



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Diseño y fabricación de un dispositivo para calentamiento mediante inducción eléctrica y su posterior temple de barras circulares de hasta 10mm de diámetro.

T E S I S

Para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Presenta:

Juan Isaac Antolin Jimenez.

Asesor:

M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

OBJETIVOS.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2

CAPÍTULO 1

ACEROS Y SU CLASIFICACIÓN.

1.1. ACEROS SIMPLES AL CARBONO.....	7
1.1.1. Aceros al bajo carbono.....	7
1.1.2. Aceros al medio carbono.....	7
1.1.3. Aceros al alto carbono.....	7
1.2. ACEROS DE BAJA ALEACIÓN.....	8
1.3. ACEROS HSLA (HIGH STRENGTH LOW ALLOW).....	9
1.4. ACEROS INOXIDABLES.....	9
1.4.1. Aceros inoxidables martensíticos.....	10
1.4.2. Aceros inoxidables ferríticos.....	11
1.4.3. Aceros inoxidables austeníticos.....	11
1.4.4. Aceros inoxidables endurecibles mediante precipitación (Aceros inoxidables PH). ...	12
1.4.5. Aceros inoxidables dúplex.....	12
1.5. ACEROS PARA HERRAMIENTAS.....	13
1.5.1. Aceros para trabajo en frío.....	14
1.5.2. Aceros para trabajos en caliente (Grupo H).....	15
1.5.3. Aceros rápidos (Grupos T y M).....	15
1.5.4. Aceros para propósitos generales (grupos L y F).	17
1.6. RESUMEN.....	17

CAPÍTULO 2

PANORAMA GENERAL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICABLES A LOS ACEROS.

2.1. DIAGRAMAS TTT Y CCT.....	21
2.1.1. Diagramas TTT.	22
2.1.2. Diagramas CCT.....	25
2.2. TEMPLE.....	26
2.3. REVENIDO.....	27
2.4. RECOCIDO.....	29
2.4.1. Recocido subcrítico o incompleto.....	30
2.4.2. Recocido isotérmico.	30
2.4.3. Recocido para relevado de esfuerzos o recocido subcrítico.....	30
2.5. NORMALIZADO.....	31
2.6 GLOBULIZADO O ESFEROIDIZADO.....	31
2.7. TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES Y TERMOQUÍMICOS.....	33
2.7.1. Carburizado.....	33
2.7.2. Nitruración.	34
2.7.3. Temple superficial.....	34
2.8. RESUMEN.....	34

CAPÍTULO 3
PROCESO DE TEMPLE.

3.1. MEDIOS DE TEMPLE.....	37
3.2. TEMPLABILIDAD.....	39
3.2.1 Prueba Jominy.....	39
3.2.2 Índice de templabilidad.....	41
3.2.3. Coeficiente H.....	42
3.3. VARIACIONES DEL TEMPLE.....	43
3.3.1. Austemplado.....	44
3.3.2. Martemplado.....	44
3.3.3. Temples interrumpidos.....	45
3.3.4. Temple superficial.....	46
3.4. RESUMEN.....	51

CAPÍTULO 4
MEMORIA DE CÁLCULO.

4.1. DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CALENTAMIENTO.....	54
4.1.1. Calor que requiere la probeta para ser calentada.....	54
4.1.2. Circuito resonante.....	55
4.1.3. Planteamiento del circuito.....	59
4.1.4. Determinación de los dispositivos electrónicos a utilizar en el circuito resonante.	63
4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	66
4.2.1. Circuito del sistema de control.....	67
4.2.2. Programa del sistema de control.....	69

4.3. RESUMEN.....	81
--------------------------	-----------

CAPÍTULO 5

DIBUJOS DE DETALLE DE LA MÁQUINA.

5.1. MÁQUINA DE TEMPLE POR INDUCCIÓN.....	83
5.2. ESTRUCTURA MONTADA.....	85
5.3. SISTEMA DE REFRIGERANTE.....	102
5.4. PROTECCIÓN.....	107
5.5. CIRCUITO INVERSOR.....	109
5.6. SISTEMA DE CONTROL.....	116
5.7. RESUMEN.....	120

CAPÍTULO 6

ENSAMBLE Y USO DEL EQUIPO.

6.1. ENSAMBLE DE LA MAQUINA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.....	121
6.2. MANUAL DE USUARIO.....	127
6.2.1. Instalación.....	128
6.2.2. Procedimiento para el refrigerante.	129
6.2.3. Preparación de la probeta.	131
6.2.4. Ciclo de trabajo.....	131
6.2.5. Precauciones.....	134

6.3. COSTO DEL EQUIPO.....	135
-----------------------------------	------------

6.4. RESUMEN.....	137
--------------------------	------------

CAPÍTULO 7.

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL EQUIPO.

7.1. IDENTIFICACIÓN DE ACEROS A TEMPLAR.....	139
---	------------

7.2. TEMPERATURAS DE CALENTAMIENTO.....	140
--	------------

7.3. TEMPLE DE LAS PROBETAS.....	143
---	------------

7.4. PRUEBA DE DUREZA.....	145
-----------------------------------	------------

7.5. PRUEBA DE LONGITUD DE PENETRACIÓN DEL TEMPLE.....	146
---	------------

7.6. RESUMEN.....	147
--------------------------	------------

CONCLUSIONES.....	149
--------------------------	------------

REFERENCIAS.....	152
-------------------------	------------

OBJETIVOS.

- Diseñar y construir un circuito electrónico para calentar barras de acero de hasta 10mm de diámetro por medio de inducción por corrientes de alta frecuencia.
- Desarrollar un sistema de mordazas mediante las cuales se podrá sujetar la pieza a calentar y después sumergir en el medio de temple deseado.
- Diseñar y construir un dispositivo para la aplicación de refrigerante en el proceso de templado.
- Diseñar y construir un sistema de control para realizar el recorrido adecuado del dispositivo de calentamiento.

INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la ingeniería, siempre se busca seleccionar el material con las mejores propiedades para nuestros diseños, sin embargo, en una forma bruta o inicial de los materiales es común que no cumplan con lo requerido, por los que se han creado distintos métodos para lograr las propiedades optimas de un material. En el caso de los aceros se han inventado distintos procesos para modificar principalmente su ductilidad, dureza y tenacidad, para lo cual se han diseñado una serie de distintos tratamientos, ya sean mecánicos como lo es el endurecimiento por deformación, granallado, termoquímicos como el cementado, o térmicos como lo son el temple, revenido, normalizado, recocido, envejecimiento, etc. y sus respectivas variantes.

El temple, es el principal tratamiento térmico que se utiliza en los materiales para incrementar su dureza, proceso en el cual el metal es calentado de 30 a 50 °C por encima de la línea A_3 del diagrama hierro- carburo de hierro, es decir donde se forma el 100% de austenita y se enfría súbitamente con la finalidad de evitar la transformación de austenita en ferrita para formar martensita y posterior mente se realiza el revenido para liberar esfuerzos residuales. el temple tiene como efectos secundarios la deformación de la pieza tratada, ya que durante el calentamiento se crean esfuerzos térmicos, dichas deformaciones se pueden eliminar con un posterior rectificado.

El método de calentamiento en el proceso de temple de las piezas es algo que ha estado continuamente modificándose, para tener un mayor control de este y con ello un mejor aprovechamiento de las propiedades que el material ofrece; convencionalmente el calentamiento se realiza en muflas de gas o muflas eléctricas, en las cuales para el temple de piezas tienen una relación de calentamiento de una hora por cada 25mm de espesor de la pieza, por lo que se trata de un proceso largo y en el cual se requiere de grandes cantidades de energía.

En este proyecto se presenta un método de calentamiento en el cual se controla mejor la sección a calentar y la profundidad, se reducen tiempos de calentamiento. El método de calentamiento para las piezas a templar es llamado: calentamiento por inducción por alta frecuencia, en el cual

son aprovechadas las propiedades magnéticas y de conducción eléctrica de los aceros para inducir en ellos corrientes de Foucault y el efecto de histéresis.

Para lograr este tipo de calentamiento se diseñó y construyó un dispositivo el cual basa su funcionamiento en una bobina constituida por un tubo de cobre en el cual se hace circular un refrigerante por el interior y en el espesor una corriente de alta frecuencia (60-25000 Hz) a una potencia de alrededor de 5kW, calentando a la pieza por acción de histéresis y corrientes de Foucault y como en todo proceso de temple es necesario enfriar el material de una manera súbita, un dispositivo arroja chorros de refrigerante en toda la circunferencia de la pieza; cabe mencionar que la bobina y el dispositivo refrigerante tienen la libertad de desplazarse a lo largo de la pieza a templar.

A lo largo de esta tesis se presentan capítulos en los que es necesario mencionar la clasificación de los aceros, distintos tratamientos térmicos, todo con un enfoque en tener un amplio conocimiento del proceso de temple, sus variantes y como es que los componentes de los metales influyen en la templabilidad y por lo tanto la manera más adecuada de realizarlo para cada uno.

CAPÍTULO 1

ACEROS Y SU CLASIFICACIÓN

Dentro del mundo de la ingeniería existen diversos materiales, los cuales han sido clasificados en distintos grupos desde los metálicos y no metálicos, hasta distintas clasificaciones según su uso y procedencia. Existen materiales cerámicos, polímeros o plásticos, metales etc.

Dentro de los metales existen materiales ferrosos en los cuales el elemento principal es el hierro y los metales no ferrosos como lo son el aluminio, cobre, magnesio, zinc, etc. Los cuales llegan a ser componentes de aleación del acero.

Se sabe que el carbono es uno de los principales elementos aleantes del hierro y esto deriva como primera clasificación de los materiales ferrosos en acero y hierros fundidos ya que estos últimos tienen 2.11% o más en peso de carbono y los aceros menos de 2.11% (Askeland, 2016). En este capítulo se abordará la designación y clasificación de los aceros, ya que es a los materiales ferrosos a los cuales se les aplican tratamientos térmicos, principalmente temple y revenido teniendo resultados redituables.

Para comenzar con la clasificación de los aceros es necesario comprender la diferencia entre clasificación y designación.

La designación de los aceros es aquella en la que se nombran a los materiales de acuerdo con su composición, denotando en el nombre asignado sus componentes aleantes, la cantidad de ellos y algunas propiedades físicas o tratamientos térmicos que ya se le han aplicado a dicho material.

Un ejemplo de designación de los materiales es la que proporciona el AISI (American Iron and Steel Institute) y la SAE (Society of Automotive Engineers) y que también la NOM (Norma Oficial Mexicana) adopto para nuestro país, en ella se asigna un numero de cuatro o cinco dígitos en el cual los dos primeros dígitos se refieren a los principales elementos de aleación presentes y los últimos dos o tres números se refieren al porcentaje de carbono, como se puede observar en la tabla 1.1.

Ejemplo:

- Acero AISI 1040

Se trata de un acero de bajo carbono con 0.40% de C.

- Acero AISI 4340

Se trata de un acero aleado (contiene molibdeno y níquel-cromo) con 0.40% de C.

Los siguientes números son los acordados para indicar los elementos aleantes en la designación del acero (los dos primeros dígitos):

- 1.- Manganeso
- 2.- Níquel
- 3.- Níquel-cromo (Principal aleante níquel)
- 4.- Molibdeno
- 5.- Cromo
- 6.- Cromo-vanadio
- 8.- Níquel - cromo – molibdeno, principal aleante molibdeno
- 9.- Níquel – cromo – molibdeno, principal aleante níquel

Tabla 1.1. Composición de algunos aceros AISI-SAE (Askeland, 2016).

Numero AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18-0.23	0.30-0.60				
1040	0.37-0.44	0.60-0.90				
1060	0.55-0.65	0.60-0.90				
1080	0.75-0.88	0.60-0.90				
1095	0.90-1.03	0.30-0.50				
1140	0.37-0.44	0.70-1.00				0.08-0.13 % S
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30		0.80-1.10	0.15-0.25 % Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.300 % Mo
4620	0.17-0.22	0.45-0.64	0.15-0.30	1.65-2.00		0.20-0.30 % Mo
52100	0.98-1.10	0.25-0.45	0.15-0.30		1.30-1.60	
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25 % Y
9260	0.56-0.64	0.75-1.00	1.80-2.20			

Existe también una designación diferente por parte de la ASTM (American Society for Testing of Materials) la cual es completamente diferente a la anterior, ya que en ella se enlistan especificaciones que describen a los aceros apropiados para cada aplicación, principalmente se utiliza para aceros estructurales y en otro tipo de materiales como aleaciones no ferrosas.

La designación consiste en las siglas ASTM, seguidas de un código en el sistema inglés y sistema métrico (número arbitrario), el grado del acero (resistencia a la fluencia (σ_f) en ksi), año de adopción de la norma y año de la última revisión, en la figura 1.1 se puede observar el posicionamiento y el significado de los caracteres de la designación ASTM para un solo grado, es decir con un solo valor de límite a la fluencia, en la imagen 1.2 se muestra la misma designación pero para aceros con diferente grado, es decir con variantes en la resistencia a la fluencia.



Figura 1.1. Designación ASTM de aceros al carbón de uso estructural de un solo grado.

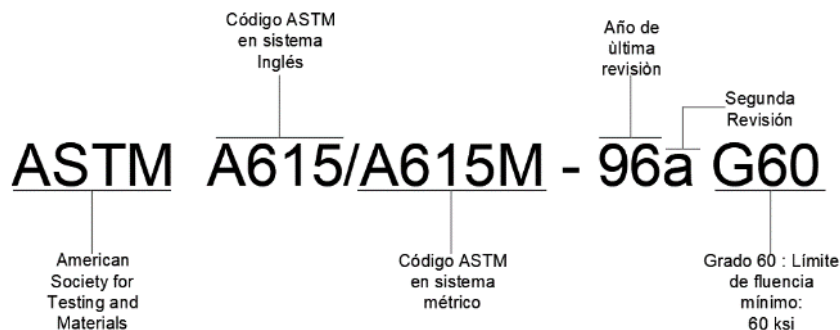


Figura 1.2. Designación ASTM de aceros estructurales de varios grados.

- ASTM A36

Esta norma es aplicable a una variedad de perfiles estructurales laminados en caliente y a placas de la misma calidad que están disponibles en el mercado. Tienen un esfuerzo de fluencia de 2530 kg/cm² (250 Mpa, 36ksi) y su soldabilidad es adecuada.” (del Castillo, 2018)

*Las designaciones anteriores aplican para aceros al carbono y baja aleación (clasificación que se menciona más adelante en este capítulo).

Los aceros también tienen distintas clasificaciones de acuerdo con su contenido en elementos aleantes, sus usos y la forma en que han sido procesados. Una clasificación de acuerdo a la composición química del acero, dentro del ámbito industrial según normas SAE es la siguiente:

1. Aceros simples al carbono.
2. Aceros de baja aleación.
3. Aceros de baja aleación – alta resistencia.
4. Aceros inoxidable.
5. Aceros para herramienta.

1.1. ACEROS SIMPLES AL CARBONO.

Contienen del 0.02 hasta el 2% de carbono, hasta el 0.6% de silicio, máximo 0.6% de cobre y hasta 1.65% de manganeso.

Dentro de este grupo existen diferentes subclases de acuerdo con su contenido de carbono:

1.1.1. Aceros al bajo carbono

Aceros con un porcentaje de carbono entre 0.10 a 0.30 %

Su respuesta al temple depende principalmente de su contenido en carbono y manganeso

1.1.2. Aceros al medio carbono

Aceros con un porcentaje de carbono entre 0.30 a 0.70 %

Frecuentemente se les aplica tratamiento térmico de endurecimiento.

1.1.3. Aceros al alto carbono

Aceros con un porcentaje de carbono entre 0.70 a 2.00 %

Prácticamente todas las piezas fabricadas con estos aceros se les aplican tratamientos térmicos de endurecimiento antes de usar, teniendo especial cuidado para evitar distorsiones y fisuras.

1.2. ACEROS DE BAJA ALEACIÓN.

Estas aleaciones contienen una cantidad no mayor al 5% en peso de elementos de aleación (cromo, manganeso, molibdeno, níquel, vanadio, silicio, etc), elementos que como se ha dicho anteriormente mejoran las propiedades mecánicas (dureza, tenacidad, resistencia al desgaste) del acero de acuerdo con el uso que será destinado.

Los principales efectos que provocan los elementos aleantes a los aceros se dan mediante la formación de soluciones solidas en la matriz de ferrita distribuyendo o eliminando de una manera “conveniente” a los defectos dentro del grano, también con los átomos de carbono que contiene la aleación de acero se forman carburos los cuales proporcionan dureza al material.

Las principales razones por las cuales se agregan elementos aleantes al acero son:

- a) Para proporcionar un endurecimiento por solución solida en la ferrita.
- b) Por la precipitación de carburos de aleación en lugar de la formación de cementita.
- c) Mejorar la resistencia a la corrosión por la formación de capas superficiales protectoras
- d) Mejorar la templabilidad

Debido a las distintas propiedades de los átomos de los elementos, estos proporcionan en particular diferentes propiedades, las cuales se menciona a continuación:

- Cromo: mejora la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, resistencia al desgaste y la dureza en caliente además de incrementar la templabilidad.
- Manganeso: mejora la templabilidad, la resistencia y la dureza.
- Molibdeno: incrementa la resistencia al desgaste al formar carburos, incrementa la resistencia en caliente, la termofluencia, la tenacidad y mejora la templabilidad.
- Níquel: Mejora la resistencia y la tenacidad, la resistencia a la corrosión, incrementa muy poco la templabilidad.
- Vanadio: Inhibe el crecimiento del grano durante los tratamientos y procesos térmicos del material provocando una mejor resistencia y tenacidad en el acero, forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

Ejemplo:

SAE1114, contiene del 0.10 al 0.16 % de carbono, 1.00 al 1.30% de manganeso, 0.045% de fosforo y 0.08-0.13% de azufre. Tiene una excelente condición de maquinado.

1.3. ACEROS HSLA (HIGH STRENGTH LOW ALLOW)

Como su nombre lo indica, son aceros de alta resistencia y baja aleación (máximo 3% en peso de la suma de elementos aleantes), aunque también son llamados aceros microaleados, principalmente son aceros estructurales.

Los principales elementos de aleación de este tipo de aceros son el manganeso, cobre, níquel, y cromo, mientras que el contenido de carbono oscila entre el 0.10 y 0.30%, a diferencia de los aceros de los aceros de baja aleación estos son más soldables.

Debido al bajo contenido en carbono de estos aceros no es factible realizarles tratamientos térmicos, ya que no contienen suficientes átomos de carbono para formar la estructura cristalina de la martensita durante el temple y con ello obtener una dureza redituable; se hace mención que para que un acero sea templable es necesario que contenga mínimo un 0.35% de carbono (**del Castillo 2015**), aparte de que este tipo de aceros sufre distorsiones y agrietamiento debido a su bajo contenido de elementos de aleación.

Ejemplo:

SAE1132, contiene de 0.27 a 0.30% de carbono, 1.35 a 1.65% de manganeso, 0.045% de fosforo y de 0.08 a 0.13% de azufre.

1.4. ACEROS INOXIDABLES.

La corrosión y la oxidación son latentes factores de desgaste en los metales expuestos a altas temperaturas o atmosferas agresivas (ambiente marino o salino, exposición a ácidos o vapores, etc.), por lo que se diseñaron aceros inoxidables, los cuales son acero de alta aleación que tienen una gran resistencia a la corrosión y a la oxidación, tienen una gran resistencia y ductilidad. Se trata de aleaciones de base hierro que contienen como elemento de aleación principal al cromo en una mínima cantidad del 12%, un bajo contenido en carbono (para evitar la formación de carburos de cromo) y porcentajes variables de níquel, molibdeno, titanio, vanadio, etc.

La función la de un elemento alfégeno (Elemento que amplía el campo de estabilidad de la ferrita (α) en el acero), el cual forma una delgada película de óxido de cromo (Cr_2O_2), la cual protege a la superficie de la corrosión, en algunos aceros inoxidable también se le añade níquel el cual es un elemento gammágeno (Elemento que amplía el campo de estabilidad de la austenita (γ) en el acero) el cual permite el paso de la luz pero no agentes corrosivos como el agua y el oxígeno, esta capa se regenera cuándo se rompe por causas mecánicas; en el caso de este tipo de aceros aunque sigue incrementando la dureza pero disminuye la protección contra la corrosión al formar carburos de cromo (Cr_{23}C_6) el cual reduce la cantidad de cromo libre en la aleación.

Los aceros inoxidable se subclasifican de acuerdo con su contenido en carbono, cromo, las fases que en ellos predominan y el medio de endurecimiento.

1.4.1. Aceros inoxidable martensíticos.

Poseen un contenido en cromo entre 12 y 14 %, el contenido de carbono no excede el 0.4%, son magnéticos, tratables térmicamente (temple y revenido), poseen una regular resistencia a la corrosión y oxidación al resistir medios como ácidos, vapor, agua y medio ambiente y son los más económicos dentro de los aceros inoxidable.

En estos aceros la máxima resistencia a la corrosión y oxidación se tiene cuando son templados a su máxima dureza, resistiendo a la oxidación en temperaturas de hasta 650°C y con buena resistencia mecánica, hasta 540°C .

Se identifican mediante un 4 seguido de dos dígitos (Según AISI-NOM)

Ejemplo:

410: (contiene de 0.08 a 0.15% de carbono, máximo 1.00% de manganeso, máximo 0.030% de azufre, máximo 0.040% de fósforo, máximo 1% de silicio, de 12 a 13.5% de cromo 0.75% de níquel) De uso general utilizado para las tuercas, pernos, bujes, bombas y piezas de la válvula en ambientes medianamente corrosivos.

420: (contiene 0.15% de carbono, máximo 1% de manganeso, máximo 1% de silicio, del 12 al 14% de cromo, máximo 0.04% de fósforo y máximo 0.03% de azufre) Uso general, ejes de la bomba y los conjuntos de válvulas.

1.4.2. Aceros inoxidables ferríticos.

Poseen un contenido en cromo entre 15 y 25%, el contenido de carbono no debe exceder el 0.1% poseen buena resistencia a la oxidación y a la corrosión (Resisten la oxidación a temperaturas de hasta 1200°C y tienen una mayor resistencia a la corrosión que el galvanizado), no son tratables térmicamente (debido a su bajo contenido en carbono), endurecibles mediante trabajo en frío y son magnéticos.

