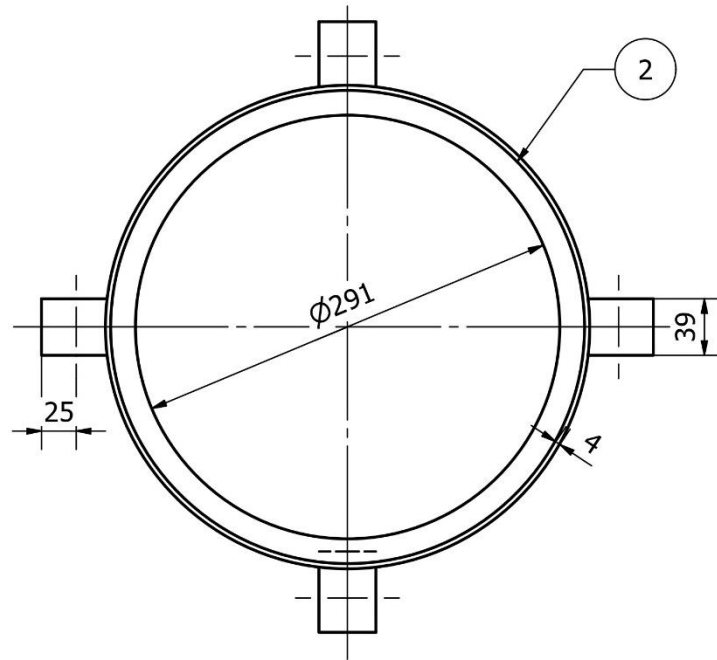
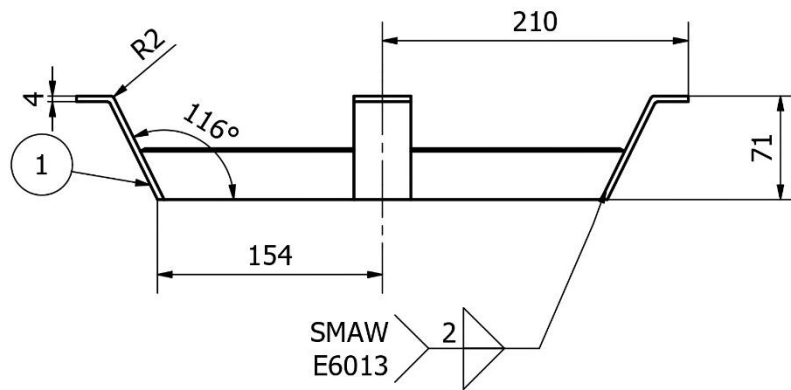
9	Tapadera superior	1	Silicato de calcio	Detalle 1.2.
8	Panel de control de amoniaco	1		Subconjunto 1
7	Bidón	1	Plástico fluorado	Capacidad 50 L
6	Motor eléctrico	1		Monofásico, 220 V, 2800 rpm
5	Tubería de gases residuales	1	Acero inoxidable	Detalle 1.1.
4	Chimenea	1	Acero inoxidable	
3	Cuerpo del horno	1		
2	Panel de control de temperatura	1		
1	Puerta del horno	1		
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1 : 23
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: A1	FECHA: 03/07/2023	CONJUNTO 1: HORNO WILD BARFIELD TRT.1010		