Se identifican mediante un 4 seguido de dos dígitos (Según AISI-NOM)

Ejemplos:

409: (Su composición química se basa en un máximo de 0.03% de carbono, máximo 1% de manganeso, máximo 1% de silicio, del 15 al 17% de cromo, 0.5% de níquel y mínimo 0.05% de titanio) Presenta buena resistencia al calor, con buena aceptación a procesos de soldadura. Se utiliza principalmente para los tubos de escape de automóviles o aplicaciones de soldadura donde se requiere un rendimiento superior al del acero galvanizado.

446: (Su composición química se basa en 0.15% de carbono, 1.5% de manganeso, 1.00% de silicio, máximo 0.04% de fósforo y del 23 al 25% de cromo) Se usa para aplicaciones resistentes al calor severas de hasta 1200 ° C.

1.4.3. Aceros inoxidables austeníticos.

Poseen entre el 15 y 30% de cromo, contienen entre 7 y 15% de níquel, el contenido de carbono no debe exceder el 0.08%, no son magnéticos, no son tratables térmicamente y son endurecibles mediante trabajo en frío, pueden resistir la oxidación a temperaturas de hasta 1700°C, resisten la corrosión al contacto con ácidos fuertes y se utilizan para grado alimenticio.

Se identifican mediante un 3 o un 2 seguido de dos dígitos, es decir la serie 300 y la serie 200 (Según AISI-NOM)

Serie 300 AISI: Es la serie más extensa y con un mayor contenido en níquel y hasta 2% en manganeso, también contiene molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, en algunos casos contiene pequeñas cantidades de azufre o selenio para mejorar su maquinabilidad.

Ejemplo:

AISI 301: Puede ser fácilmente moldeado y es soldable, es utilizado en partes de aviones, adornos arquitectónicos, cajas de ferrocarril y tráiler, cubiertas de rines, equipos para procesamiento de alimentos, etc. Contiene un máximo de 0.15% de carbono, 2% de manganeso, 0.75% de silicio, del 16 al 18% de cromo, del 6 al 8% de níquel y un máximo de 0.1% de nitrógeno.

Serie 200: Contiene menor cantidad de níquel que la serie 300, el contenido de manganeso es del 5 al 20% y se le adiciona nitrógeno para aumentar la resistencia mecánica.

Ejemplo:

AISI 202: Es utilizado para fabricar aparatos domésticos ornamentales y para fabricar productos mediante embutido, contiene un máximo de 0.15% de carbono, de 5.5 a 7.5% de manganeso, 1% de silicio, del 16 al 18% de cromo, de 3.5 a 5.5% de níquel y 0.25% de nitrógeno.

* La AISI designa a los aceros inoxidable en base a un esquema de tres dígitos, en el que el primer dígito indica el tipo general y los dos últimos el grado específico dentro del tipo.

1.4.4. Aceros inoxidables endurecibles mediante precipitación (Aceros inoxidables PH).

Son aleaciones hierro – cromo – níquel (17% de cromo, 7% níquel normalmente) contiene del 12.25 al 18.0% de cromo, y una concentración de entre 0.05 y 0.09% de carbono, y a diferencia de los aceros inoxidables austeníticos, estos contienen pequeñas cantidades de aluminio, cobre, manganeso, titanio y molibdeno, aparte que, como su nombre lo indica, se pueden endurecer mediante precipitación, hipertemple y envejecimiento.

1.4.5. Aceros inoxidables dúplex.

Es una aleación en la cual su estructura consiste en una mezcla de austenita y ferrita en proporciones aproximadamente equivalentes (de ahí su nombre, dúplex), contiene del 0.30 al 0.10% de carbono, del 18 al 30% de cromo, del 3.0 al 6.0% de níquel, del 1.5 al 2.0% de manganeso y del 1.0 al 3.0% de molibdeno.

Dentro de sus principales propiedades está la resistencia al agrietamiento por corrosión mediante esfuerzos, su tenacidad es superior a la de los aceros ferríticos y resistencia a la corrosión similar a la de los aceros inoxidables austeníticos, tienen buena soldabilidad, y conformabilidad y baja expansión térmica.

Su designación según AISI, consiste en un número de cuatro dígitos, comenzando con un 2.

Ejemplos:

AISI 2205: Es utilizado en intercambiadores de calor, lavadores de gases, ventiladores, tanques químicos, en aplicaciones con ambiente marino y refinerías. Contiene del 22 al 23% de cromo, del 4.5 a 6.5% de níquel, del 3 a 3.5% de molibdeno, máximo 0.030% de carbono, del 0.14 al 0.20% de níquel, 2% de manganeso, 1% de silicio, 0.30% de fósforo y 0.20% de azufre.

AISI 2304: Tiene un alto límite elástico, utilizado en la industria marina, minera y de alimentos. Contiene 23% de cromo, 4% de níquel y libre de molibdeno.

1.5. ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

Estos aceros están diseñados para fabricar herramientas de corte tales como dados y moldes, para obtener las propiedades óptimas para este tipo de trabajos es necesario que tengan un gran porcentaje de elementos de aleación (hasta 35%), con el fin de obtener las siguientes propiedades:

- Mejorar la templabilidad
- Reducción de la distorsión durante el tratamiento térmico (deformación dimensional)
- Mejorar la dureza en caliente
- Formación de carburos metálicos duros para la resistencia a la abrasión.
- Tenacidad mejorada

Las propiedades finales de estos aceros se obtienen mediante tratamientos térmicos, con austenización, formación de martensita y revenido, sin embargo, debido a los altos contenidos de elementos de aleación que contienen estos aceros, se deben tomar precauciones durante el procesado para alcanzar el balance de carburos aleados dentro de una matriz de martensita revenida para una dada aplicación como herramienta, cabe mencionar que la dureza de estos aceros es de entre 66 a 68 Rc.

AISI clasificó y proporcionó una designación a los aceros para herramienta de acuerdo con su aplicación y composición.

1.5.1. Aceros para trabajo en frío.

En los aceros herramienta para trabajo en frío, el contenido de carburos y, particularmente, el contenido de vanadio favorece la resistencia al desgaste de este tipo de acero. Los aceros con mayores volúmenes de partículas de carburos o con tipos de carburos de mayor dureza, generalmente ofrecen la mejor resistencia al desgaste. Por su mayor dureza, los carburos de vanadio son los más efectivos para mejorar las propiedades de desgaste. Los carburos de cromo son los menos efectivos. Son utilizados para herramientas de corte y forja, los cuales trabajan por desprendimiento de viruta o por presión, siempre trabajando a una temperatura menor a los 200°C.

Estos aceros se subdividen en los siguientes grupos según la SAE:

1.5.1.1. Aceros templables en agua (Grupo W).

Contienen carbono en concentraciones entre 0.6 y 1.4% y pequeñas cantidades de cromo o vanadio para refinar la estructura cristalina.

Como su nombre lo indica, requieren temple en agua, endureciendo solo en una mínima profundidad en las secciones grandes, mientras que secciones pequeñas y delgadas se pueden temprar en aceite para disminuir deformaciones.

Se usan principalmente para herramientas de corte para aleaciones no ferrosas.

Ejemplo:

W209: Contiene del 0.85 al 0.95% de carbono y del 0.15 al 0.35% de vanadio, aunque también puede contener cromo silicio y manganeso.

1.5.1.2. Aceros templables en aceite (Grupo O)

Son utilizados principalmente para fabricar matrices, donde la resistencia al desgaste y al impacto son muy importantes.

Un ejemplo es el acero O1, el cual contiene 0.95% de carbono, 0.5% de tungsteno, 0.5% de cromo y 1.20% de manganeso. Se utiliza principalmente para medidores de dureza de aceros y matrices para porcelana.

1.5.1.3. Aceros templables al aire (Grupo A)

Estos aceros son usados principalmente para aplicaciones donde se requiere excepcional resistencia al impacto y buena resistencia a la abrasión tales como matrices de estampado, de extrusión y de trefilado (estirado de alambre en frío por pasos sucesivos).

Un ejemplo es el acero A2, el cual contiene 1% de carbono, 1% de molibdeno y 5% de cromo.

1.5.1.4. Aceros resistentes al impacto (Grupo S)

Como su nombre lo indica, son utilizados en herramientas sometidas a impacto, por lo que la principal propiedad que deben tener estos aceros es una buena tenacidad, es decir resistencia al impacto y no necesariamente deben de alcanzar máxima dureza.

Comúnmente estos aceros contienen 0.5% de carbono, 0.5% de molibdeno, 1.5% de cromo y 2% de silicio.

Ejemplo:

AISI S2: Contiene 0.50% de carbono, 1.0% de silicio y 0.50% de molibdeno, este acero puede ser tratado térmicamente para fabricar troqueles y demás herramientas resistentes al impacto.

1.5.2. Aceros para trabajos en caliente (Grupo H)

Son utilizados principalmente para la fabricación de matrices debido a que mantienen su dureza a altas temperaturas mediante endurecimiento secundario (por medio del revenido).

Existen tres tipos de aceros para trabajo en caliente:

- 1.- Aceros base cromo, ejemplo: H10 el cual contiene 0.4% de carbono, 2.5% de molibdeno, 3.25% de cromo y 0.4% de vanadio.
- 2.- Aceros base tungsteno, ejemplo: H21 el cual contiene 0.35% de carbono, 9% de tungsteno y 3.5% de cromo.
- 3.- Aceros base molibdeno, ejemplo: H42 el cual contiene 0.6% de carbono, 6% de tungsteno, 5% de molibdeno, 4% de cromo y 2% de vanadio.

1.5.3. Aceros rápidos (Grupos T y M)

Son aceros utilizados para cortes de alta precisión y velocidad, por lo que tienen grandes cantidades de elementos de aleación (hasta 32%), para mantener la resistencia a altas temperaturas y resistir el desgaste y así mantener los bordes afilados. Los elementos aleantes de estos metales forman carburos de tungsteno y molibdeno para lograr dichas propiedades.

1.5.3.1. Grupo T (tungsteno)

Estos aceros son utilizados principalmente en brocas, matrices y escariadoras.

Ejemplo: T1, sus elementos aleantes son 0.75% de carbono, 18% de tungsteno, 4% de cromo y 1% de vanadio.

1.5.3.2. Grupo M (molibdeno)

Estos aceros forman parte de los llamados aceros de alta velocidad (HSS), cuentan con una resistencia al rojo moderada, y se utilizan para fabricar herramientas de corte para aleaciones ferrosas.

Ejemplo: M1, sus elementos aleantes son 0.85% de carbono, 1.5% de tungsteno, 8.5% de molibdeno, 4% de cromo, 1% de vanadio. Se utiliza para fabricar machuelos.

1.5.3.3. Aceros para moldes (grupo P)

Estos aceros son usados para la fabricación de moldes de inyección de plásticos, De todos los aceros para herramientas son los que menos carbono contienen, apenas del 0.1 al 0.3% (esto para hacer más fácil su maquinado complejo y debido a que su dureza es afectada, posteriormente al maquinado se aplica un nitrurado y cementado), además contienen cromo, níquel y molibdeno.

Ejemplo: P20, contiene hasta un 0.35% de carbono, 1.70% de cromo y hasta 0.40% de molibdeno. Se utiliza para fabricar moldes de inyección de plásticos de baja abrasividad y para algunos moldes de fundiciones no ferrosas.

1.5.3.4. Aceros altos en carbono y en cromo (grupo D)

Estos aceros llegan a contener hasta un 2.35% de carbono y 12% de cromo, también pueden contener molibdeno, tungsteno, vanadio y cobalto; son utilizados para fabricar punzones, mandriles, rodillos para laminar roscas, etc.

Ejemplo: D2, contiene 1.50% de carbono, 12.0% de cromo, 1% de vanadio y 1% de molibdeno. Este es un acero dimensionalmente estable con excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste, apto para temple al aire; se utiliza para estampado y formado, matrices, punzones, troqueles, dados para acuñado, insertos para moldes, dados de laminación, puntas para inyección de plástico, etc.

1.5.4. Aceros para propósitos generales (grupos L y F).

Los aceros F son aceros al carbono tungsteno que presentan resistencia al desgaste y son utilizados en la fabricación de herramientas para bruñir. Los aceros de baja aleación (L), contienen níquel y destacan por su tenacidad, por lo que son utilizadas en herramientas como dados de forja.

1.5.4.1. Grupo L (Low Alloy)

Poseen una templabilidad moderada, son tenaces y resistentes al desgaste, contienen de 0.5 a 1.1% de carbono y cantidades adicionales de cromo, níquel, tungsteno y molibdeno.

Ejemplo: L6, contiene hasta el 0.70% de carbono, 0.75% de cromo, 0.25% de molibdeno y 1.50% de níquel. Este acero tiene una excelente tenacidad con muy poco cambio dimensional en el tratamiento térmico y es utilizado para fabricar dados de estampado, de embutido, punzones, tarrajas, fresas, mandriles, cuchillas, bases para matrices, etc.

1.5.4.2. Grupo F

Son templables en agua aun que tienen una templabilidad baja, son resistentes al desgaste y su resistencia al rojo es limitada. Contienen entre 1 a 1.25% de carbono, con cantidades adicionales de tungsteno.

Actualmente también existen otros materiales para la fabricación de herramientas, los cuales principalmente son cerámicos, como lo son:

- Carburo cementado
- Carburo cementado recubierto (GC)
- Cermets
- Coronite
- Cubic Boron Nitride (CBN)

1.6. RESUMEN

A lo largo de este capítulo se presentó una de las clasificaciones de los aceros y su consecuente designación mostrando su composición química sus usos y aplicaciones en la industria, así como también se hizo mención si son o no aptos para aplicarles tratamientos térmicos, dicha clasificación se encuentra esquematizada en la figura 1.3. Como se pudo notar, el principal tratamiento térmico dentro de las aleaciones ferrosas es el temple, el cual provoca un aumento en

la dureza de los materiales, la proporción del aumento de la dureza depende de los elementos de aleación tales como como el cromo, manganeso, molibdeno, níquel y vanadio, aunque existen otros que la disminuyen, tal es el caso del azufre, cobalto (aumenta la tasa de nucleación y crecimiento de la perlita) y el titanio (homogeniza la perlita); en aceros altamente aleados (aceros para herramienta) se deben de tener cuidados muy precisos a la hora de realizar un tratamiento térmico, ya que pueden presentar distorsiones y desproporcionar sus propiedades, dejándolos inservibles para el fin por el cual fueron fabricados.

En algunos aceros como los del grupo “Acero al medio carbono”, se dice que tienen poca templabilidad, en comparación con los aceros para herramienta de los grupos W, A, y O, esto hace referencia a la penetración del aumento de la dureza en las piezas, es decir, si al templar una pieza de gran espesor (más de 2plg) solo se endurece la parte superficial se puede referir al material como un acero con baja templabilidad (se realiza mediante el ensayo Jominy).

Para poder aplicar correctamente un tratamiento térmico es necesario conocer el tipo de acero se está trabajando, es decir conocer su designación y saber su composición química; actualmente los fabricantes de aceros proporcionan información precisa de cómo realizar tratamientos térmicos a sus aceros de acuerdo con las propiedades que se quieren obtener.

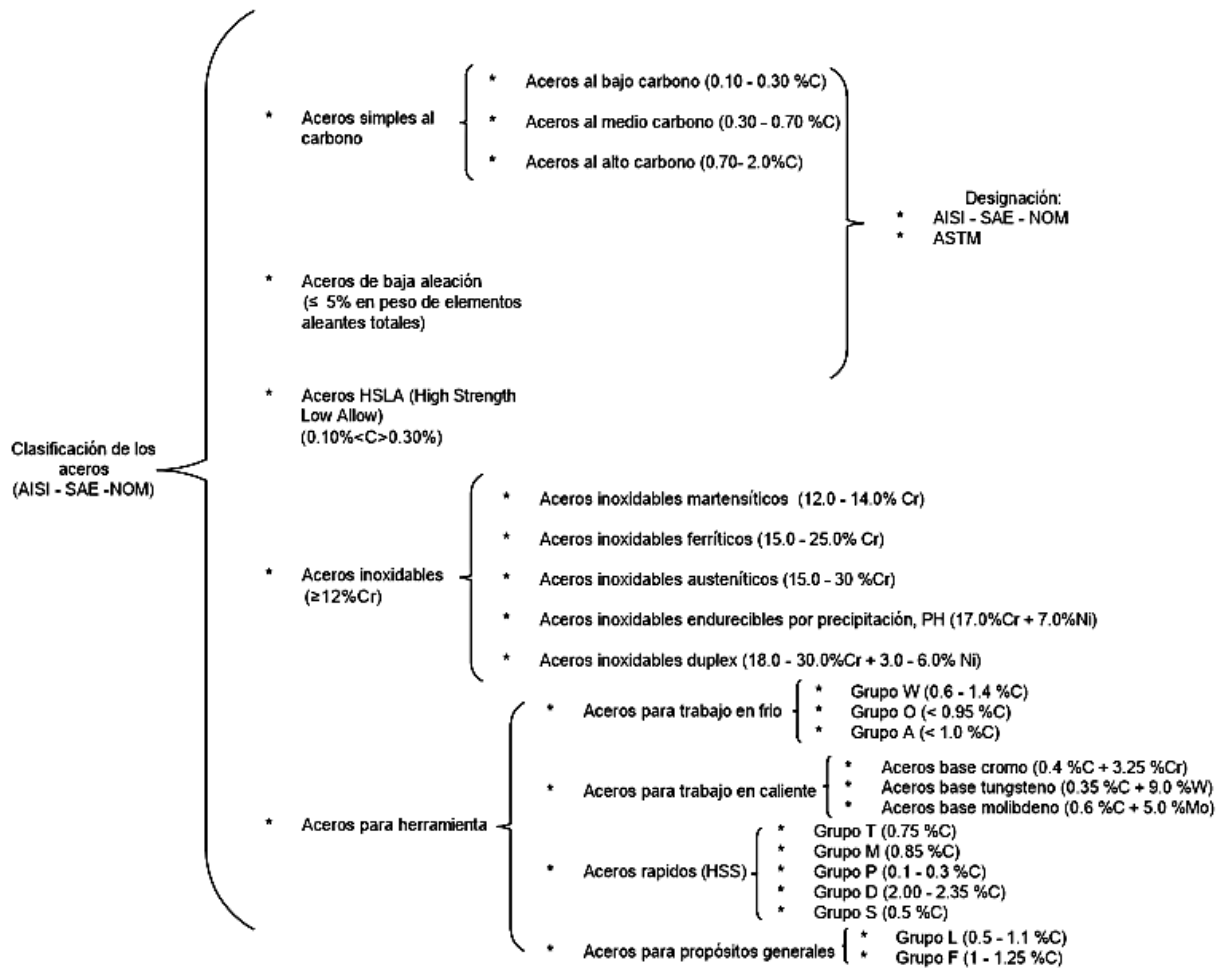


Figura 1.3. Clasificación de los aceros.

CAPÍTULO 2

PANORAMA GENERAL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICABLES A LOS ACEROS

En los diseños de ingeniería, siempre se busca el mejor rendimiento del material seleccionado, como ya se mencionó en el capítulo anterior, a los aceros se les puede aliar distintos elementos para lograr las propiedades físicas y químicas deseadas, sin embargo, frecuentemente estos aceros son provistos en preformas o lingotes, los cuales se tienen que someter a más procesos ya sea en frío o en caliente (maquinado, embutido, laminado, forja, etc.), los cuales son más fáciles de realizar a menor dureza, por lo que no se suministran con sus propiedades “completamente desarrolladas”, es decir, esos aceros aún pueden endurecerse más o ablandarse, mediante los llamados tratamientos térmicos; aparte de utilizarse para eliminar esfuerzos residuales, producto de la obtención de los mismos aceros o su procesos de manufactura, aplicando en algunos casos un rectificado posterior. A lo largo de este capítulo se hace mención de los propósitos de aplicar tratamientos térmicos, y se enunciarán a grandes rasgos los pasos que se deben llevar a cabo para realizar algunos de ellos, como lo son el temple, revenido, normalizado, recocido, globulizado o esferoidizado, y cementado, cabe mencionar que debido a que el enfoque de este proyecto es hacia el temple, y que este contiene un sin fin de variables, se le ha asignado enteramente el capítulo siguiente.

Los tratamientos se definen como “operaciones de calentamiento y enfriamiento cuidadosamente controlados, y que se aplican a un metal o aleación en estado sólido, con el fin de obtener ciertas propiedades deseadas para su empleo” (del Castillo 2007). En estas operaciones no se modifica químicamente al acero, si no su constitución, estructura y estado mecánico.

Como se sabe, los aceros tienen una infinidad de defectos ya sean puntuales o lineales en su microestructura (vacancias, dislocaciones de borde, etc.), dando paso a los desplazamientos de planos, y esto a nivel macroscópico a una cierta dificultad en la deformación, lo que va a resumirse como la dureza del material. para poder modificar la dureza de un material es necesario hacer un reajuste o disminución de defectos en la microestructura del material, para poder

bloquear o disminuir el desplazamiento de los planos en la microestructura; este reajuste o reacomodo se lleva a cabo en la aplicación de los tratamientos térmicos.

Durante los constantes procesos de enfriamiento y calentamiento que se llevan a cabo en los tratamientos térmicos, se logra llegar a las fases más propicias para el endurecimiento o ablandamiento de un metal (Martensita), alcanzando según el tiempo que se mantiene en la temperatura de la fase requerida el porcentaje de transformación deseado, y con esto, el nivel de dureza deseado; debido a que estas fases son metaestables se busca disminuir la temperatura en un tiempo mínimo para que no de paso a la transformación de dicha fase a temperatura ambiente, o dejando enfriar al aire para que esa fase metaestable se transforme en las fases que dan lugar a un material menos duro y con menos esfuerzos residuales.

Debido a que en el proceso antes mencionado se realiza una transformación de fases, comúnmente se le llama transformación martensítica, es decir se forma martensita a partir de austenita.

Para estudiar de una manera precisa a los tratamientos térmicos se necesitan contemplar tres factores principales, los cambios de fase, la temperatura y el tiempo, esta última variable no se encuentra contemplada en los diagramas de fase. Gracias al trabajo de Bain y Davenport se desarrolló un diagrama llamado TTT (diagrama de transformación, tiempo, temperatura), en el que se estudia la transformación de la austenita a temperatura constante.

2.1. DIAGRAMAS TTT Y CCT.

Los dos principales diagramas utilizados en los tratamientos térmicos son el TTT (Diagrama de transformación, tiempo y temperatura) y el CCT (Diagrama de transformación a enfriamiento continuo), en el diagrama TTT, se describe el comportamiento de la transformación martensítica de una manera isotérmica, es decir una temperatura constante, solo variando el tiempo, en los diagramas CCT, se muestra a la transformación martensítica durante un enfriamiento continuo, es decir a cierta velocidad de enfriamiento, por lo que estos diagramas son los que se usan principalmente para describir a los tratamientos térmicos.

2.1.1. Diagramas TTT.

La transformación isotérmica se logra, cuando se enfría al metal desde la temperatura de temple hasta la temperatura requerida, impidiendo que exista transformación alguna, se mantiene el tiempo necesario para que suceda la transformación requerida.

Los diagramas TTT son curvas construidas a partir de graficas de transformación isotérmica, llamadas curvas S de Bain como la que se puede observar en la parte superior de la figura 2.1, las cuales se obtienen de la siguiente manera:

- 1.- Se calienta una probeta hasta la temperatura de austenización (774°C para un acero 1080), asegurándose de mantenerla constante hasta que la estructura del acero se transforme en 100% austenita (recordar que lo que se requiere en un tratamiento térmico es la transformación de la austenita en martensita, para endurecer un acero), hasta llegar a una transformación de 100% Perlita.
- 2.- Después se aplica un baño de sales a una temperatura constante, por debajo de la línea A_1 , se mantiene constante durante cierto tiempo (675°C , ver figura 2.1).
- 3.- Al transcurrir el tiempo deseado, se aplica un enfriamiento en salmuera con hielo o solamente agua fría.
- 4.- Después se le realiza una prueba de dureza y se analiza en el microscopio metalográfico. De acuerdo con su estructura observada y la dureza medida se determina que porcentaje de austenita se transformó en perlita a la temperatura que se aplicó el baño de sales y el tiempo que se mantuvo a esa temperatura, este proceso se repite para obtener un punto de los cuales conformará una de las curvas S de Bain (observar parte superior de la figura 2.1).
- 5.- Para trazar el diagrama TTT, se utiliza una escala de temperatura en el eje Y y otra escala de tiempo de manera logarítmica en el eje X, se proyectan los puntos de inicio, fin y el 50% de transformación austenítica a la temperatura que le corresponde (Temperatura a la cual fue obtenida la S). Se requieren más de cien muestras para obtener un diagrama TTT confiable.

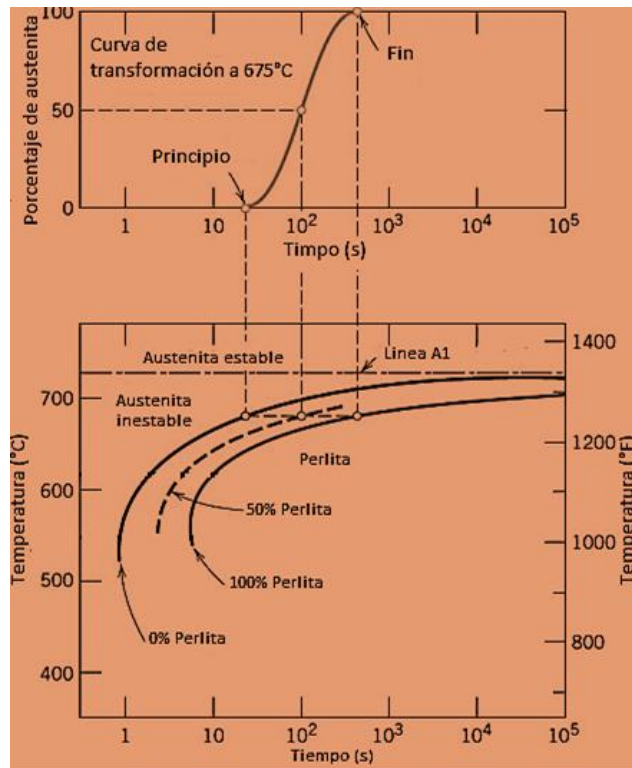


Figura 2.1. Construcción de un diagrama TTT a partir del porcentaje de transformación en función del tiempo.

En los diagramas TTT, como se muestra en la figura 2.2, se encuentran las zonas de austenita estable y la austenita inestable, es importante mencionar que los calentamientos para los tratamientos térmicos se realizan calentando a las muestras a una temperatura dentro de la zona de austenita estable, ya que de lo contrario no habrá transformación alguna al enfriar drásticamente, debido a que no se promueve la nucleación y la difusión dentro de la matriz.

Otra zona importante son las líneas M_s y M_f las cuales indican el inicio y el fin de la transformación martensítica, teniendo en cuenta que la austenita en la fase que se transforma en martensita, lo ideal para obtener la mayor dureza en un tratamiento térmico es que dicha austenita no se transforme en perlita, es decir, no toque la línea de inicio de transformación en perlita (la parte más sobresaliente de la línea de transformación de la perlita se le llama nariz), por ejemplo en el enfriamiento V_3 en la figura 2.2.

Como se observa la transformación martensítica continua a temperaturas por debajo de 0°C , lo que da paso a que existan tratamientos térmicos subcero.

El efecto de los elementos de aleación (Cr, Ni, Si, Mn, Mo, Ti, etc.) desplazan al diagrama TTT hacia la derecha ya que estos elementos difunden más lentamente en el hierro que en el carbono.

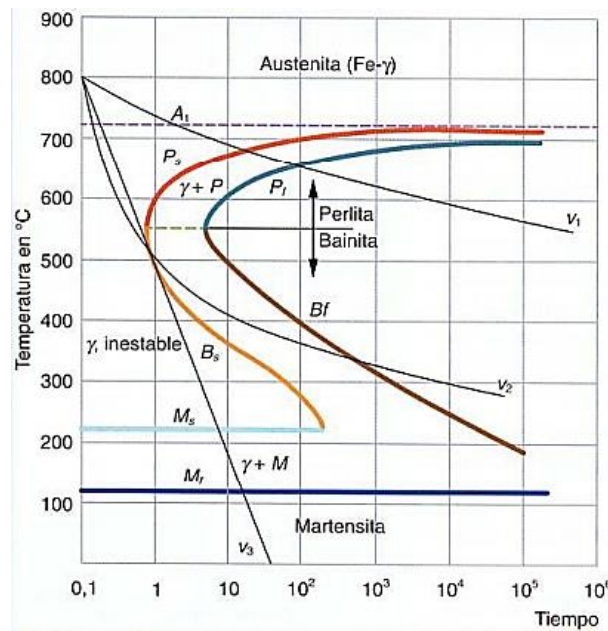


Figura 2.2. Zonas que forman un diagrama TTT.

Las líneas M_s y M_f se obtienen mediante técnicas metalográficas o mediante fórmulas, ya que dependen de la cantidad de carbono y otros elementos de aleación presentes en el acero, como se muestra en la figura 2.3.

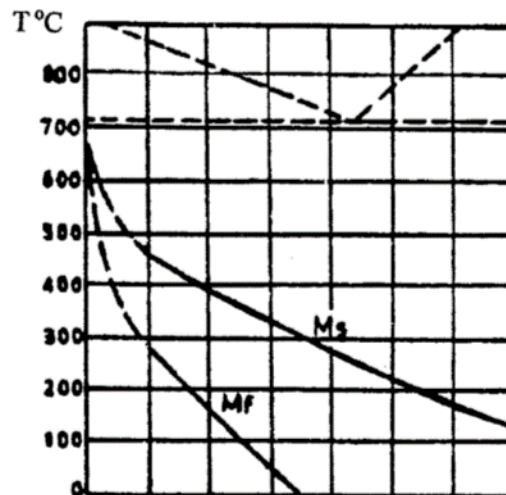


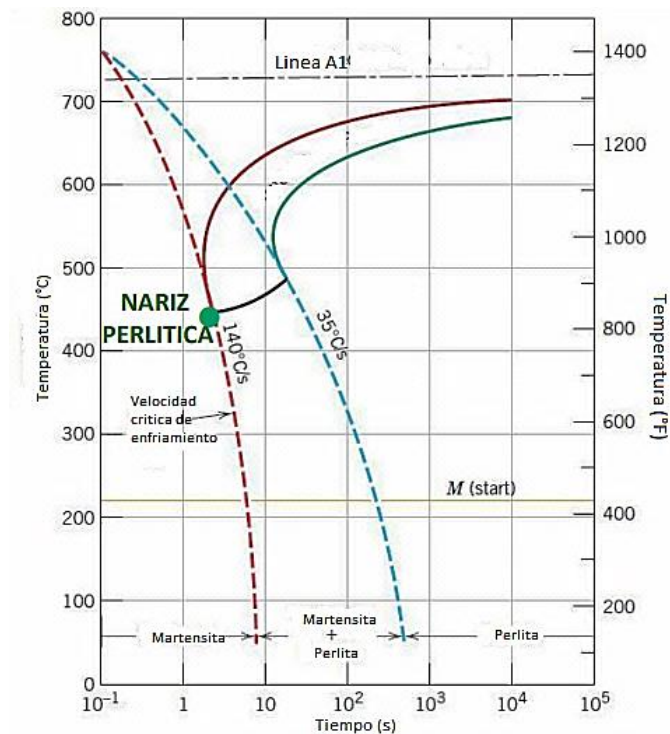
Figura 2.3. Temperaturas de formación de martensita en función del contenido de carbono.

2.1.2. Diagramas CCT.

Los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (CCT) se obtienen siguiendo los mismos pasos que se mostraron para la construcción de un diagrama TTT, solo que en vez de realizar el baño de sales a temperatura constante, las muestras se enfrían a cierta velocidad y sin realizar el enfriamiento súbito, es por eso que se retrasa la transformación y al tener una menor velocidad de difusión debido a el control de temperatura, la nariz del diagrama se mueve hacia la derecha, y hacia abajo, es decir a menor temperatura.

En la figura 2.4, se muestran las velocidades críticas de enfriamiento, a $140\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ o mayores (línea punteada roja), se obtiene una transformación en 100% martensita, a $35\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ o menores (línea punteada azul) se obtiene 100% perlita y entre esas dos líneas se obtiene una mezcla de martensita y perlita.

Las velocidades críticas de enfriamiento nos dan la pauta para poder saber a qué velocidad debemos de enfriar los aceros cuando son sometidos a tratamientos térmicos, ya que entre mayor sea el porcentaje obtenido de martensita, mayor será la dureza elevada.



2.4. Diagrama CCT.

2.2. TEMPLE.

El temple es uno de los tratamientos térmicos más aplicados a los aceros, a sus aleaciones y a algunas aleaciones no ferrosas para aumentar su dureza y resistencia mecánica, aunque aumentando también su fragilidad y con ello disminuyendo su tenacidad y ductilidad.

Para aumentar la dureza de un acero mediante el temple se debe tener como objetivo la mayor transformación austenítica en martensita, ya que esta fase posee una gran dureza, aunque gran fragilidad debido a su estructura tetragonal de cuerpo centrado (BCT), esta fase es metaestable.

A grandes rasgos, los pasos a seguir para realizar el templado son los siguientes:

- 1.- Se calienta el acero a una temperatura de 30 a 50°C por arriba de la temperatura crítica superior (A_3) con la finalidad de obtener 100% de fase austenita.
- 2.- Se mantiene el tiempo suficiente a dicha temperatura, recomendándose una hora por cada 25mm de diámetro de la pieza a templar.
- 3.- Se enfría rápidamente (como se muestra en la figura 2.5, en un tiempo aproximado a cero) en el medio adecuado de acuerdo con el tipo de material, con la finalidad de evitar que la austenita se transforme en perlita y obteniéndose la fase llamada martensita.

Estos pasos se encuentran esquematizados en la figura 2.5.

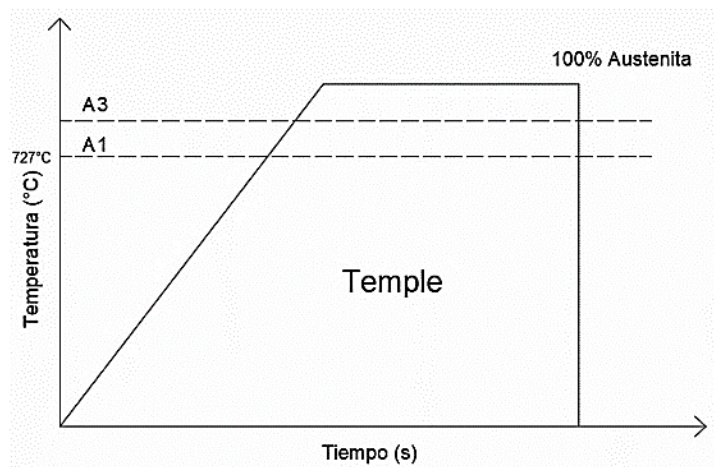


Figura 2.5. Diagrama de temple.

2.3. REVENIDO.

El revenido es un tratamiento térmico que se aplica con frecuencia después del temple con el fin de equilibrar las propiedades físicas como la tenacidad, reducir un poco la dureza, la resistencia mecánica y su límite elástico, también ayuda a liberar esfuerzos residuales producidos por el temple. En los aceros de alta aleación puede suceder que la transformación de la austenita residual durante el revenido logre aumentar la dureza en vez de reducirla.

El revenido es un tratamiento de transformación isotérmica, en el cual se lleva a cabo la transformación de un gran porcentaje de martensita obtenida en el temple en otros constituyentes más estables, como la bainita, aparte de controla la finura de la perlita, la cual aporta propiedades más uniformes al acero.

El proceso para llevar a cabo el revenido se muestra en los siguientes pasos y en la figura 2.6:

- 1.- Se calienta el acero a una temperatura por debajo de la crítica inferior (A_1).
- 2.- Se mantiene el tiempo suficiente a dicha temperatura.
- 3.- Se enfría al aire (se requiere enfriar lentamente, por lo que en acero de alta aleación se suele usar aceite, un medio de temple poco drástico).

El tiempo y la temperatura a la que se debe de calentar y mantener a la pieza a aplicarle el revenido depende de su composición química y las propiedades finales que se requieren, algunas temperaturas aproximadas para diferentes tipos de acero son las siguientes:

- Aceros simples al carbono 200 – 350°C
- Aceros aleados 300 – 450°C
- Aceros de alta aleación 400 – 600°C

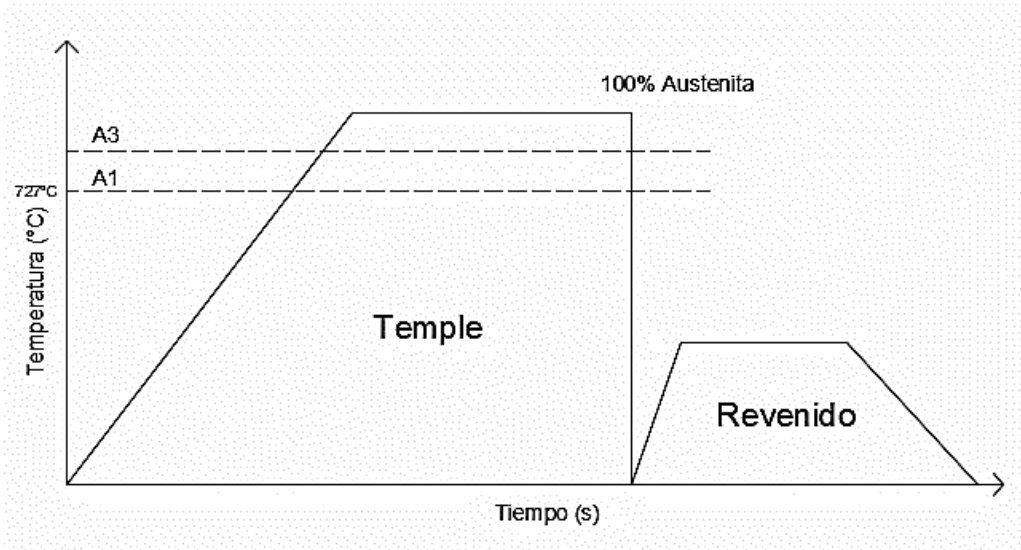


Figura 2.6. Diagrama de revenido.

El revenido se lleva a cabo tres etapas, descritas en la figura 2.7, se puede observar que entre mayor sea el tiempo transcurrido, menor será la dureza obtenida, estas etapas se enuncian a continuación:

Primera etapa.

Se lleva a cabo a temperaturas menores a 300°C, se precipita el carburo de hierro ϵ (épsilon) en los límites de los subgranos de austenita, en los cuales se manifiestan en la martensita, debido a esto se origina una pérdida de aproximadamente 0.25% de carbono de la martensita al transformándose de una celda BCT a una celda cubica, más blanda.

Segunda etapa.

La segunda etapa del revenido solo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero templado, en esta etapa la austenita retenida se transforma en bainita, la cual al ser calentada sufre una precipitación de carburo de hierro con formación final de cementita y ferrita.

Tercera etapa.

En esta etapa el carburo épsilon que apareció en la primera etapa, se transforma en cementita y ferrita al aumentar progresivamente la temperatura del acero.

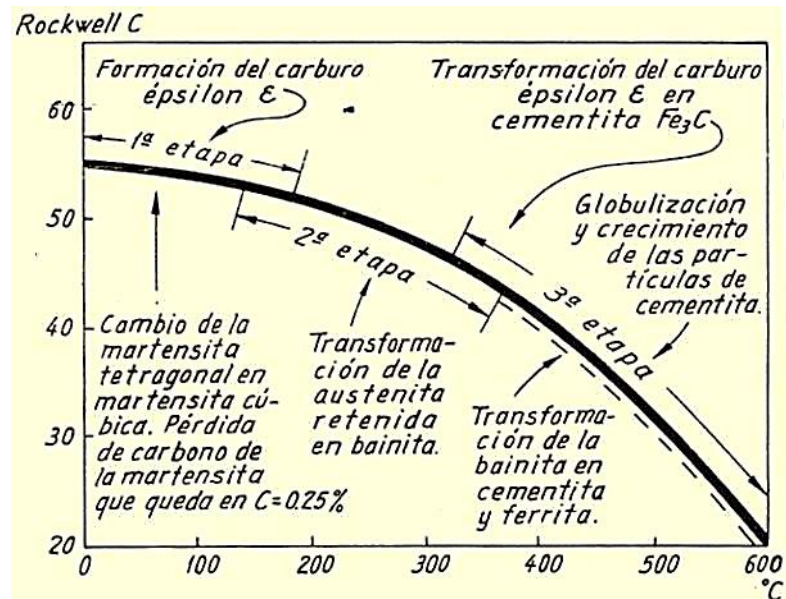


Figura 2.7. Principales etapas de transformación que sufren los aceros en el revenido.

En los aceros de alta aleación (por ejemplo, AISI 410) se presenta una cuarta etapa en el rango de las temperaturas más altas del revenido (alrededor de 600°C), que corresponden a la precipitación de carburos de los elementos de aleación, lo que da lugar a un endurecimiento secundario. A los aceros para herramienta que contienen altos porcentajes de cromo (por ejemplo, los aceros del grupo A, los cuales contienen hasta 5% de Cr) se les aplica dos revenidos sucesivos para eliminar esfuerzos residuales, y así aumentar la tenacidad.

2.4. RECOCIDO.

El recocido es uno de los tratamientos térmicos aplicable a los aceros de medio y alto carbono, en los cuales disminuye su dureza controlando la finura de la perlita. En general este tratamiento térmico consiste en calentar durante cierto tiempo al acero entre la temperatura crítica superior y la temperatura crítica inferior, dejando enfriar lentamente en el horno.

Los principales objetivos del recocido son:

- Obtener una estructura de equilibrio.
- Mejorar la maquinabilidad.
- Aumentar la ductilidad para poder realizar operaciones de trabajo en frío.

De acuerdo con el material al que se aplica y las propiedades finales que se quieren obtener se aplican diferentes tipos de recocido, los cuales se mencionan a continuación.

2.4.1. Recocido subcrítico o incompleto.

En este tipo de recocido el calentamiento se realiza por debajo de la línea A_1 (menos de 227°C), pudiendo enfriarse al aire sin que se presente endurecimiento, por medio de este tratamiento térmico se eliminan esfuerzos internos del material y aumenta su ductilidad.

2.4.2. Recocido isotérmico.

Esta variante del recocido consiste en calentar el acero a una temperatura de 20 a 30°C por arriba de la línea A_3 o de A_1 , Se mantiene el tiempo suficiente a dicha temperatura y se traslada rápidamente a un horno a una temperatura de entre 600 y 700°C , dejándose ahí durante varias horas para que la austenita se transforme a temperatura constante, enfriándose finalmente al aire. Cuando el calentamiento del recocido se lleva a cabo por encima de A_3 se denomina recocido isotérmico de austenización completa, porque, al terminar el calentamiento, el acero está en su totalidad formado por austenita; por el contrario, si el calentamiento se realiza entre la línea A_3 y A_1 entonces se denomina recocido isotérmico de austenización incompleta, ya que solamente la perlita se transforma en austenita al terminar el calentamiento.

Este tipo de recocido se utiliza principalmente en aceros para herramientas, ya que su duración es menor en comparación con el recocido total.

2.4.3. Recocido para relevado de esfuerzos o recocido subcrítico.

También llamado recocido de proceso se aplica a aceros que han sido sometidos a operaciones de maquinado y trabajo en frío muy severas, durante el calentamiento no implica un cambio de estructura sino de recristalización.

Este tipo de recocido se lleva a cabo calentando al acero entre 80 y 170°C por debajo de la línea A₁ durante cierto tiempo y dejar enfriar al aire.

2.5. NORMALIZADO.

Este proceso es un tratamiento térmico aplicable a aceros de bajo y medio carbono (máximo 0.6% de carbono) cuyos principales objetivos se logran al igual que el recocido, a través del control en la finura de la perlita, los cuales son los siguientes:

- Refinar el grano y homogenizar la microestructura para optimizar la respuesta al temple.
- Mejorar la maquinabilidad de los aceros de bajo carbono.
- Mejorar propiedades físicas como la tenacidad y ductilidad.