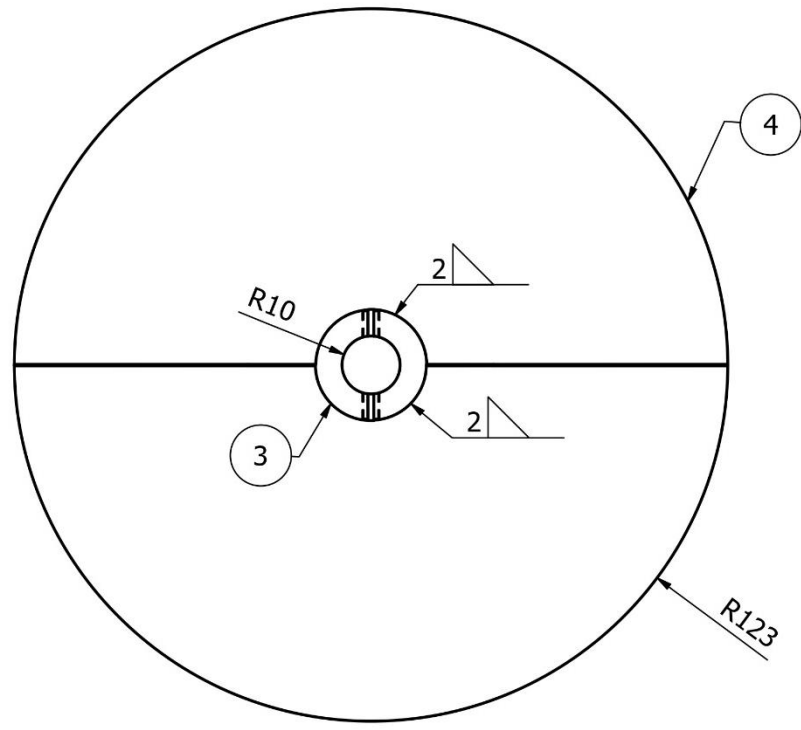
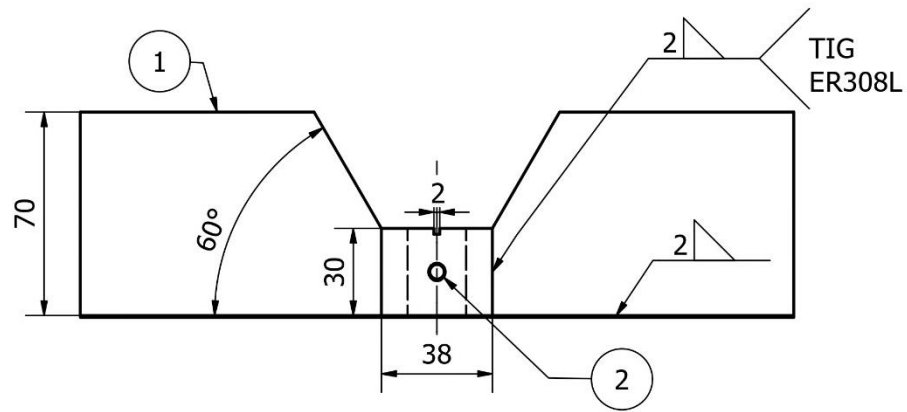
5	Anillo de soporte inferior	1		
4	Cámara de carga	1	Refractario	
3	Agujero eje del motor	1		
2	Agitador	1	Acero inoxidable AISI 304	Subconjunto 3
1	Anillo de soporte superior	1	Acero AISI 1020	Subconjunto 2
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1:10
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: A1.2	FECHA: 03/07/2023	CONJUNTO 1: SECCIÓN A A		



8	Codo 90°	5	Acero inoxidable	
7	Tubería 1/4	1	Acero inoxidable	
6	Válvula de bola	2	Acero inoxidable	
5	Bureta	1		
4	Chapa	1	Acero inoxidable	
3	Caudalímetro	1	Acero inoxidable	
2	Válvula de aguja	1	Acero inoxidable	
1	Regulador de presión	1	Acero inoxidable	
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1 : 3
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: B1	FECHA: 03/07/2023	SUBCONJUNTO 1: PANEL DE CONTROL DE AMONIACO		