A grandes rasgos, los pasos a seguir en el proceso de normalizado son los siguientes:

- 1.- Se calienta el acero a una temperatura de 30 a 50°C por encima de A³.
- 2.- Se mantiene el tiempo suficiente a dicha temperatura (1 hora por cada 25mm de espesor).
- 3.- Se enfría al aire.

2.6 GLOBULIZADO O ESFEROIDIZADO.

El globulizado se aplica principalmente a los aceros con alta concentración de carburo de hierro (Fe₃C), ya que poseen mala maquinabilidad, ya que durante este tratamiento térmico se cambia la morfología del carburo de hierro a partículas esféricas grandes (esferoidita), con lo cual se reduce el área de límite de grano. La esferoidita al poseer una matriz continua de ferrita suave incrementa la ductilidad y con ello mejora la maquinabilidad.

Los principales objetivos del esferoidizado son:

- 1.- Romper la red de carburo y formar un carburo esferoidal.
- 2.- Obtener la menor dureza posible en el acero.
- 3.- Optimizar la respuesta al material a operaciones de deformación plástica.

Existen varios métodos para realizar el tratamiento térmico de globulizado, a continuación, se muestran algunos:

1.- Mantener al acero durante un tiempo prolongado a una temperatura justamente por debajo de la línea crítica inferior (A_1) como se muestra en la figura 2.8.

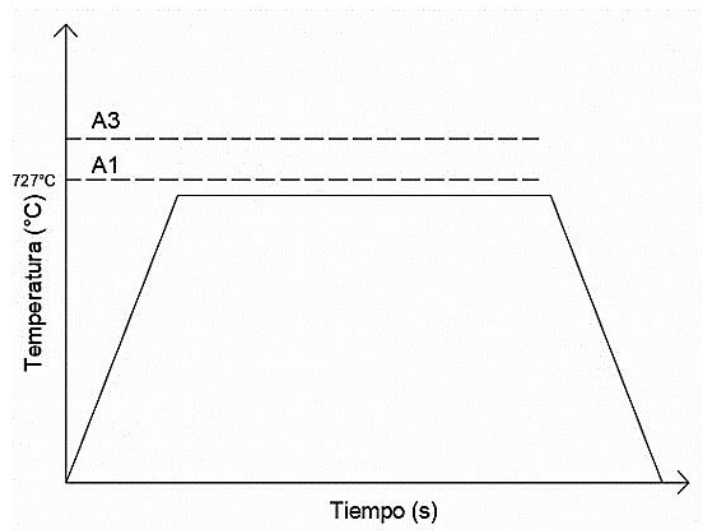


Figura 2.8. Representación esquemática del primer método.

2.- Calentar y enfriar alteradamente entre las temperaturas que están justamente por debajo y encima de la línea crítica inferior (A_1) como se muestra en la figura 2.9.

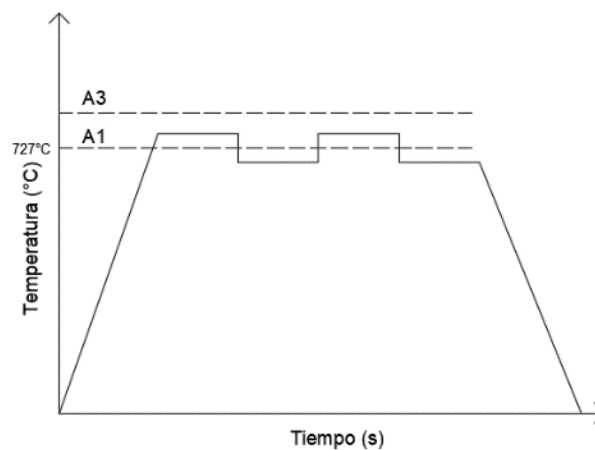


Figura 2.9. Representación esquemática del segundo método.

3.- Calentar a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior y luego enfriar muy lentamente en el horno o mantener a una temperatura por debajo de la línea crítica inferior como se muestra en la figura 2.10.

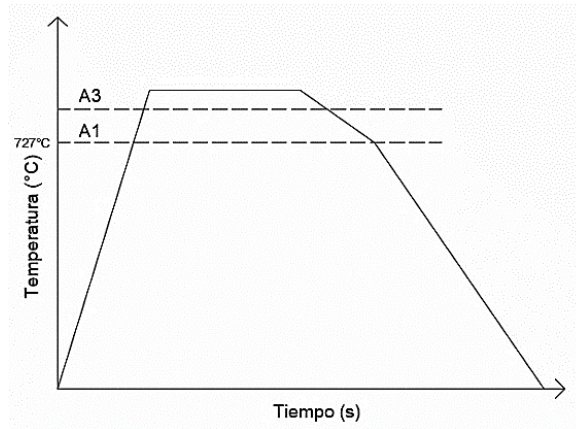


Figura 2.10. Representación esquemática del tercer método.

2.7. TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES Y TERMOQUÍMICOS.

Los tratamientos térmicos explicados anteriormente se aplican a las piezas hechas de acero teniendo como finalidad que las propiedades a modificar sean homogéneas, sin embargo, algunas veces se requiere que solo la superficie de la pieza tenga una alta dureza para que sea resistente al desgaste y la fatiga, pero un núcleo dúctil y tenaz para tener una buena resistencia al impacto. Para obtener estas propiedades se aplican los tratamientos térmicos superficiales y termoquímicos.

Existen tratamientos térmicos superficiales como el temple superficial, y, tratamientos termoquímicos como el carburizado y nitrurado, en cada uno de estos procesos se introducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie, los cuales otorgan alta resistencia a la fatiga.

2.7.1. Carburizado.

En este tratamiento termoquímico se difunde carbono en la superficie del acero, calentando rápidamente a una temperatura por encima de A_3 en una atmósfera rica en carbono (CO_2) mientras que el centro de la pieza siga a una temperatura por debajo de A_1 ; así se produce una superficie rica en carbono debido a la solubilidad del carbono en la austenita, después se aplica temple y revenido, obteniéndose una superficie formada por martensita revenida al alto carbono y un centro ferrítico.

El grosor de la superficie formada por martensita revenida es llamado profundidad de cementado y, es menor en aceros carburizados que en aceros endurecidos por temple superficial.

2.7.2. Nitruración.

En este proceso existen variantes de acuerdo con la atmosfera en la que se calienta el acero, su finalidad es enriquecer la superficie de la pieza con nitrógeno, el cual produce un efecto similar al del carbono.

Entre las variantes de la nitruración esta la cianuración, en donde el metal se sumerge en cianuro liquido permitiendo que el carbono y el nitrógeno se difundan en el acero; en la carbonitruración se calienta la pieza en una atmosfera de monóxido de carbono y amoniaco para que el nitrógeno y el carbono se difundan en la superficie del acero. Cabe resaltar que la nitruración se lleva a cabo por debajo de A_1 y que nitrógeno solo se difunde a partir de un gas.

2.7.3. Temple superficial.

Este tratamiento se lleva a cabo de la misma manera que un temple común solo que la pieza debe ser calentada de una manera más rápida, para evitar que la temperatura se iguale en el núcleo.

Se comienza por calentar la superficie del acero a una temperatura por encima de A_3 , después se temple el acero y debido a la diferencia de temperatura el núcleo sigue teniendo la misma dureza que al principio, posteriormente se aplica el revenido para obtener las propiedades finales deseadas.

En este tratamiento térmico se tiene la posibilidad de solo calentar áreas específicas de una pieza y así solo endurecer las partes necesarias, la precisión y la profundidad de temple va a depender en gran parte del método que se utiliza para calentar el acero, los cuales pueden ser, flama de gas, haz electrónico o una bobina de inducción.

2.8. RESUMEN.

Los tratamientos térmicos son procesos en los cuales a grandes rasgos influyen el tiempo y la temperatura, los cuales dan paso a la transformación de las fases del acero; procesos que tiene como guía a los diagramas TTT y CCT.

A estos procesos se someten piezas ya antes preformadas o en bruto, a las cuales es necesario cambiar sus propiedades de acuerdo con lo que se requiera, con dos objetivos generales, para ablandar o endurecer.

El tratamiento térmico aplicable a los aceros para endurecerlo es el temple y para ablandarlo son el revenido, recocido, normalizado y el globulizado o esferoidizado.

Normalmente a los aceros se les aplica primeramente el temple, pero debido a que con este tratamiento térmico se alcanza una gran dureza y fragilidad, aunado a que estas propiedades no son uniformes en todo el material, se le aplican tratamientos térmicos de ablandamiento, los cuales modifican la estructura o la recristalizan para poder equilibrar la dureza con la tenacidad y la resistencia mecánica con la ductilidad. El normalizado a pesar de ser un tratamiento térmico de ablandamiento, es aplicado al acero antes de ser sometido a el temple, ya que mejora la respuesta a dicho proceso.

CAPÍTULO 3

PROCESO DE TEMPLE

El tratamiento térmico del temple es un proceso con una gran cantidad de variables, como el medio de temple y su agitación, la templabilidad del acero, la profundidad de temple, el medio de calentamiento, la porción de la pieza a templar, etc. Esto dio pie a la creación de diversas variaciones del temple y un análisis muy amplio de cada una de sus variables; es por eso por lo que en este capítulo se presenta más a fondo el método más utilizado para el endurecimiento de piezas fabricadas con aleaciones de acero.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el temple se basa en la transformación de la austenita en martensita, lo cual se logra calentando por arriba de la línea A_3 , se espera el tiempo suficiente para que ocurra la transformación homogénea de martensita y se enfría súbitamente hasta la zona M_s . el acero se endurece debido a que la martensita forma barreras muy fuertes las cuales evitan la dislocación en la estructura cristalina del acero.

La transformación martensítica lleva a cabo una transformación en la estructura cristalina, la austenita FCC presenta una transformación polimórfica a martensita tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), esta transformación se puede observar en la figura 3.1, en la cual se muestra unidos con líneas rojas a los átomos que forman la estructura cristalina de la martensita y a los lados unidos con líneas color negro a los átomos que formaban a la estructura FCC de la austenita, esta transformación ocurre al calentar el acero a una temperatura en la que se promueve altamente la difusión de los átomos, el hierro se desplaza y forma la estructura BCT de la martensita, teniendo en ella átomos de carbono como solutos intersticiales, constituyendo una solución sólida sobresaturada (Es por esto que para que un acero tenga una buena respuesta al temple es necesario que contenga más de 0.35% de carbono), la cual puede transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a una temperaturas que implican una alta velocidad de difusión (por lo que es posible aplicar el revenido).

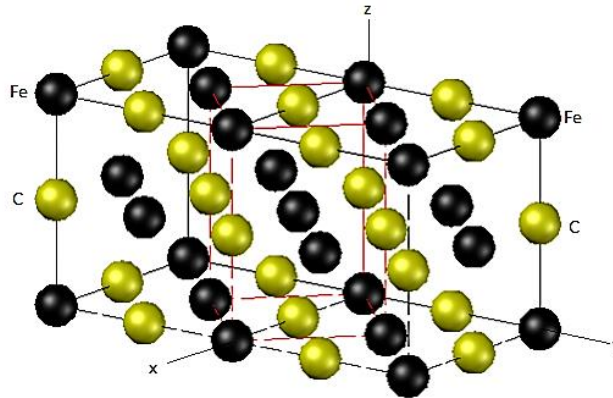


Figura 3.1. Distorsión de Bain en la transformación martensítica de los aceros.

Durante la transformación martensítica sucede una gran expansión en volumen cuando se forma martensita a partir de austenita, si dicha expansión no sucede de manera uniforme y a una velocidad propia en todo el material templado, surgen deformaciones y con ello grietas y esfuerzos residuales, para evitar esto, es necesario hacer que el temple no sea tan drástico, es por esto por lo que para distintos materiales se utilizan distintos medios de temple.

3.1. MEDIOS DE TEMPLE.

Para realizar un buen temple a algún acero es necesario conocer su velocidad crítica de enfriamiento, ya que de esto depende su medio de temple, el cual debe de ser aquel que consiga una velocidad de enfriamiento ligeramente superior a la crítica, ya que como se explicó al inicio de este capítulo, la expansión durante la formación de la martensita puede producir grietas y deformaciones si se lleva a cabo de una manera muy rápida ya que no se logra un enfriamiento uniforme, en la tabla 3.1. se muestran algunos ejemplos de medios de temple ordenados en forma descendente de acuerdo con la severidad con que llevan a cabo la transferencia de calor y los acero a los que son aplicables.

Durante el proceso de enfriamiento al realizar el temple, se llevan a cabo tres etapas, en las cuales dependen de las propiedades del medio de temple como lo es el punto de ebullición, estas etapas se muestran en la figura 3.2.

Etapa 1

Inmediatamente al introducir el acero al medio de temple se forma una capa de vapor que envuelve al metal y dificulta la transferencia de calor, es por esto por lo que el enfriamiento se vuelve lento, en esto influye la temperatura de ebullición, la conductividad del vapor producido, y el grado de agitación del baño que remueve el líquido en contacto con el acero.

Etapa 2

Al descender la temperatura desaparece la envoltura de vapor, aunque el líquido en contacto con el metal sigue hirviendo y produciendo burbujas. En esta etapa el enfriamiento es rápido y se le denomina enfriamiento por transporte de vapor, en esta etapa influye la viscosidad del medio de temple y el calor de evaporización (Energía necesaria para transformar al medio de temple de estado líquido a estado gaseoso).

Etapa 3

Esta etapa se presenta cuando la temperatura del metal desciende por debajo de la temperatura de ebullición del medio de temple líquido, entonces el enfriamiento se lleva a cabo por medio de conducción y convección, pero para este punto la diferencia de temperatura entre el medio de temple y el acero es pequeña el enfriamiento es lento, dependiendo de la conductividad térmica del líquido y de su grado de agitación.

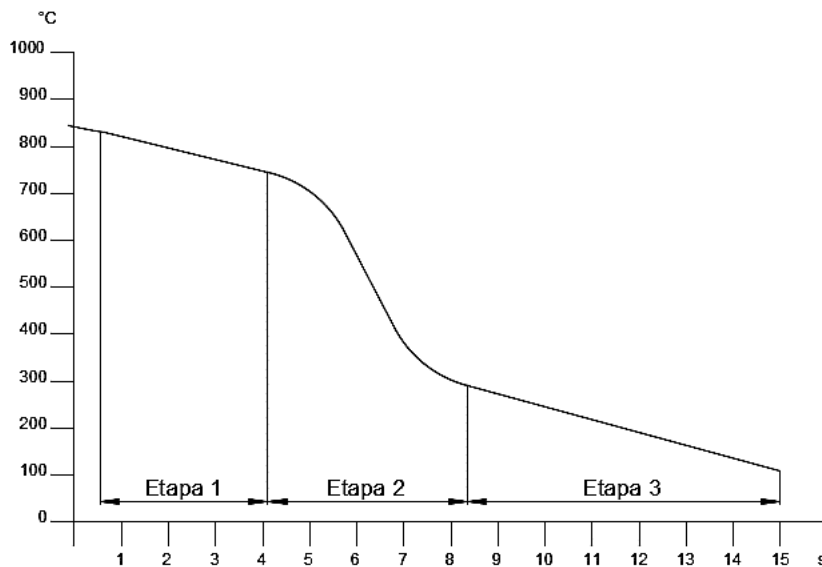


Figura 3.2. Etapas presentes en el temple de un acero.

3.2. TEMPLABILIDAD.

En el primer capítulo, clasificación de los aceros, se mencionada la templabilidad de cada grupo de aceros, ahora se muestra con más profundidad a que hace referencia dicha propiedad y como es que se determina, ya que se requiere de pruebas experimentales normalizadas.

La templabilidad se define como “La capacidad que tiene un acero de endurecer a profundidad por medio de temple” (Del Castillo, 2007), es decir, cuando un acero se temple, la velocidad de enfriamiento no es uniforme en toda la pieza, sino que es máxima en la superficie y disminuye en el centro, por lo que el endurecimiento se lleva a cabo de una mejor manera en la superficie y va disminuyendo hasta donde la velocidad de enfriamiento supera a la velocidad crítica.

A continuación, se presentan los factores de los cuales depende la templabilidad en un acero.

- La velocidad crítica de enfriamiento depende de la estabilidad de la austenita y de la nucleación durante la transformación.
- La estabilidad de la austenita depende principalmente de los elementos de aleación como la concentración de carbono.
- La descomposición o transformación de la austenita, como fenómeno de nucleación y crecimiento se ve afectado por la presencia de límites de grano y carburos no disueltos que actúan como núcleos, aumentando la velocidad crítica de enfriamiento.

En general en los aceros al bajo carbono, la nariz de las curvas del diagrama TTT y CCT se presentan en tiempos muy cortos, por lo que se requieren de velocidades de enfriamiento muy elevadas para producir martensita; es por esto que se dice que los acros de bajo carbono tienen baja templabilidad y los aceros de alta aleación tienen una alta templabilidad e incluso enfriando al aire producen martensita.

3.2.1 Prueba Jominy.

Para poder tener una referencia en la templabilidad de diferentes aceros se han diseñado pruebas como la del ensayo Jominy, la cual esta normalizada por la ASTM Designation A255-48T End Quench Test for Hardenability of Steel y consiste en enfriar una probeta de 1plg de diámetro y 4plg de largo (previamente austenitizada) por medio de un chorro de agua a cierta presión (definida por la norma) que se hace incidir en uno de sus extremos (Como se muestra en la figura 3.3), y así, cada punto a lo largo de la probeta a partir de la punta templada tendrá una cierta

velocidad de enfriamiento, se mide la dureza sobre uno de los bordes ya rectificadas, efectuando estas mediciones cada dieciseisavo de pulgada en la primera pulgada de longitud y después a intervalos más largos, permitiendo construir una gráfica de dureza contra distancia desde el extremo templado, un ejemplo de dicha grafica e muestra en la figura 3.3.

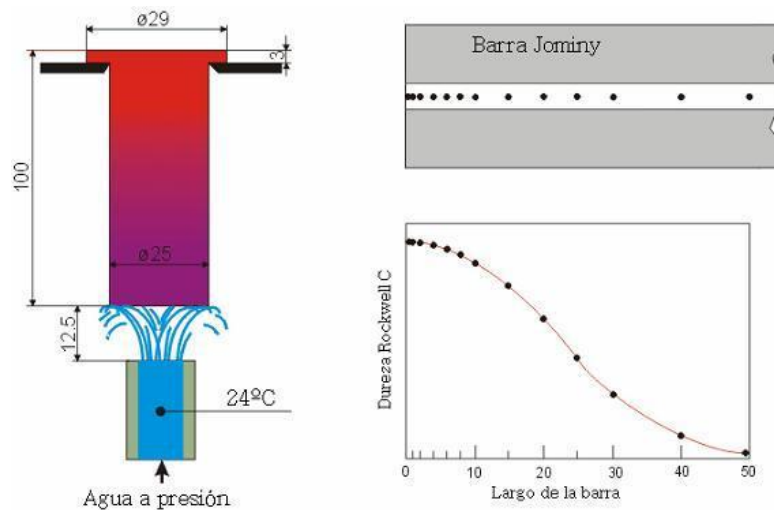


Figura 3.3. Prueba Jominy.

Con este ensayo, se puede determinar la profundidad de endurecimiento que presenta la probeta. Una manera rápida para poder determinar que un acero tiene alta templabilidad es observar una gráfica del ensayo Jominy casi plana (como se puede observar en la figura 3.4), por ejemplo, en un acero 4340 (acero de alta aleación), mientras que un acero de bajo carbono (por ejemplo, el 1040) tiene una curva que baja rápidamente; por lo que se concluye que la templabilidad está determinada principalmente por el contenido de aleación del acero.

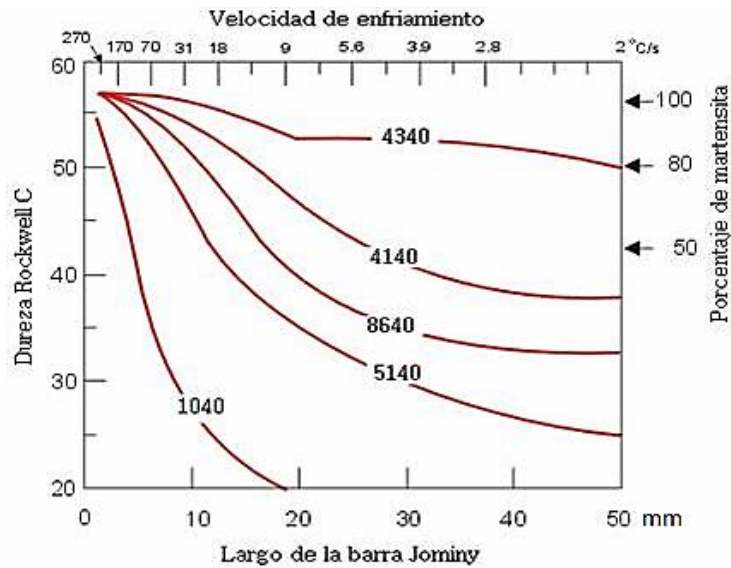


Figura 3.4. Curvas obtenidas en la prueba Jominy para diferentes aceros.

3.2.2 Índice de templabilidad.

Para poder tener un mejor referente de la dureza que llega a tener una cero al templarlo y a que profundidad se puede lograr esa dureza, existe el índice de templabilidad, el cual se presenta como un código.

Por ejemplo:

Un acero 4140 tiene una templabilidad de $J_{50}=6$, es decir, una dureza $Rc=50$ a una distancia de 6/16 de pulgada desde el extremo templado en la prueba Jominy.

La AISI ha establecido curvas de templabilidad máxima y mínima como las que se muestran en la figura 3.5, conocidas como bandas de templabilidad entre las cuales debe estar cualquier barra de acero de esa composición, también se presenta un sufijo “H” para aquellos aceros que se compran con base a una especificación de templabilidad, siendo de importancia secundaria aspectos como la composición química y tamaño de grano.

Límites de dureza para propósitos de especificación		
Distancia <i>l</i> 1/16"	4140H	
	Max.	Min.
1	60	53
2	60	53
3	60	52
4	59	51
5	59	51
6	58	50
7	58	48
8	57	47
9	57	44
10	56	42
11	56	40
12	55	39
13	55	38
14	54	37
15	54	36
16	53	35
18	52	34
20	51	33
22	49	33
24	48	32
26	47	32
28	46	31
30	45	31
32	44	30

Temperaturas de templado
técnicas recomendadas
por la SAE
*Normalizar 1 600° F
*Austenizar 1 550° F
*Para muestras forjadas o
 laminadas, templar.

Banda de composición de endurecimiento a 1400°					
C	Mn	Si	Cr	Mo	
0.37 / 0.44	0.65 / 1.10	0.20 / 0.35		0.75 / 1.20	0.15 / 0.25

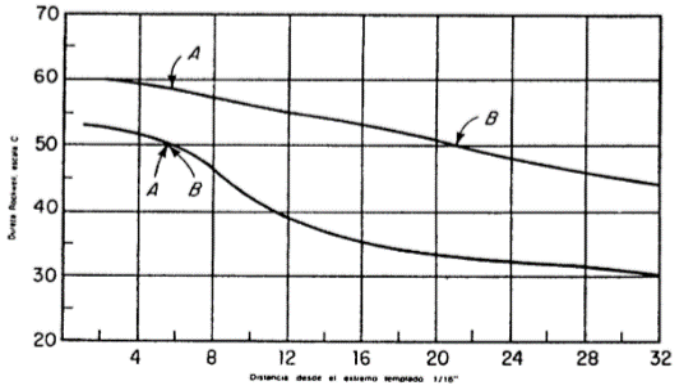


Figura 3.5. Bandas de templabilidad de un acero 4140H.

Como se tiene una curva superior y una inferior, el índice de templabilidad se puede especificar de dos maneras:

- Se especifica primero la dureza de la curva inferior y después de la curva superior igualándolas a la distancia en que se encuentran, por ejemplo, en la figura 3.5 los puntos A muestran durezas de 50Rc en la inferior y 60Rc en la superior, ambas a 6/16 de pulgada, por lo tanto, se denota como:

$$J 50/58 = 6/16 \text{ de plg}$$

- Para un valor de dureza específico se indican las distancias primero de la curva inferior y luego de la curva superior.

$$J 50 = 6/16 \text{ a } 21/16 \text{ de plg}$$

3.2.3. Coeficiente H.

Como se puede notar en las etapas del enfriamiento en el temple, algo muy impórtate es la transferencia de calor, lo cual para este tratamiento se puede parametrizar por medio del coeficiente H, el cual es el equivalente al coeficiente de transferencia de calor de cualquier sustancia, en la tabla table 3.1. se pueden observar distintos valores de H para diferentes medios

de temple, los cuales varían dependiendo si el medio está quieto o agitado, ya que la agitación ayuda a romper la capa de vapor y mejora la rapidez total de transferencia térmica, al llevar al líquido más fresco a hacer contacto con la pieza que se temple.

Tabla 3.1. Medios de temple.

Medio de temple	Acero aplicable	Coeficiente H		Rapidez de enfriamiento en el centro de una barra de 1plg (°C/s)	
		sin agitar	Agitado	sin agitar	Agitado
Salmuera	Acero simple	2.0	5.0	90	230
Agua	Acero simple	1.0	4.0	45	190
Aceite	Aceros aleados y de alta aleación	0.25	1.0	18	45
Sales fundidas *	Aceros de alta aleación	0.3	0.8	20	36
Aire	Aceros de alta aleación	0.02	0.01	1	10

*Los datos dependen de la mezcla de sales que se utiliza.

3.3. VARIACIONES DEL TEMPLE.

Debido a que los aceros templar se destinan a diversas aplicaciones y por ende se requiere de diferentes propiedades y también dependiendo el tipo de acero y su respuesta al temple, se realizan distintas variaciones de dicho tratamiento térmico.

Las principales variantes en el proceso de templado son: el medio de temple, el método y el tiempo de calentamiento, las sucesiones de enfriamiento y calentamiento etc.

A continuación, se presentan distintas variaciones del temple, con un enfoque en el temple superficial utilizando como método de calentamiento una bobina de inducción, ya que este es el objetivo de esta tesis.

3.3.1. Austemplado.

Esta variante del temple forma parte de los llamados tratamientos térmicos especiales, también es llamado temple bainítico y se trata de un tratamiento isotérmico en el cual la austenita se transforma en bainita a temperatura constante.

Consiste en calentar al acero hasta la temperatura de austenitización seguido de un enfriamiento rápido en un baño de sales, que se encuentra a una temperatura justo por arriba de Ms, manteniéndose a una temperatura constante el tiempo suficiente, hasta que se lleve a cabo la total transformación de austenita en bainita, después se enfría al aire.

La principal ventaja del austemplado es la ausencia de esfuerzos internos y grietas microscópicas que se producen en los temples martensíticos (temple ordinario), la tenacidad es mucho más elevada que en las tratadas con austemplado y que las piezas templadas y revenidas posteriormente tienen aproximadamente la misma dureza, aunque en las piezas tratadas con austemplado se presenta una mayor ductilidad.

La principal desventaja es el efecto del tamaño de la pieza, ya que solo son adecuadas las secciones que se pueden enfriar con suficiente rapidez para evitar la transformación a perlita, por lo tanto, se puede utilizar con piezas con un espesor de máximo ½ pulgada.

3.3.2. Martemplado.

Este es un tratamiento isotérmico que se lleva a cabo calentando al acero y manteniéndolo a una temperatura por arriba de la temperatura crítica superior (A_3) durante el tiempo suficiente para que se efectúe completamente transformación de la austenita y enfriándolo en un baño de sales fundidas, cuya temperatura oscila entre los 200 y 300°C, debe ser superior a la temperatura del punto Ms.

El acero debe permanecer el tiempo suficiente en el baño de sales hasta que la temperatura se iguale, enfriándose después al aire, De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocos esfuerzos internos; en este proceso se aplica un revenido cuando se requiera disminuir la dureza o resistencia obtenida.

Debe de tomarse en cuenta que la velocidad de enfriamiento tiene que ser un poco mayor a la crítica para obtener una estructura completamente martensítica; también se debe tener especial

cuidado con la temperatura del baño de sales, que sea próxima y superior a Ms, ya que de lo contrario parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita antes que el resto de la austenita del centro y el proceso sería imperfecto.

Esta variante del temple evita las deformaciones y tensiones internas, pero está limitado a la aplicación en piezas no muy grandes (no mayores a 1plg de espesor), se utiliza en cojinetes de bolas, engranes de diferenciales, troqueles, etc.

3.3.3. Temples interrumpidos.

Este es un tratamiento térmico en el cual es utilizado principalmente en aceros para herramientas, por la posibilidad de controlar mejor las propiedades deseadas, ya que en ellos el revenido puede ser seguir aumentando la dureza en vez de disminuirla.

En los temples interrumpidos existen dos variantes, en las cuales solo se cambia el medio de temple.

3.3.3.1. Temples interrumpidos en agua y aceite.

En este tipo de temple se realiza el mismo proceso de austenitizado que en los anteriores pero el acero se enfría hasta unos 300 o 400°C en agua, y enseguida se sumerge en aceite, sin tener un equilibrio de temperaturas entre la superficie y el centro de la pieza.

Este tipo de temple interrumpido se aplica principalmente a herramientas con formas complejas fabricada en acero templable en agua y tiene como objetivo evitar (con el enfriamiento en aceite) evitar que las diferencias de temperaturas del acero sean demasiado bruscas en la transformación martensítica.

3.3.3.2. Temple interrumpido en agua y aire.

Este tipo de temple es parecido al anterior solo que en el enfriamiento consiste en sumergir al acero en agua hasta que alcance aproximadamente 250°C y posteriormente dejándolo enfriar al aire, aunque también en ocasiones se enfría en aceite y posteriormente en aire.

Este temple tiene la ventaja de que se igualan las temperaturas en diferentes zonas y se evitan deformaciones y agrietamientos. Se utiliza para el temple de limas.

3.3.4. Temple superficial.

El temple superficial es una variante del temple que se aplica a piezas en las que se requiere una capa muy dura y resistente al desgaste, pero un corazón dúctil y tenaz, también se aplica a piezas con alta complejidad y fabricadas solo con ciertos tipos de aceros.

El temple superficial consiste en calentar rápidamente solo la superficie del acero, lograr la austenización y enfriar bruscamente, teniendo como ventaja solo calentar cierta zona del acero.

El temple superficial se puede aplicar a cualquier tipo de acero de 0.30% de carbono (debido a la velocidad crítica de enfriamiento), pero comúnmente se utilizan aceros con más de 0.60% de carbono por el peligro a que se desconchen las capas duras (se desprendan) en los haceros al carbono, ya que con aceros aleados se puede disminuir la cantidad de carbono sin peligro de sufrir desconchado ya que no sufren un cambio tan brusco de zona dura y blanda.

Cuando en las piezas a templar superficialmente se necesita tener solo dureza en la superficie basta con emplear aceros al carbono, pero si se requiere tener una alta tenacidad y resistencia a la fatiga es necesario utilizar aceros aleados, con contenidos de elementos como los que se muestran en la tabla 3.2. junto con la máxima dureza a alcanzar.

Tabla 3.2. Composición de aceros comúnmente utilizados en el temple superficial.

C	Mn	Si	Rockwell C
0.35	0.80	0.25	53
0.35	1.45	0.30	55
0.46	0.68	0.18	59
0.48	0.69	0.30	60
0.55	0.74	0.22	62
1.00	0.30	0.26	63

La profundidad del temple superficial se puede variar debido a varios factores, como el tiempo y el tipo de calentamiento, ya que para este tratamiento térmico existen dos principales métodos de calentamiento, por llama oxiacetilénica y por corrientes de inducción de alta frecuencia.

3.3.4.1. Calentamiento por llama oxiacetilénica.

Este proceso también conocido como flameado, se utiliza principalmente para templar piezas que por su forma o dimensiones no pueden ser endurecidas por otro método.

Consiste en templar determinadas zonas de las piezas, calentándolas con una llama oxiacetilénica y enfriándolas rápidamente con chorros de refrigerante.

Las instalaciones utilizadas para realizar este tipo de temple consisten en uno o varios sopletes (aparte de la llama oxiacetilénica también se puede emplear otros tipos de gases como el gas natural y derivados del petróleo) que calientan las partes de las piezas que se desea endurecer y varios chorros de agua, aceite o aire, o depósitos auxiliares que enfrían rápidamente las zonas calientes. Existen cuatro principales variantes de las instalaciones para el temple por llama oxiacetilénica.

1. Máquinas en las que la pieza permanece quieta y la llama se mueve sobre la superficie que se va a templar, seguida del aparato que provee el refrigerante.
2. Maquinas en la que la llama y el aparato de enfriamiento son estacionarios y la pieza es la que se mueve.
3. Maquinas en las que la llama y el aparato de enfriamiento se mueven en una dirección y la pieza en otra.
4. Maquina en la que el temple se realiza de manera pausada, al calentarse la zona a templar y después aplicar manualmente el medio de enfriamiento, introduciendo la pieza en un depósito.

Algunas de las ventajas del calentamiento por llama oxiacetilénica son:

- Endurecimiento de zonas de piezas muy grandes o de formas complejas.
- Se puede endurecer solo la parte superficial sin afectar a las propiedades del corazón.
- Evita deformaciones en piezas de gran tamaño.

La razón principal de por qué es que no se producen deformaciones al aplicar este método de temple en piezas grandes es porque se calienta solo una parte pequeña de la pieza y el resto permanece frío, por lo tanto, tiene suficiente rigidez para impedir cualquier deformación importante en el material, aunque para evitar aún más las deformaciones en este procedimiento, es común agregar medios de sujeción a la pieza, los cuales lo impiden.

Las profundidades de la capa dura que se obtiene en el proceso de llama oxiacetilénica varia de 1 a 6mm, la cual depende de la clase de acero y de la manera en que se efectúa el tratamiento, principalmente del tiempo en que se calienta el acero, por ejemplo, para que el temple alcance

una profundidad de 1 a 2mm se debe de calentar dos minutos aproximadamente (varía dependiendo el tipo de combustible).

3.3.4.2. Calentamiento por corrientes de inducción de alta frecuencia.

Este procedimiento se utiliza para endurecer superficialmente pequeñas piezas de acero en su zona periférica. Una de las características de este tipo de calentamiento que se lleva a cabo de manera muy rápida, y por lo tanto se tiene un mejor control de la profundidad de la capa dura, se puede aplicar en zonas muy limitadas.

El proceso consiste en colocar la pieza a templar en el interior de una espira o conjunto de espiras, a través de las cuales se hace pasar una corriente eléctrica de alta frecuencia, la cual calienta a las piezas y posteriormente se enfría rápido con agua aceite o aire.

Las espiras del dispositivo de calentamiento están constituidas por un tubo de cobre refrigerado en su interior por agua, aire o algún medio solido como arena, la corriente eléctrica crea en el interior de las espiras un campo magnético alternativo que a su vez da lugar a corrientes eléctricas alternativas de alta frecuencia en las piezas, las cuales son suficientes para calentarla, este proceso se puede observar esquemáticamente en la figura 3.6.

El calentamiento de las piezas a templar se lleva a cabo por el efecto de inducción (Ley de Joule), y por dos efectos al reaccionar el metal con dicha inducción, la histéresis y corrientes de Foucault.

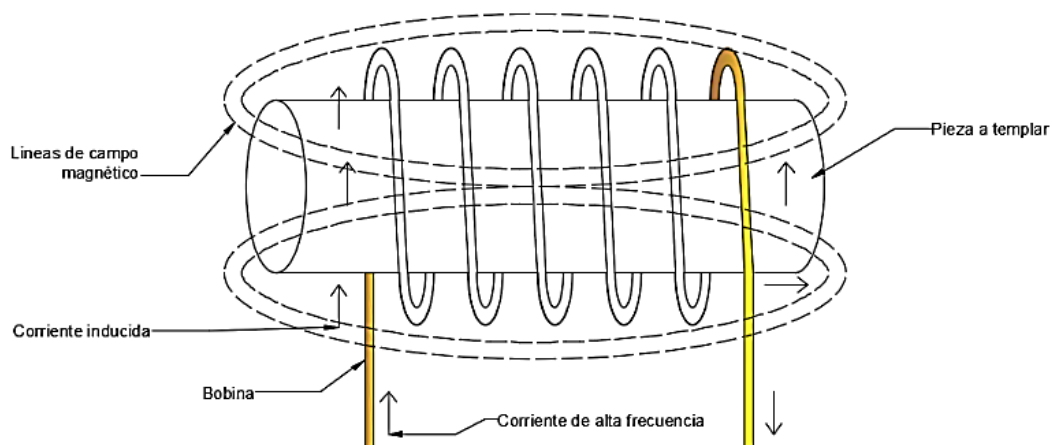


Figura 3.6. Calentamiento por inducción de corriente de alta frecuencia.

3.3.4.2.1. Por histéresis.

Bajo la acción del campo magnético las pequeñas partículas de hierro tienden a polarizarse en un determinado sentido, creándose en cada una de ellas un polo norte y un polo sur. Al variar el sentido con mucha frecuencia, las partículas se comienzan a calentar debido a la fricción molecular que al disiparse a través de la pieza eleva su temperatura.

En el temple de aceros por alta frecuencia, el calentamiento por histéresis tiene muy poca importancia y es casi despreciable, ya que cuando la temperatura de la pieza sobrepasa la línea A_2 (768°C) el acero comienza a ser amagnético.

3.3.4.2.2. Por corrientes de Foucault.

Después de que la histéresis deja de presentarse en el calentamiento del acero, este pasa a ser calentado en su totalidad por corrientes de Foucault.

En la periferia de las piezas sometidas a campos magnéticos alternativos de alta frecuencia, nacen unas corrientes circulantes llamadas corrientes de Foucault que son capaces de calentar dicha zona, llegando a alcanzar temperaturas de 800 a 1000°C ; en este proceso el acero se comporta como una resistencia, que disipa potencia en forma de calor, es decir tiene un comportamiento acorde con la ley de Joule.

El efecto del calentamiento por corrientes de Foucault se reduce a medida que aumenta la temperatura, ya que la resistencia de acero disminuye, esto es una ventaja, pues automáticamente se evita el sobrecalentamiento excesivo de la periferia de las piezas.

3.3.4.2.3. Instalaciones para el calentamiento.

En las instalaciones más utilizadas para realizar el calentamiento por corrientes de inducción de altas frecuencias se desarrollan dispositivos que alcanzan frecuencias desde 60Hz hasta 1MHz y potencias desde 5kW hasta 40kW .

En estas instalaciones se emplean dispositivos de calentamiento muy variados, ya que dependen de la forma de las piezas a temprar y por se han diseñado los siguientes procesos e infraestructura para llevar a cabo el proceso deseado.

1. Instalaciones en las que al avanzar a pieza y pasar a través de las espiras se calienta el acero y luego se temple al ser enfriado por chorros de agua que están dispuestos muy próximos a la espira.

2. Instalaciones en las que las piezas se colocan en cintas transportadoras y pasan por la bobina, la cual comienza a calentarlas cuando esta baja a cubrir la pieza mientras esta se detiene por un momento, cayendo después a un depósito con el medio de temple deseado.

3.3.4.2.4. Inconvenientes del temple por alta frecuencia.

- Elevado costo de las instalaciones.
- La necesidad de preparar en cada caso dispositivos adecuados para cada clase de trabajo.
- La variación muy brusca de temperaturas en la pieza, lo que da paso a cambios muy bruscos de dureza.

3.3.4.2.5. ventajas del temple por alta frecuencia.

- Reduce tiempos de proceso de temple.
- Se puede lograr un endurecimiento más preciso en determinada zona.
- Se pueden alcanzar profundidades de endurecimiento de hasta 5mm.

3.3.4.2.6. Control de la profundidad de calentamiento.

La profundidad de calentamiento que se consigue utilizando instalaciones de alta frecuencia depende principalmente de la frecuencia, potencia y tiempo.

A continuación, se presentan datos experimentales resultado de los parámetros mencionados en el párrafo anterior.

- Variación de frecuencia.

Utilizando una instalación de 20kW y un segundo de calentamiento y 500kHz se obtiene una profundidad de calentamiento de 2mm y a 2MHz 1mm de profundidad.

- Variación de la potencia.

Con medio segundo de calentamiento, 500kHz y 20kW se obtiene una profundidad de 1.2mm, mientras que a 40kW la profundidad es de 3.1mm.

- Variación del tiempo.

Con una instalación de 20kW, 500kHz de frecuencia y un segundo se obtienen 2mm de profundidad y con dos segundos 2.9mm.

Estas variantes dependen de varios factores, que principalmente dificultan la inducción del campo magnético en el acero. Un material con propiedades ferromagnéticas tiene una permitividad muy alta, provocando que el campo magnético se intensifique dentro del material y por ende la corriente inducida sea mayor, de tal forma que la potencia disipada en la superficie de la pieza sea muy elevada; se debe tener en cuenta que a frecuencias altas se induce un nivel de corriente mucho mayor en la superficie de la pieza que cuando se trabaja con niveles de frecuencia bajos.

Un factor intrínseco del material a temprar es el coeficiente de transferencia de calor por conducción, ya que se produce el efecto cortical, es decir, la corriente inducida en la superficie es mayor que en interior de la pieza, por lo tanto, la periferia es la que se calienta más y más rápido, mientras que el interior se calentará principalmente por conducción.

3.4. RESUMEN.

En el desarrollo de este capítulo se ha analizado el proceso de temple y sus diversos factores, como lo es la templabilidad del acero, el medio de temple, los tiempos de temple, variaciones del proceso y algunos procesos alternativos de calentamiento para el temple.

Como se pudo denotar, la templabilidad de un acero aumenta con el porcentaje de contenido en carbono y el grado de aleación que tenga, de esto va a depender el medio de temple como puede ser, agua, aire, aceite o baño de sales fundidas; dentro de las variaciones del temple se van a encontrar el austemplado, martemplado, los temples interrumpidos y el temple superficial, cada uno depende de las propiedades que se requieran alcanzar y el acero al que se va a aplicar.

El temple superficial es una variante en la cual se busca tener una corteza dura en las piezas, sin afectar las propiedades del corazón, se aplica principalmente a aceros de alta aleación o con un porcentaje de carbono mayor al 0.6% para evitar el desconchamiento, la manera más rápida y en la que se puede obtener una mayor profundidad de endurecimiento es la de inducción de corrientes de alta frecuencia.

CAPÍTULO 4

MEMORIA DE CÁLCULO.

La tecnología de calentamiento por inducción es un proceso que no es reciente, ya que se menciona en literatura que consta de 1945, tal es el caso del libro de José Apraiz, Tratamientos térmicos de los aceros, 2° ed., actualmente esta tecnología se ha ido mejorando, al disminuir el volumen de los componentes y el costo.

El funcionamiento del circuito básico del calentador por inducción es parecido al de un transformador en el que se tiene una bobina que induce un campo magnético en otra, es decir obedece en un principio a la ley de inducción de Faraday, en el que la bobina primaria es la que induce el calentamiento y la bobina secundaria la pieza a calentar; ese campo magnético variante, genera una corriente en la bobina secundaria (ley de Ampere), las cuales disipan energía en forma de calor.

Las corrientes que circulan a través de la bobina secundaria serán producto del efecto de la histéresis, por el cual nuestra bobina secundaria se calentará un poco, ya que conforme aumenta la temperatura del acero disminuye sus propiedades magnéticas; y, por otro lado, las corrientes de Foucault o corrientes parasitas son las que harán el trabajo mayor, las cuales debido al efecto piel en los conductores, solo se presentarán en la superficie de la bobina secundaria (probeta), como se puede observar en la figura 4.1, cabe mencionar que la frecuencia de la corriente que circula a través de la bobina primaria tiene una correlación con la profundidad de calentamiento de la probeta (longitud de penetración), ya que entre mayor sea la frecuencia, menor es la profundidad (figura 4.1 B), de manera análoga ocurre lo contrario si la frecuencia disminuye (figura 4.1 A).