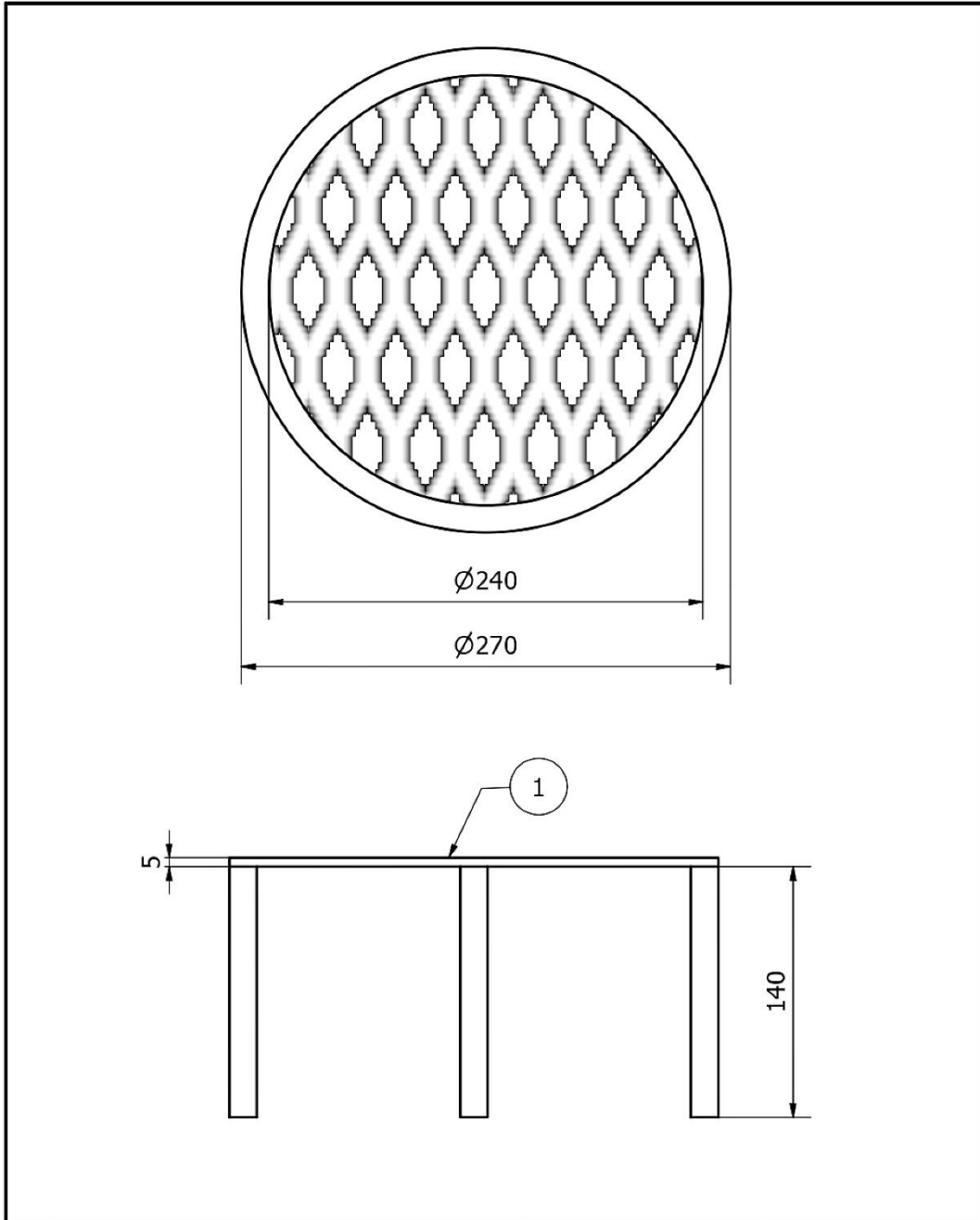


2	Anillo de soporte	1	Acero AISI 1020	
1	Brazo de soporte	4	Acero AISI 1020	
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1 : 4
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: B2	FECHA: 03/07/2023	SUBCONJUNTO 2 : ANILLO DE SOPORTE SUPERIOR		



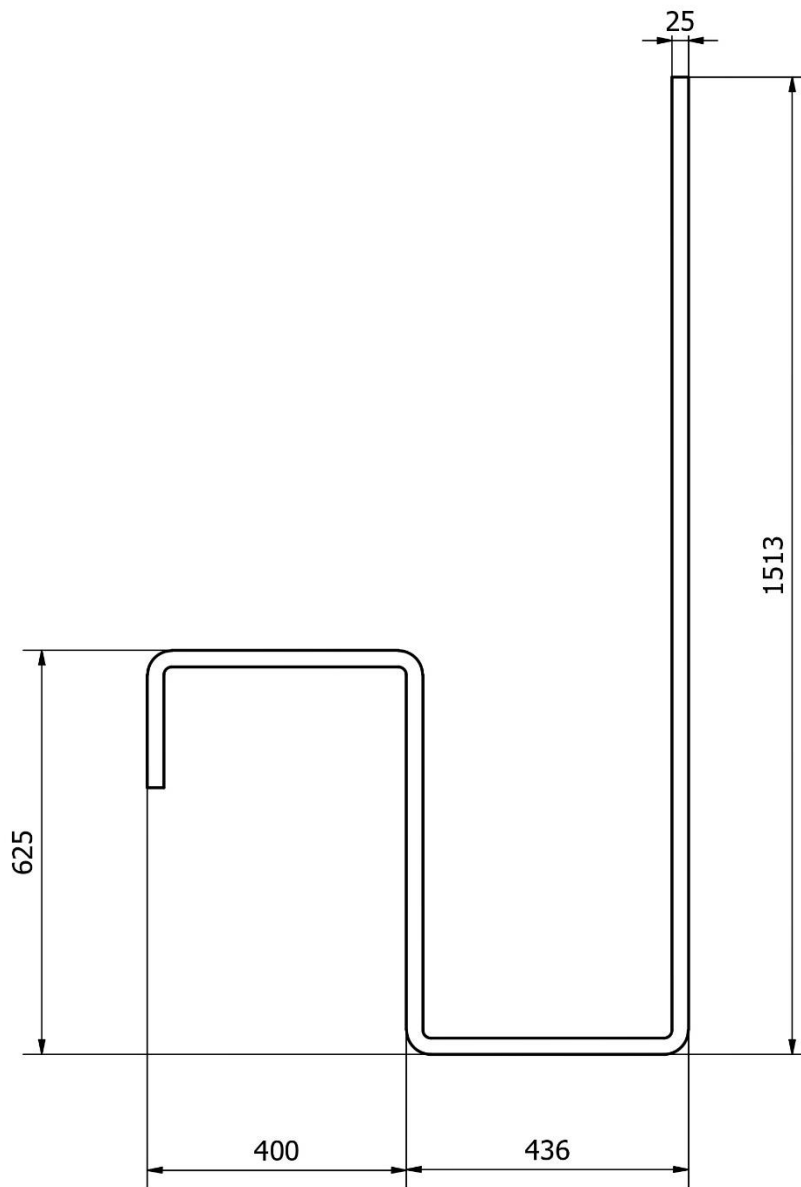
4	Anillo inferior	1	Acero inoxidable AISI 304	Calibre 24
3	Barra de soporte	1	Acero inoxidable AISI 304	
2	Agujero roscado	2		M5X0.8 - 6H
1	Alabe	2	Acero inoxidable AISI 304	Calibre 24
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