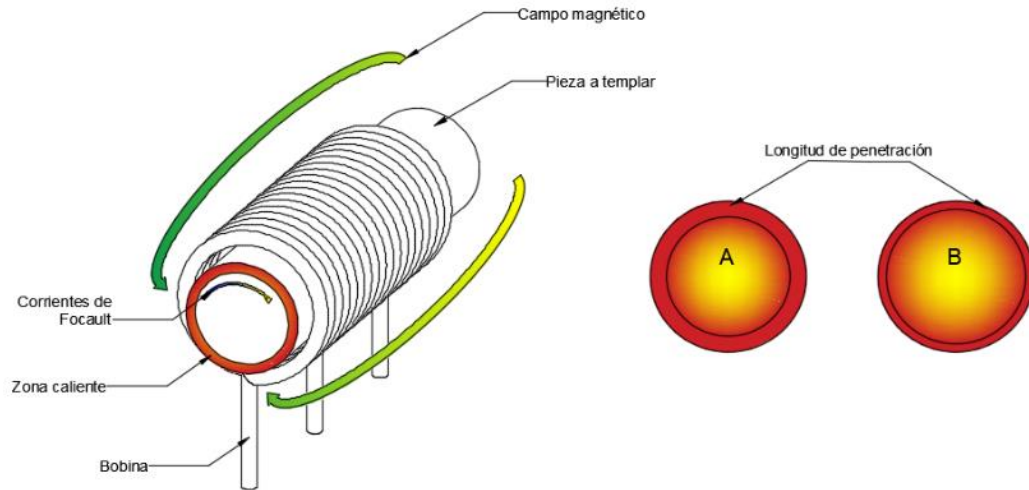


Figura 4.1. Transferencia de calor en la probeta.

Para poder comenzar con los cálculos del dispositivo de calentamiento por inducción eléctrica de alta frecuencia es necesario aclarar los siguientes puntos:

- En los transformadores eléctricos las corrientes de Foucault y por histéresis se reflejan en pérdidas, por lo tanto, se buscan evitar en dichas maquinas, pero para efectos de este proyecto, dichas corrientes se buscan elevar el máximo, de tal manera que la potencia disipada a través de ellas sea mayor a la potencia inducida.
- En este dispositivo no se lleva a cabo transferencia de calor entre bobina y probeta sino, solo dentro de la misma probeta (de la superficie al centro).

En el último punto se denota el por qué, de la eficiencia de este tipo de calentamiento, ya que las pérdidas por convección o conducción de los métodos convencionales se presentan de una manera despreciable.

Es necesario recalcar que los cálculos para el dispositivo de temple están dirigidos desde un principio para que este se pueda construir con componentes comerciales y de fácil adquisición.

4.1. DISEÑO DEL CIRCUITO PARA CALENTAMIENTO.

En esta parte del capítulo se presentan la serie de pasos requeridos para poder diseñar de una manera funcional y de la forma más eficiente posible el circuito que realiza la inducción por alta frecuencia a la pieza a templar.

4.1.1. Calor que requiere la probeta para ser calentada.

Para poder templar un acero es necesario elevar su temperatura, para lo que es requerido un proceso de transferencia de calor, la cual se llevará a cabo dentro de la misma probeta, por el efecto piel, de la periferia de la probeta hacia el centro, como se muestra en la figura 4.2. sin embargo, se debe de tener la energía suficiente para poder calentar a toda la pieza.

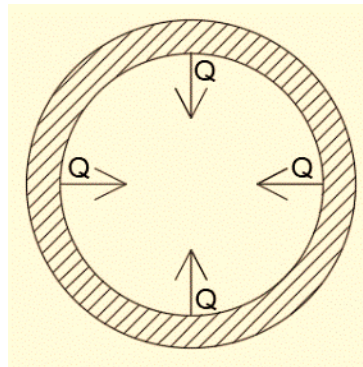


Figura 4.2. Transferencia de calor en la probeta.

Sabiendo que la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de un material está dada por la ecuación 4.1.

$$Q = C_p m \Delta T \quad (4.1)$$

Donde:

C_p : Calor específico.

m : Masa

ΔT : Diferencia de temperatura.

*Para poder utilizar dicha ecuación se toma en cuenta que la sección de la probeta tiene una longitud de 77mm (Sección mínima que se podrá templar en el dispositivo) y un diámetro de 10mm, por lo que la masa será la que se muestra en la ecuación 4.2:

$$m = \rho V \quad (4.2)$$

Considerando a la densidad media del acero como:

$$\rho = 7801 \frac{kg}{m^3}$$

$$m = \left(7801 \frac{kg}{m^3} \right) \left(\left(\frac{\pi(0.01m)^2}{4} \right) (0.077m) \right) = 47.17 \times 10^{-3} kg$$

Tomando como referencia el calor específico del acero como:

$$C_p = 473 \frac{J}{kgK}$$

Sabiendo que la diferencia de temperaturas está dada por la temperatura de temple de los aceros (para fines de este cálculo se tomó una temperatura promedio) menos la temperatura ambiente se tiene que:

$$\Delta T = T_i - T_f = 850^\circ C - 25^\circ C = 825^\circ C$$

Por lo tanto, el calor requerido para calentar la sección de la probeta es:

$$Q = \left(473 \frac{J}{kgK} \right) (18.38 \times 10^{-3} kg) (825K) = 18.4 kJ$$

Este cálculo permite conocer que trabajo debe ser capaz de realizar el circuito a diseñar y así alcanzar el calor deseado ya que, por tratarse de un circuito inductor, debe ser variable en el tiempo para que se produzca un flujo de corriente en la probeta, es decir deberá ser un circuito inversor el cual tenga un voltaje de entrada directo y a la salida (bobina primaria) cuente con un voltaje alterno.

4.1.2. Circuito resonante.

Para poder calentar a la probeta es necesario considerar una disipación de calor, lo que equivale a disipación de potencia, que como ya se mencionó al inicio del capítulo se producirá por las corrientes de histéresis, que para la realización de los cálculos serán despreciables y solo se

tomarán en cuenta las corrientes de Foucault, por lo que la disipación de potencia total está dada por la ecuación 4.3.

$$P = I_F^2 R \quad (4.3)$$

Donde:

I_F : Corrientes de Foucault

R : Resistencia del material

Para construir el dispositivo de calentamiento se pretende utilizar una fuente de poder de 12V de corriente directa que es capaz de suministrar una potencia de hasta 350W, por lo tanto, esta se toma como la potencia máxima a disipar.

Para poder calcular la resistencia eléctrica de la sección de la probeta a templar se emplea la ecuación 4.4.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.4)$$

Donde:

ρ : Resistividad (la del acero en este caso)

L : Longitud

A : Área

Si se sabe que la resistividad del acero a temperatura ambiente (25°C) es $\rho = 2.8 \times 10^{-7} \Omega m$ y considerando que la resistencia en corriente directa es aproximadamente igual a la resistencia de corriente alterna se obtiene lo siguiente:

- Considerando el efecto piel con una profundidad de penetración $\delta = 0.7mm$, el área por la que circulará corriente estará dada por la ecuación 5, y es equivalente a la mostrada en el área sombreada de la figura 4.5.

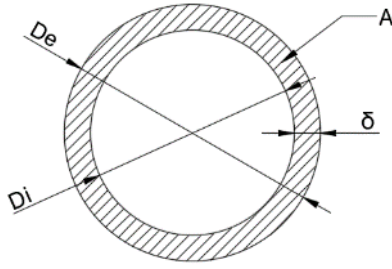


Figura 4.3. longitud de penetración.

$$A = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \quad (4.5)$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$A = \frac{\pi(10^2 - 8.6^2)}{4} = 20.45 \text{mm}^2$$

$$R = \frac{(2.800 \times 10^{-7} \Omega \text{m})(0.077 \text{m})}{20.45 \times 10^{-5} \text{m}^2} = 1.05 \text{m}\Omega$$

Por lo tanto, tomando en cuenta que la potencia máxima que podemos disipar es de 350W se puede calcular que la corriente que circulará por la probeta es igual a I_F .

$$I_F = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{350 \text{W}}{1.05 \times 10^{-3} \Omega}} = 575.66 \text{A}$$

Considerando que el material con el que se desea construir la bobina de calentamiento es tubo de cobre flexible de 1/8" y la longitud propuesta es de 77mm, las espiras que se pueden incluir en la construcción de una bobina tipo solenoide son 18, y analizando a la probeta como una bobina de una sola espira, la relación de transformación será dada por la ecuación 4.6.

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_F}{I_1} \quad (4.6)$$

Por lo tanto:

$$\alpha = 18$$

$$I_1 = \frac{575.66A}{18} = 32.98A$$

Como se puede observar es un nivel de corriente considerable (I_1), la cual puede ser disminuida aumentando las espiras de la bobina, pero a su vez se tendría que aumentar el voltaje y si se desea disminuir la potencia esta ya no será capaz de calentar la probeta ya que se disiparía el calor al ambiente antes que al interior de la probeta; por lo que se mantiene dicho cálculo de corriente.

Debido a que a estos niveles de corriente las bobinas demandan una gran potencia reactiva se propone utilizar un tanque resonante, donde al sintonizarlo con su frecuencia de resonancia se amplificará de forma natural el voltaje y la corriente.

Un circuito resonante es aquel en el que se produce una resonancia eléctrica, la cual se produce cuando coincide la frecuencia de un sistema eléctrico con una fuente externa a la misma frecuencia, esto sucede cuando se tiene una reactancia inductiva en paralelo (la bobina de calentamiento o bobina primaria) en paralelo con una reactancia capacitiva (se deberá agregar un banco de capacitores) y ambas reactancias se igualan dando un aumento total en el sistema, como se muestra en la figura 4.4. debido a que las reactancias corrigen el factor de potencia se obtiene un circuito puramente resistivo, tal y como se requiere.

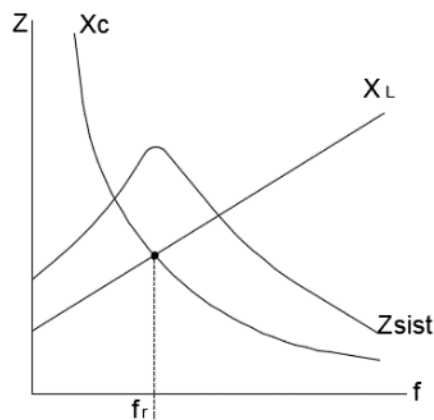


Figura 4.4. Comportamiento de las reactancias ante la variación de frecuencia.

Si se sabe que la reactancia capacitiva está dada por la ecuación 4.7.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.7)$$

Y también que la reactancia inductiva está dada por la ecuación 4.8.

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.8)$$

Igualando se tiene que la frecuencia de resonancia se puede calcular con la ecuación 4.9.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.9)$$

Como se puede observar, la frecuencia de resonancia está en función de la inductancia y capacitancia de nuestros elementos del circuito, los cuales deberán ser seleccionados con base en dicha frecuencia.

4.1.3. Planteamiento del circuito.

Con base en los cálculos anteriores es posible determinar que se requiere un circuito inversor resonante, para esto se ha diseñado un circuito como el que se muestra en la figura 4.5.

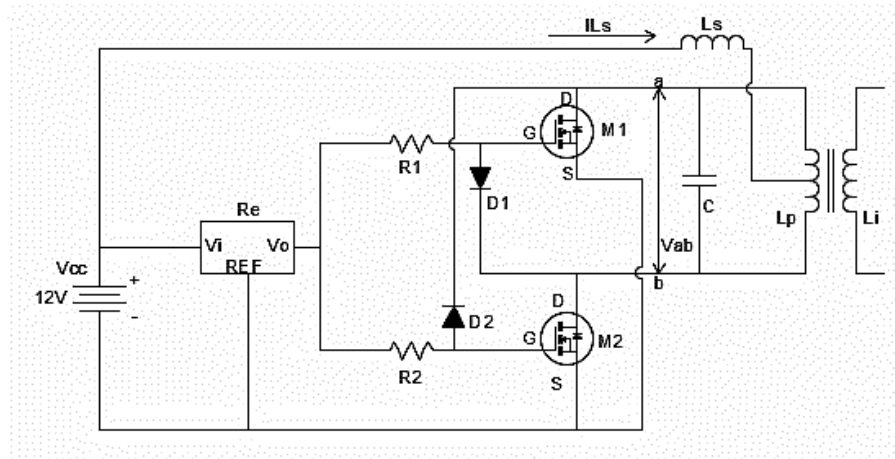


Figura 4.5. Planteamiento del circuito inversor resonante.

* En el circuito de la figura 4.5 se pueden observar las conexiones que se tienen que realizar entre ellos, sin embargo, a excepción de la fuente que será de 12Vcc con una potencia de 350W y las

dimensiones de la bobina L_p , aun no se determinan modelos, ya que estos serán elegidos conforme a los siguientes cálculos.

En los siguientes puntos se describe la función de cada uno de los componentes mostrados:

- **Bobina L_p**

Este dispositivo es el esencial para el funcionamiento del circuito, ya que, a través de él, será posible la inducción a la bobina L_i , la cual es la probeta por temprar, cabe recalcar que debido a que se pretenden temprar pizzas cilíndricas es por lo que se ha construido una bobina en forma de solenoide, ya que la geometría ayuda a dirigir y distribuir el campo magnético.

- **Capacitor C**

Este capacitor (aunque debido a las altas corrientes que se manejarán se utilizarán varios capacitores conectados en paralelo y no provocar un cortocircuito al sobrepasar el grado dieléctrico del capacitor), es el encargado de completar el circuito resonante y su valor dependerá de la frecuencia de resonancia, la cual a su vez depende de la longitud de penetración que se planteó en el cálculo de la resistencia de la sección de la probeta que se requiere calentar.

- **Bobina L_s**

Esta bobina sirve para poder obtener un factor unitario dentro del circuito resonante, por lo que su valor dependerá de la capacitancia e inductancia del circuito resonante.

- **MOSFETS M1 y M2**

Estos dispositivos serán los encargados de realizar la inversión de corriente directa a alterna, ya que al tener una diferencia de potencial positivo V_{GD} será posible la circulación de corriente entre D y S.

- **Diodos D1 y D2**

Estos dispositivos hacen que la diferencia de potencial V_{GD} sea variable y se lleve a cabo el “swicheo” de los MOSFETS.

- **Resistencias R1, R2 y Regulador de voltaje Re**

Estos dispositivos serán solo de protección a los MOSFEST.

- **Fuente de voltaje Vcc**

Esta es la fuente de poder que alimentará a nuestro circuito, la cual se ha escogido así, debido a que es una de las más comerciales; es capaz de suministrar hasta 350W.

A continuación, se describe el funcionamiento del circuito mostrado en la figura 4.5.

En este circuito se lleva a cabo un régimen de corriente variable, por lo que su funcionamiento se puede describir en varias etapas o en semiciclos.

En este circuito al principio se tendrá un comportamiento transitorio, en el que los diodos permiten la circulación libre de corriente; después de este estado, continuaran los siguientes:

1. En esta etapa de operación del circuito la corriente circula como se muestra con línea punteada en la figura 4.6, como se puede observar, en este caso, el MOSFET M2 está permitiendo el paso de corriente, mientras que exista una diferencia de potencial entre G y D, una vez que el capacitor C se carga y el potencial del punto G y el D se igualan, el MOSFET M2 interrumpe el paso de corriente; mientras este MOSFET conduce corriente, el M1 permanece bloqueado ya que en sus putos G y D no existe un diferencial de potencial.

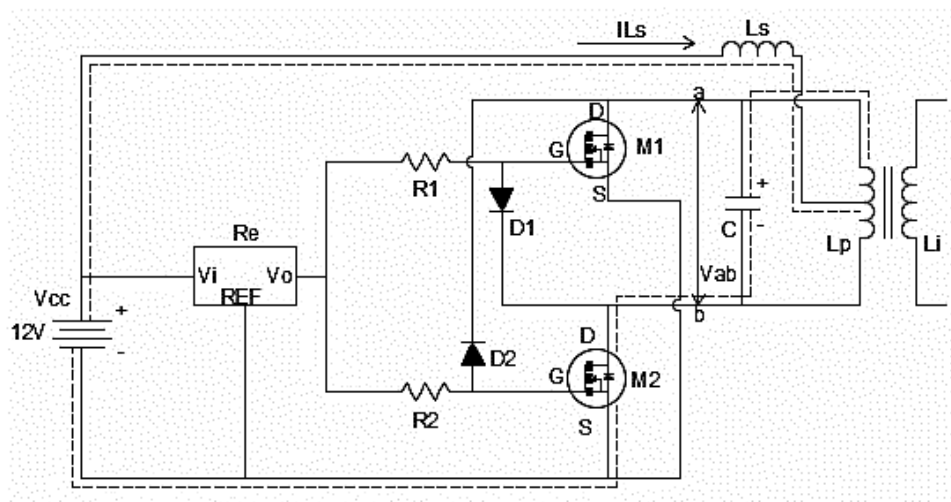


Figura 4.6. Circuito resonante en estado 1.

2. En la segunda etapa del circuito resonante, la corriente circula como se muestra con línea punteada en la figura 4.7. y como se puede observar, en el instante en el que es MOSFET M1 comienza a permitir el paso de corriente el capacitor C se descarga hacia la bobina L_p y cambia su polaridad, es decir comienza la inversión de la corriente directa en alterna. De modo inverso a la etapa anterior, ahora mientras el MOSFET M1 permite el paso de corriente, el M2 lo restringe hasta que nuevamente el capacitor se cargue.

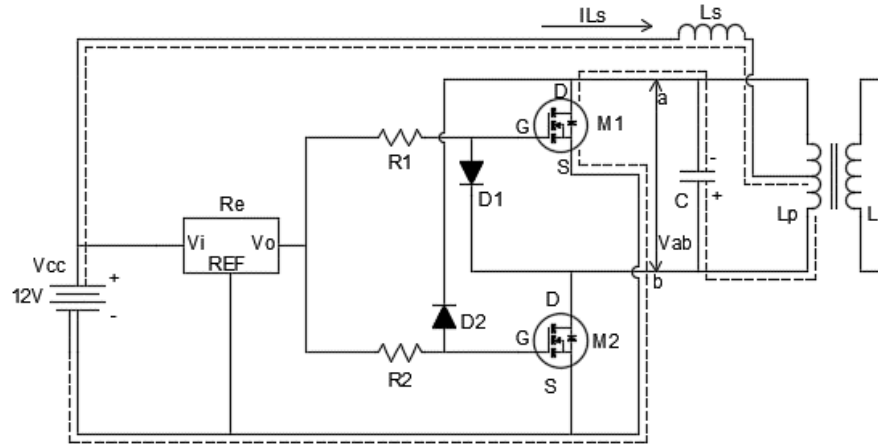


Figura 4.7. Circuito resonante estado 2.

Las etapas o semiciclos anteriores se repiten a la frecuencia de resonancia y son descritos en la gráfica que se muestra en la figura 4.8.

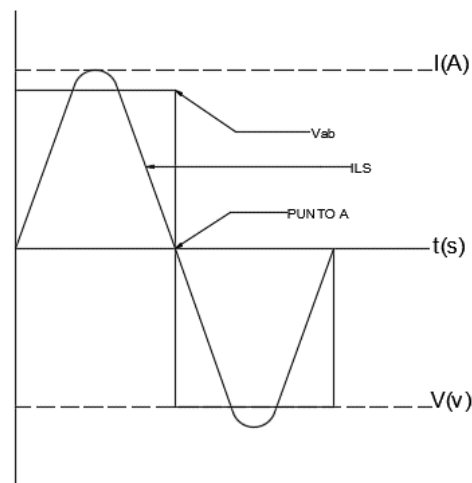


Figura 4.8. Grafica de voltaje y corriente del circuito resonante.

En la figura 4.8. se puede observar como el voltaje y la corriente del circuito resonante presentan un factor de potencia unitario, y esto ayuda a que en el momento en que se realiza la conmutación, no se disipe potencia en el MOSFET.

4.1.4. Determinación de los dispositivos electrónicos a utilizar en el circuito resonante.

Para determinar los componentes electrónicos a utilizar en el circuito resonante se necesitan realizar algunos cálculos, principalmente para determinar la corriente que va a circular en la bobina, la inductancia de la bobina calefactora y la capacitancia para el tanque resonante.

Anteriormente se definió la longitud de penetración de la corriente en la probeta, la cual está definida por la ecuación 4.10:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f_r \mu}} \quad (4.10)$$

Donde:

ρ = Resistividad del acero [$\Omega\text{m/m}$]

f_r = Frecuencia de resonante

μ = Permeabilidad magnética del acero ($1.35 \times 10^{-6} \text{Tm/A}$)

Por lo tanto, al despejar la frecuencia de resonancia y sustituir los datos anteriormente determinados, se obtiene:

$$f_r = \frac{\rho}{\pi \mu \delta^2} = \frac{28 \times 10^{-7} \Omega\text{m/m}}{\pi (1.35 \times 10^{-6} \text{Tm/A}) (0.7 \times 10^{-3} \text{m})^2} = 134.734 \text{ kHz}$$

El dispositivo principal en el circuito resonante es la bobina L_p , de la cual anteriormente se hizo mención que será construida de tubo de cobre de 1/8" y de acuerdo con los requerimientos, esta tendrá las características que a continuación se muestran (figura 4.9).

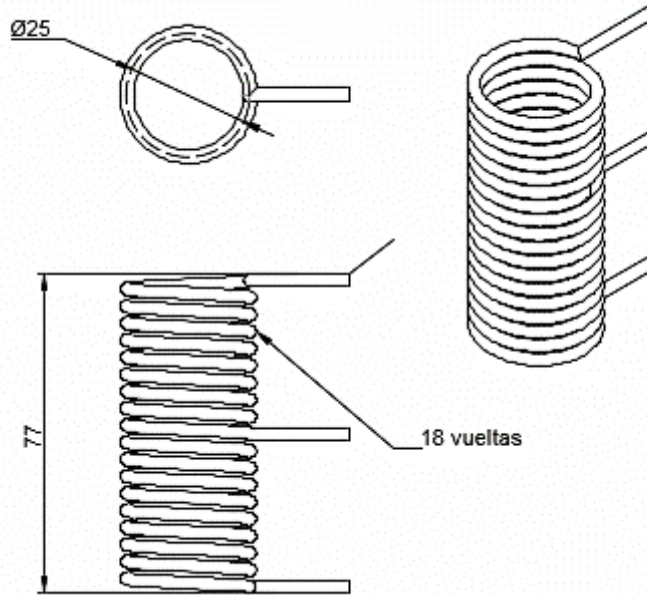


Figura 4.9. Bobina Lp

$$l = 77\text{mm}$$

$$N = 18 \text{ vueltas}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \text{ (permeabilidad magnética del vacío)}$$

$$D = 25\text{mm}$$

Si se sabe que la inductancia está dada por la ecuación 4.11.

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A \tag{4.11}$$

Entonces la inductancia de la bobina Lp será:

$$L = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}\right) \left(\frac{18^2}{77 \times 10^{-3} \text{m}}\right) \left(\frac{\pi(25 \times 10^{-3} \text{m})^2}{4}\right) = 2.10 \mu\text{H}$$

Después de conocer la frecuencia de resonancia del circuito y la inductancia de la bobina de calentamiento, es posible calcular la capacitancia que se requiere para el circuito resonante, con la ecuación 4.9.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.9)$$

Despejando a la capacitancia se tiene que:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L} = \frac{1}{(2\pi(134734))^2 (2.10 \times 10^{-6})} = 0.665 \mu F$$

Para poder resistir las altas corrientes del circuito resonante se utilizarán capacitores de poliéster y uno de los valores más comerciales de estos capacitores es $334nF$ a $660V$, por lo que se requieren 2 capacitores de ese modelo.

Teniendo en cuenta la frecuencia de resonancia, la corriente que se presenta en el circuito y por supuesto la disponibilidad en el mercado, el MOSFET a utilizar es el del modelo IRFP250 ya que posee las características siguientes:

- Corriente máxima de drenaje D: 33A
- Frecuencia máxima de pulsos: 55GHz

Para poder seleccionar el modelo de los diodos es necesario enfocarse en la corriente que pueden aportar y la frecuencia que pueden soportar, para este caso se selecciona el diodo Schottky 1N5819 ya que soporta una corriente máxima de 1A, un voltaje de hasta 21V y soporta una frecuencia de hasta 1MHz

Para poder proteger a los diodos y a los MOSFETS se utilizan las resistencias R1 y R2, ya que los diodos tienen una corriente máxima de 1A al igual que la corriente máxima de salida del regulador, por lo que se busca tener un factor de trabajo para los diodos del 80% por lo que las resistencias se calculan de la siguiente manera:

Se busca tener un voltaje de 12V y corriente de 0.8A.

$$R_1 = R_2 = \frac{V_0}{I_r} = \frac{12}{0.8} = 15\Omega$$

calentamiento en la zona a templar, ingresar los datos del temple como la duración del calentamiento y la duración del enfriamiento para realizar el proceso de temple.

4.2.1. Circuito del sistema de control.

Para poder diseñar y construir el sistema de control de la máquina de temple por inducción se escoge debido al bajo costo y alta disponibilidad en el mercado a la tarjeta programable Arduino, y debido a la cantidad de módulos a ocupar y con ello la cantidad de entradas y salidas requeridas se elige en particular el modelo Arduino MEGA.

En el sistema de control y automatización de esa máquina es necesario cubrir los siguientes aspectos:

- Posicionar a la bobina de calentamiento en la sección de la probeta que se desea templar
- Accionar y desactivar el circuito de calentamiento de manera automática
- Accionar y desactivar el sistema de refrigerante de manera automática
- Controlar los tiempos de los sistemas de calentamiento y enfriamiento

Con estos aspectos a cumplir se procede al diseño del circuito presentado en la figura 4.11:

*Los materiales utilizados en el circuito de la figura 4.11 se pueden consultar en el capítulo 6.

*El circuito presentado en la figura 4.11. no tiene simbología normalizada, ya que se conforma de varios módulos que en su conjunto incluyen varios dispositivos electrónicos y que no poseen con su respectivo símbolo normalizado, pudiéndose observar solamente una representación gráfica de cómo se deben realizar las conexiones en las respectivas terminales de los módulos y la tarjeta controladora.

Como se puede observar en el circuito de la figura 4.11, se incluyen algunos sensores los cuales cumplen las siguientes funciones:

- **Sensor de nivel de líquido**

Se utiliza para que a través de la pantalla indique al usuario si el nivel del refrigerante con el que se cuenta en el depósito es el adecuado o no, y así evitar que el proceso de temple no se lleve a cabo de la manera correcta y que también se dañe la bomba del refrigerante.

- **Termopar tipo K**

Se incluye en el circuito para que informa al usuario un aproximado de la temperatura de la probeta en tiempo real.

- **Interruptor de final de carrera**

Se incluyen dos interruptores de final de carrera en el circuito (uno en la parte superior y otro en la parte inferior), ya que al posicionar la bobina de calentamiento se puede dañar el sistema por el que viaja si se fuerza a este.

4.2.2. Programa del sistema de control.

El sistema de control de la máquina de temple por inducción está controlado por un microprocesador ATMEGA 2560, el cual se programa en lenguaje Arduino.

El programa que se necesita para poder controlar los módulos presentados en la figura 4.11. debe tener los siguientes procesos, teniendo en cuenta que el usuario interactúa a través de una pantalla LCD y un joystick.

1. Mensaje de bienvenida
2. Elegir la posición de la bobina de calentamiento

3. Elegir entre temple y revenido (si se va a calentar y enfriar o calentar y dejar enfriar al aire)
4. Elegir el tiempo de calentamiento de la probeta
5. Elegir el tiempo que se estará aplicando el refrigerante (en el caso que se haya escogido el proceso de temple)
6. Proceder a realizar el proceso de temple o revenido según sea el caso y reportar en tiempo real la temperatura
7. Enviar a la bobina de calentamiento a un extremo de la máquina para poder retirar con facilidad la probeta

Debido a que la temperatura que reporta la maquina es solamente aproximada, se decide controlar con base en el tiempo el calentamiento y el enfriamiento en la probeta.

A continuación, se muestra y se explica el programa con el que se controla la máquina de calentamiento por inducción:

Cabe mencionar que el programa está conformado por varios subprogramas, los cuales realizan funciones específicas que se pueden mandar a llamar en varias ocasiones durante la ejecución del programa.

Todos los valores de las variables serán ingresados o modificados por el módulo joystick a través del subprograma JOYSTICK, el cual tiene valores predeterminados asignados en la sección de variables.

```
//librerías necesarias para programar los módulos//
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include "max6675.h"
```

```
//se declaran las variables a utilizar//
```

```
int X = A1;
int Y = A0;
int K = 22;
int LECTURA;
int NIVEL1;
int ENTRADA;
int a;
int A;
```

```
int CLIK;
boolean N;
int REGRESO = 0;
int B;
int STEP = 2;
int DIR = 3;
int VELOCIDAD = 2000;
int HABILITAR = 25;
int SARRIBA = 26;
int SABAJO = 27;
int UB;
int PCONTA = 0;
int ESTADO_PUL = 0;
int ESTADO_ULT = 1;
int CAL = 0;
int REF = 0;
int VCAL;
int VREF;
int RCAL = 28;
int RREF = 29;
int RVEN = 30;
float TEMP = 0;
int ktcSO = 11;
int ktcCS = 12;
int ktcCLK = 13;
int sensor = A2;
int REP = 0;
```

```
//se enlistan los objetos a programar//
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
```

```
//Se definan que función tendrán las distintas terminales del Arduino y la variable que anterior mente se le asignó//
```

```
void setup(){
  pinMode(X , INPUT);
  pinMode(Y , INPUT);
  pinMode(K , INPUT);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  pinMode (STEP, OUTPUT);
  pinMode (DIR, OUTPUT);
  pinMode (HABILITAR , OUTPUT);
  pinMode (SARRIBA , INPUT);
  pinMode (SABAJO , INPUT);
  pinMode (RCAL , OUTPUT);
```

```

pinMode (RREF , OUTPUT);
pinMode (RVEN , OUTPUT);
pinMode (sensor , INPUT);
}

```

//Función principal, es un bucle que se encarga de llamar al subprograma CONTADOR, el cual asigna una variable numérica dependiendo del número de pulsos que se envíen desde el joystick y este a su vez envía esa variable al subprograma MENU, el cual dependiendo del valor de la variable NIVEL1 ejecuta el caso correspondiente//

```

void loop(){
  NIVEL1 = CONTADOR();
  MENU ();
}

```

```
//-----CASOS-----//
```

//Se presenta un subprograma, el cual dependiendo del valor de la variable NIVEL1 ejecuta otro subprograma//

```

void MENU(){
  switch (NIVEL1){
    case 0:
      MENU_INICIO ();
      break;
    case 1:
      MENU_1 ();
      break;
    case 2:
      MENU_2 ();
      break;
    case 3:
      MENU_3 ();
      break;
  }
}

```

```
//-----MENU INICIO-----//
```

//Este es el primer submenú que se ejecuta, mostrando el mensaje de bienvenida//

```

void MENU_INICIO(){
  if(N){lcd.clear();N = 0;}
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print("BIENVENIDO");
  lcd.setCursor(4,1);
  lcd.print("FESC C-4");
}

```

```
//-----PRIMER MENU-----//
```

//Este subprograma es el segundo caso y ejecuta el subprograma MOTOR al asignar el valor de 3 o 4 a la variable UB designada por el subprograma SOYSTICK, son esto se ubica a la bobina de calentamiento en la posición requerida//

```
void MENU_1(){
  if(N){lcd.clear();N = 0;}
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("POSICION");
  UB = JOYSTICK();
  while (UB == 3 or UB == 4){
    MOTOR();
  }
}
```

//-----SEGUNDO MENU-----//

//Este subprograma es el tercer caso, y si a la variable SWITCH se le asigna el valor de 1 se ejecuta el subprograma SUBMENUS, el cual realiza el proceso de temple//

```
void MENU_2(){
  if(SWITCH() == 0){
    if(N){lcd.clear();N = 0;}
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("TEMPLE");
  }
  if(SWITCH() > 0){
    SUBMENUS();
  }
}
```

//-----TERCER MENU-----//

//Este subprograma es el cuarto caso, y si a la variable SWITCHR se le asigna el valor 1 se ejecuta el subprograma SUBMENUSR, el cual realiza el proceso de temple//

```
void MENU_3(){
  if(SWITCHR() == 0){
    if(N){lcd.clear();N = 0;}
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("REVENIDO");
  }
  if (SWITCHR() > 0){
    SUBMENUSR();
  }
}
```

//-----SUBMENUS TEMPLE-----//

//Este submenú ejecuta un proceso consecutivo en el que al iniciar su ejecución inmediatamente ejecuta el subprograma CALENTAMIENTO después REFRIGERANTE, ya que para poder salir de cada uno de subprogramas anteriores se debe de sumar 1 a la variable SWITCH y por último se ejecuta TEMPLE, el cual culmina cuando se ejecuta el subprograma HOME//

```
void SUBMENU() {  
  if(SWITCH() == 0){if(N){lcd.clear();N = 0;}}
```

```
  if(SWITCH() == 1){CALENTAMIENTO();}
```

```
  if(SWITCH() == 2){REFRIGERANTE();}
```

```
  if(SWITCH() == 3){TEMPLE();}  
}
```

```
//-----SUBMENU REVENIDO-----//
```

//Como en el submenú anterior, este también se ejecuta de manera consecutiva y de manera similar solo que se elimina el llamado al subprograma REFRIGERANTE, ya que este no se requiere//

```
void SUBMENU() {  
  if(SWITCH() == 0){if(N){lcd.clear();N = 0;}}
```

```
  if(SWITCH() == 1){CALENTAMIENTO();}
```

```
  if(SWITCH() == 2){REVENIDO();}
```

```
}
```

```
//-----SELECCION TIEMPO CALENTAMIENTO-----//
```

//Este subprograma ayuda a incrementar el valor de la variable CAL de uno en uno cada 0.5s mientras el valor de JOYSTICK valga 4, de lo contrario si esa variable vale 3, la variable CAL decrementa su valor de uno en uno cada 0.5s, el valor de esta variable se muestra en el display de la máquina//

```
int CALENTAMIENTO() {  
  if(N){lcd.clear();N = 0;}  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("T. CALENTAMIENTO");  
  while (JOYSTICK() == 4){  
    CAL ++;  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0,1);  
    lcd.print(CAL);  
    lcd.setCursor(3,1);  
    lcd.print("s");  
    delay(500);
```

```

    }
    while (JOYSTICK() == 3){
    CAL --;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(CAL);
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("s");
    delay(500);
    }
}

```

//-----SELECCION TIEMPO REFRIGERANTE-----//

//Este subprograma funciona de manera similar al subprograma CALENTAMIENTO, pero ahora el valor se almacena en la variable REF//

```

int REFRIGERANTE(){
    if(N){lcd.clear();N = 0;}
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("T. REFRIGERANTE");
    while (JOYSTICK() == 4){
    REF ++;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(REF);
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("s");
    delay(500);
    }
    while (JOYSTICK() == 3){
    REF --;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(REF);
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("s");
    delay(500);
    }
}

```

//-----EJECUCION DEL TEMPLE-----//

//El subprograma TEMPLE se ejecuta después de que el usuario lije el valor del tiempo de calentamiento y de refrigeración//

//En esta sección se ejecuta un ciclo, en el cual se mantienen encendidos los relevadores asignados a las variables RCAL y RVEN, aparte de estar limpiando la pantalla cada segundo y actualizar los datos del

subprograma SENSORES, este ciclo se repite el valor de las unidades de la variable CAL, con una duración de un segundo cada ciclo, por lo que cada unidad de la variable CAL, es el equivalente a un segundo de calentamiento//

```
int TEMPLE(){
  if(N){lcd.clear();N = 0;}
  while(REP <= CAL){
    digitalWrite(RCAL , HIGH);
    digitalWrite(RVEN , HIGH);
    SENSORES();
    delay(1000);
    REP ++;
  }
```

//Apaga los relevadores encendidos en el ciclo anterior y reasigna el valor 0 a la variable REP//

```
digitalWrite(RCAL , LOW);
digitalWrite(RVEN , LOW);
REP = 0;
```

//Este ciclo se ejecuta de la misma manera que el ciclo anterior solo que con la variable REF y activando el relevador asignado a la variable RREF, para activar el ciclo de enfriamiento//

```
while(REP <= REF){
  digitalWrite(RREF , HIGH);
  SENSORES();
  delay(1000);
  REP ++;
}
```

//Apaga al relevador accionado en el ciclo anterior y ejecuta el subprograma HOME//

```
digitalWrite(RREF , LOW);
HOME();
PCONTA = 0;
```

//Cuando la variable N es diferente de 0, se limpia la pantalla de la máquina//

```
  N = 1;
  REP = 0;
}
```

//-----EJECUCION DEL REVENIDO-----//

//Este subprograma se ejecuta de manera similar al de la ejecución del temple solo que se omite el paso del enfriamiento//

```
int REVENIDO(){
  if(N){lcd.clear();N = 0;}
  while(REP <= CAL){
    SENSORES();
    digitalWrite(RCAL , HIGH);
    digitalWrite(RVEN , HIGH);
    delay(1000);
    REP ++;
  }
  digitalWrite(RCAL , LOW);
  digitalWrite(RVEN , LOW);
  HOME();
  PCONTA = 0;
  N = 1;
  REP = 0;
}
```

//-----CONTADOR DE JOYSTICK-----//

//En este subprograma se ejecuta un contador, el cual dependiendo del número y la dirección de pulsaciones que se ingrese a través del joystick, se suma o resta el valor de la variable B, la cual condiciona el caso que se ejecuta en el subprograma MENU//

```
int CONTADOR(){
  A = JOYSTICK();
  switch(A){
    case 1:
      B++;
      N = 1;
      break;
    case 2:
      B--;
      N = 1;
      break;
  }
  if (B == 4){B = 0;}
  if (B == -1){B = 3;}
  LECTURA = 0;
  delay(500);
  return B;
}
```

//-----REPORTE SENSORES-----//

//Este subprograma reporta los valores capturados por el termopar tipo K y el sensor de nivel de líquido, el cual se ejecuta durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento en los procesos de temple y revenido, los valores de los sensores se actualizan cada 0.5s//

```
void SENSORES(){
```

```
//Reporta el valor de la temperatura//
```

```
TEMP = ktc.readCelsius();
```

```
lcd.clear();
```

```
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("Temp: ");
```

```
lcd.setCursor(6, 0);
```

```
lcd.print(TEMP);
```

```
lcd.setCursor(13, 0);
```

```
lcd.print("C");
```

```
lcd.setCursor(0, 1);
```

```
//Reporta el estado del refrigerante//
```

```
lcd.print("Ref: ");
```

```
if (analogRead(sensor) <= 250){
```

```
lcd.setCursor(5, 1);
```

```
lcd.print("Vacio");
```

```
}
```

```
else if (analogRead(sensor) >= 251){
```

```
lcd.setCursor(5, 1);
```

```
lcd.print("Lleno");
```

```
}
```

```
delay(500);
```

```
}
```

```
//-----LECTURA DE JOYSTICK-----//
```

//Debido a que el módulo joystick reporta a la entrada valores analógicos, es necesario estandarizar su valor para tener una repuesta más estable, por lo que a los rangos de valores de cada dirección de la palanca se le asignó un valor, para controlar el botón push del módulo joystick se optó por un contador para poder mantener su valor, de lo contrario regresaría al estado bajo (0) justo al soltar el botón//

```
int JOYSTICK(){
```

```
//-----DERECHA-----//
```

```
if (analogRead(X) > 900){
```

```
LECTURA = 1;
```

```
}
```

```
//-----IZQUIERDA-----//
```

```
else if (analogRead(X) < 100){
```

```
LECTURA = 2;
```

```
}
```

```
//-----ARIBA-----//
```

```
if (analogRead(Y) < 100){
```

```

    LECTURA = 3;
}
//-----ABAJO-----//
else if (analogRead(Y) > 900 ){
    LECTURA = 4;
}
return LECTURA;
}

```

//Los subprogramas SWITCH y SWITCHR controlan el valor de a variable PCAONTA la cual selecciona los submenús TEMPLE o REVENIDO, estos dos subprogramas realizan el mismo trabajo, solo que es necesario nombrarlos de diferente manera, ya que se deberán de ejecutar en el mismo nivel de menús, siendo llamados a la misma ves en diferentes subprogramas, por lo que produce un error//

```
//CONTROLA EL PULSADOR TEMPLE//
```

```

int SWITCH(){
    ESTADO_PUL = digitalRead(K);

    if (!ESTADO_PUL == ESTADO_ULT){

        if(ESTADO_PUL == HIGH){
            PCONTA++;
            N = 1;
        }
        if(PCONTA == 4){PCONTA = 0;}
    }
    ESTADO_ULT = ESTADO_PUL;
    delay(200);
    return PCONTA;
}
//CONTROLA EL PULSADOR REVENIDO//

```

```

int SWITCHR(){
    ESTADO_PUL = digitalRead(K);

    if (!ESTADO_PUL == ESTADO_ULT){

        if(ESTADO_PUL == HIGH){
            PCONTA++;
            N = 1;
        }
        if(PCONTA == 3){PCONTA = 0;}
    }
    ESTADO_ULT = ESTADO_PUL;
    delay(200);
    return PCONTA;
}

```

```

//-----PROGRAMAS CONTROLADORES DEL MOTOR-----//

//-----CONTROLA LA POSICION-----//

//En este subprograma se ejecuta un paso pequeño del motor (5mm de avance lineal) por cada vez que
se repite el ciclo, el avance será en la dirección dependiendo del valor de la variable UB y limitando el
recorrido por el estado de los switch de limite SABAJO o SARRIBA, este subprograma es llamado a
ejecutarse en el subprograma MENU_1//

void MOTOR()
{
  HABILITAR = LOW;
  UB = JOYSTICK();

//-----ABAJO-----//

  while (UB == 4 && digitalRead(SABAJO) == HIGH){
    digitalWrite(DIR, HIGH);
    for(int i = 0; i < 100; i++){
      digitalWrite (STEP, HIGH);
      digitalWrite (STEP, LOW);
      delayMicroseconds(VELOCIDAD);
    }
    if(N){lcd.clear();N = 0;}
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("SUBIENDO");
    UB = JOYSTICK();
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(HABILITAR , HIGH);

//-----ARRIBA-----//

  while(UB == 3 && digitalRead(SARRIBA) == HIGH){
    digitalWrite(DIR, LOW);
    for(int i = 0; i < 100; i++){
      digitalWrite (STEP, HIGH);
      digitalWrite (STEP, LOW);
      delayMicroseconds(VELOCIDAD);
    }
    if(N){lcd.clear();N = 0;}
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" BAJANDO");
    UB = JOYSTICK();
    delay(1000);
  }
}

```

```

}
digitalWrite(HABILITAR , HIGH);
}
//-----HOME-----//
//Este subprograma es ejecutado después de terminar el proceso de temple o revenido, y manda a la
bobina de calentamiento al extremo inferior para poder retirar con facilidad a la probeta, este programa
hace girar al motor hasta que active el estado alto (1) del switch SARRIBA//

void HOME(){
  HABILITAR = LOW;
  while (digitalRead(SARRIBA) == HIGH){
    digitalWrite(DIR, LOW);
    for(int i = 0; i < 50; i++){
      digitalWrite (STEP, HIGH);
      digitalWrite (STEP, LOW);
      delayMicroseconds(VELOCIDAD);
    }
  }
  digitalWrite(HABILITAR , HIGH);
}

```

El código de programación de la máquina de temple por inducción contiene varios subprogramas que se ejecutan dependiendo del número de veces y la dirección que se pule la palanca del joystick, todo el código es un ciclo, que se encuentra delimitado por el contador de pulsos de la palanca, ya que, si este supera el valor de 4, se regresa al valor 0.

El principal problema a resolver es la sincronización de los valores que se guardan para condicionar la ejecución de los distintos subprogramas, ya que todo el programa es controlado solamente por 3 botones.