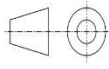
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1 : 2
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: B3	FECHA: 03/07/2023	SUBCONJUNTO 3: AGITADOR		

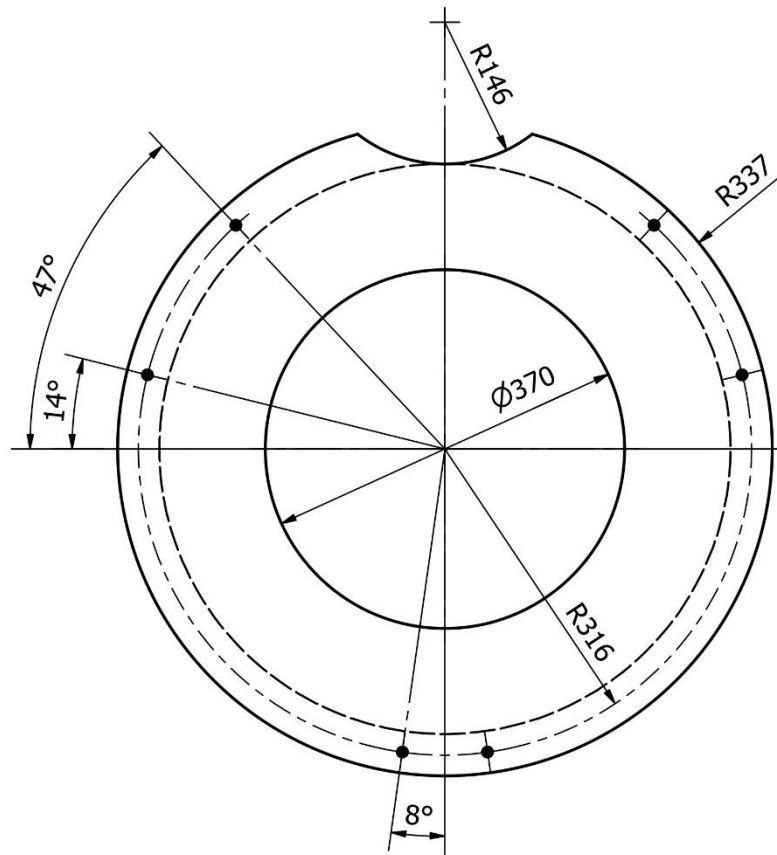
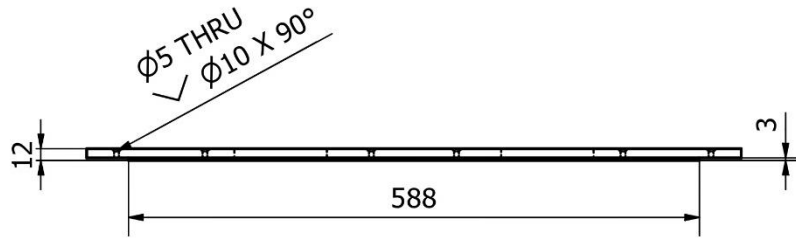


1	Mesa para colocación de piezas	4	Níquel	
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010		ESCALA: 1 : 3
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez		UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: B4	FECHA: 03/07/2023	SUBCONJUNTO 4: MESA PARA COLOCACIÓN DE PIEZAS		





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACION: Propuesta de rehabilitacion de un horno de nitruracion marca Wild Barfield modelo TRT.1010	ESCALA: 1 : 9
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Gabriel Eduardo Flores Medrano Julio César Pérez Pérez Oscar Renato Cea Pérez Wilber Geovanni Garcia Herrera	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: C1	FECHA: 03/07/2023	DETALLE 1.1.: TUBERÍA DE GASES RESIDUALES	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACION: Propuesta de rehabilitación de un horno de nitruración marca Wild Barfield modelo TRT.1010	ESCALA: 1 : 6
DOCENTE ASESOR : Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Oscar Renato Cea Pérez Gabriel Eduardo Flores Medrano Wilber Geovanni Garcia Herrera Julio César Pérez Pérez	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: C2	FECHA: 03/07/2023	DETALLE 1.2.: TAPADERA SUPERIOR	