4.3. RESUMEN.

La parte medular de la máquina de temple por inducción de alta frecuencia son los cálculos y todo el sustento que esto conlleva, ya que de esto depende el correcto funcionamiento, la parte crítica y esencial para este proyecto obviamente es el diseño y construcción del circuito inversor resonante, para que pueda llevar a cabo el calentamiento de la probeta, debido a eso se presenta un extenso cálculo detallado de cómo se diseña.

De igual manera se presenta la manera en que se diseña y programa la parte de control de la máquina, ya que de esto depende el aprovechamiento de este proceso de temple, como la penetración del temple.

La parte estructural de la maquina no se toma en cuenta para realizar un cálculo estricto, ya que no es una parte critica, por eso, se opta solo por diseñar conforme a dimensiones requeridas por el sistema de control, enfriamiento y calentamiento, las interferencias entre elementos y la disponibilidad de los materiales en el mercado.

CAPÍTULO 5

DIBUJOS DE DETALLE DE LA MÁQUINA

En este capítulo se muestran los dibujos de detalle y de conjunto necesarios para poder construir la maquina en su totalidad. Después de realizar la memoria de cálculo y dimensionar las piezas más importantes del ensamble se procedió a modelarlos.

Para poder facilitar en ensamblado y la interpretación de planos se decidió partir de cinco subensambles principales, los cuales se enlistan a continuación:

1. Estructura montada
2. Sistema de refrigerante
3. Protección
4. Circuito inversor
5. Sistema de control

En los dibujos de conjunto se puede observar las listas de los componentes requeridos, sin embargo, se pueden consultar también la lista concentrada de materiales en el capítulo 6.

5.1. MÁQUINA DE TEMPLE POR INDUCCIÓN.

En el dibujo de conjunto de la figura 5.1 se muestran los principales subensambles que conforman toda la máquina, es pertinente mencionar que las posiciones de algunos elementos como las conexiones de la bobina LP deben de ser definidas por quién ensambla la máquina, ya que presentan trayectorias muy irregulares, aparte de tener que evitar obstrucciones con otros subensambles como el de la estructura montada, en especial con el tornillo sin fin, una sugerencia se muestra en la figura 5.2.

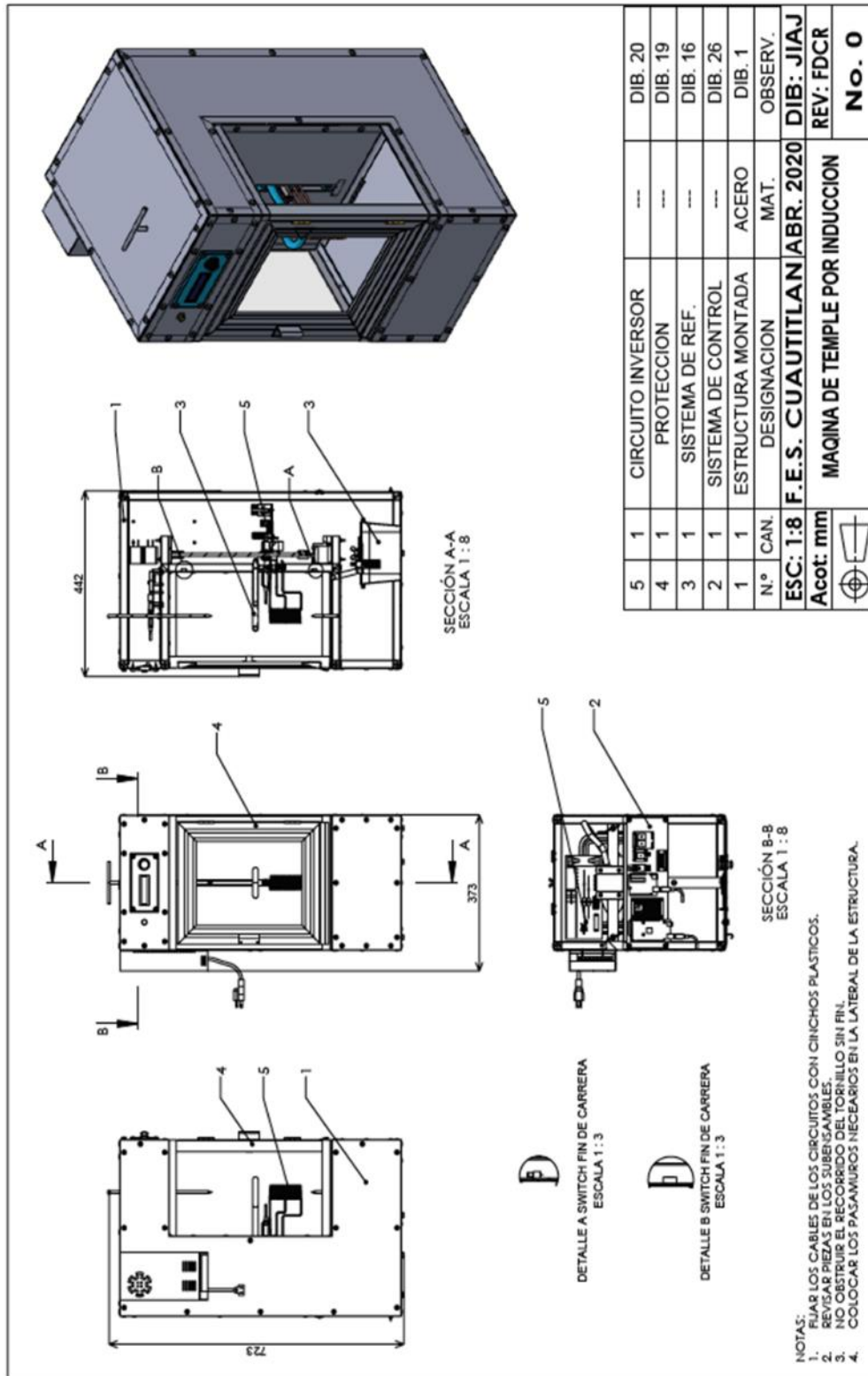


Figura 5.1. Máquina de temple por inducción

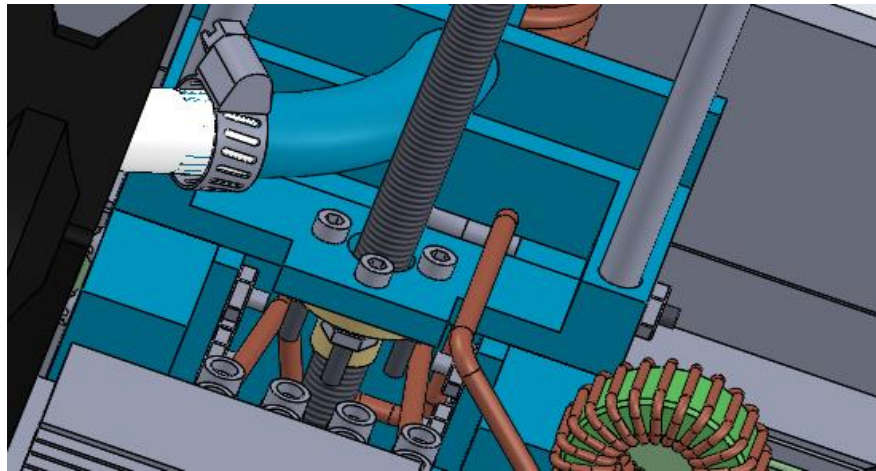
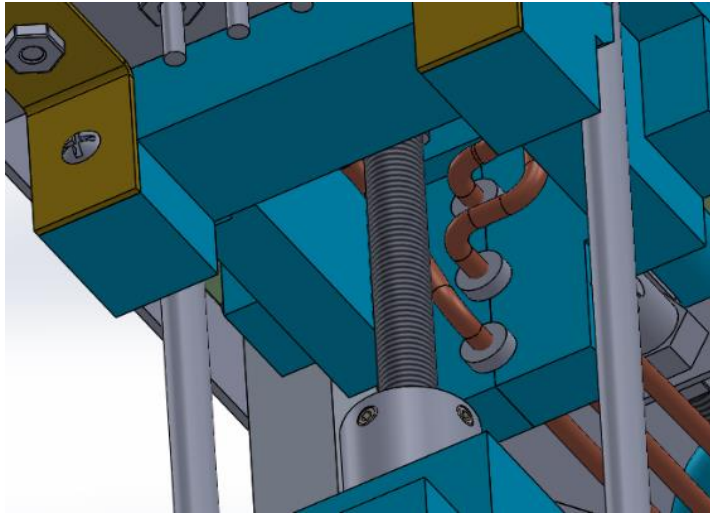


Figura 5.2. Detalles de las conexiones de la bobina LP

5.2. ESTRUCTURA MONTADA.

En este subensamble se muestra la parte que comprende al cuadro conformado por tubular de metal y chapas metálicas como cubierta, cabe mencionar que esta última se seleccionó por la facilidad de su disposición en el mercado, ya que es utilizada en la herrería general para la fabricación de portones.

Una de las principales características de la estructura es el recibe que debe de presentarse en la chapa metálica central para que el refrigerante circule mejor, así como que en esa sección central de la maquina debe de estar fabricada en una sola pieza doblada para evitar fugas. De igual manera para evitar fugas, se sugiere aplicar un poco de silicón automotriz en la periferia del barreno que atraviesa el prisionero inferior, dichos detalles se muestran en la figura 5.3.

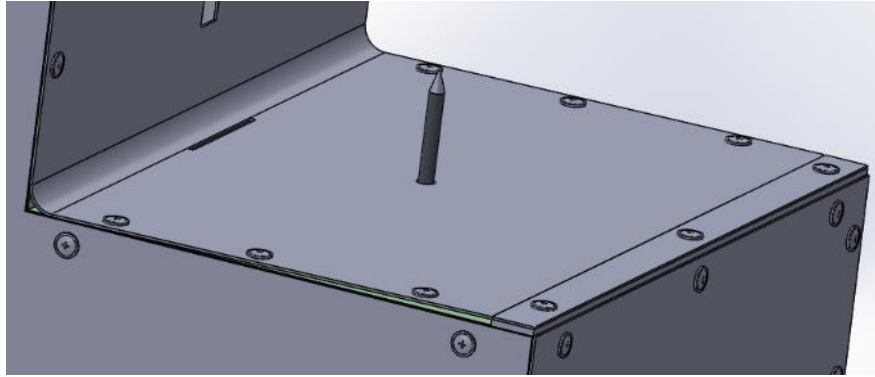


Figura 5.3. Detalles de chapa metálica central.

En la soportería interior es necesario mencionar que en el subensamble soporte motor se debe tener un especial cuidado, ya que el circuito inversor y más componentes viajarán a través de las barras guía.

El acabado final de las chapas metálicas es color gris, y en la placa inferior se deben aplicar al menos tres capas de pintura en ambos lados, para prevenir la corrosión.

En las figuras 5.4 a la 5.18 se muestra el dibujo de conjunto del subensamble de la estructura montada y los dibujos de detalle que lo conforman.

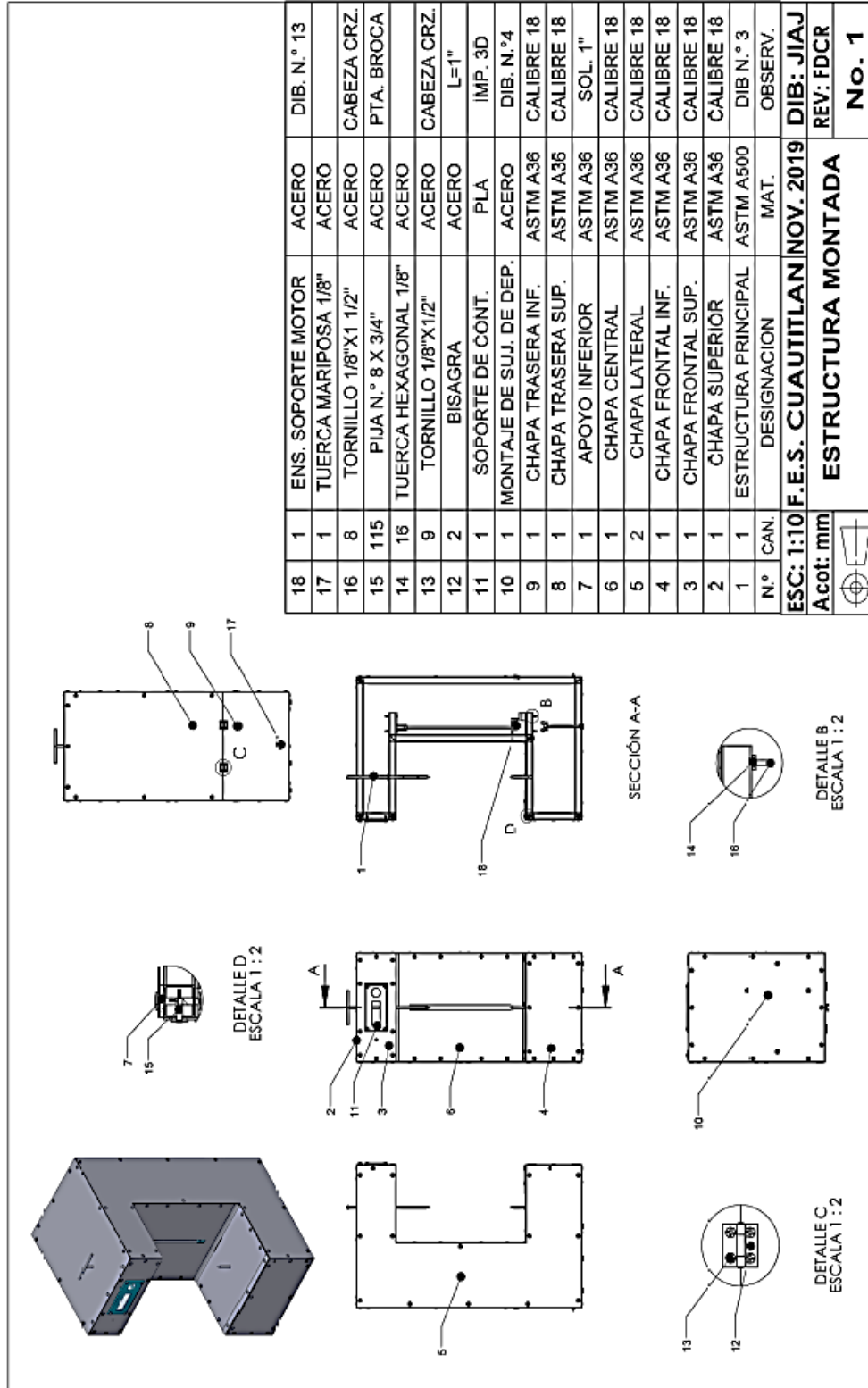


Figura 5.4. Estructura montada

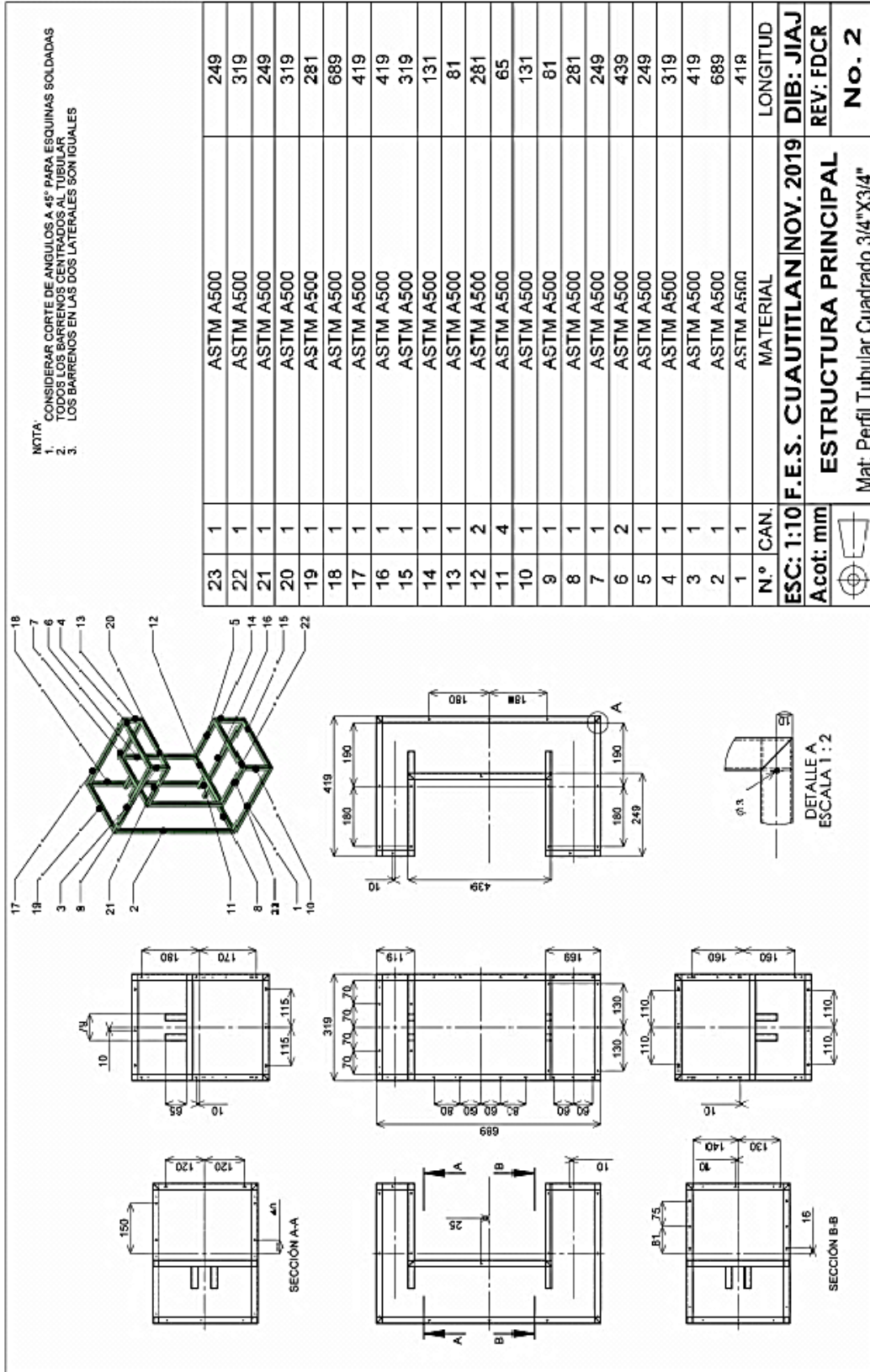


Figura 5.5. Estructura principal

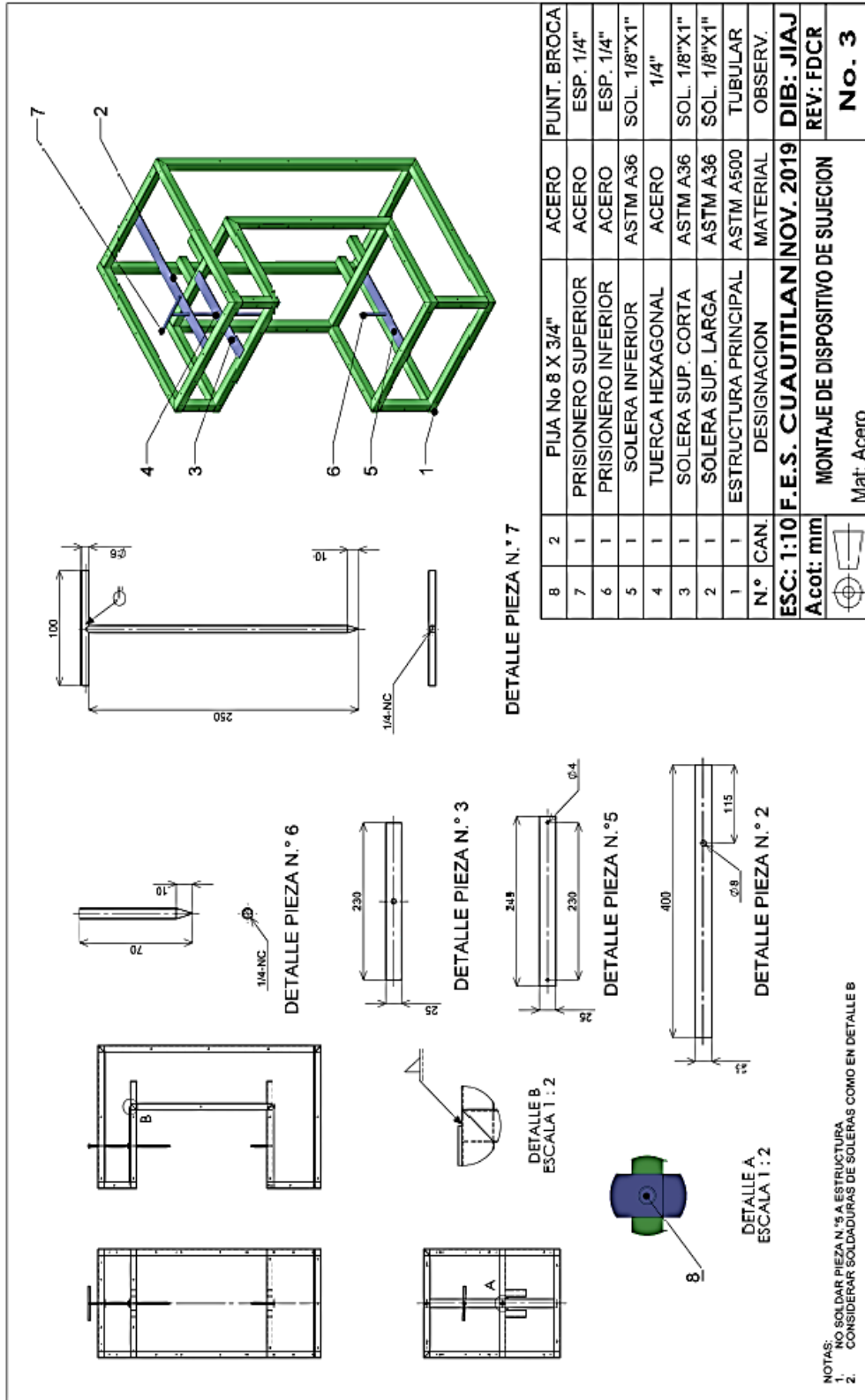


Figura 5.6. Montaje de dispositivo de sujeción

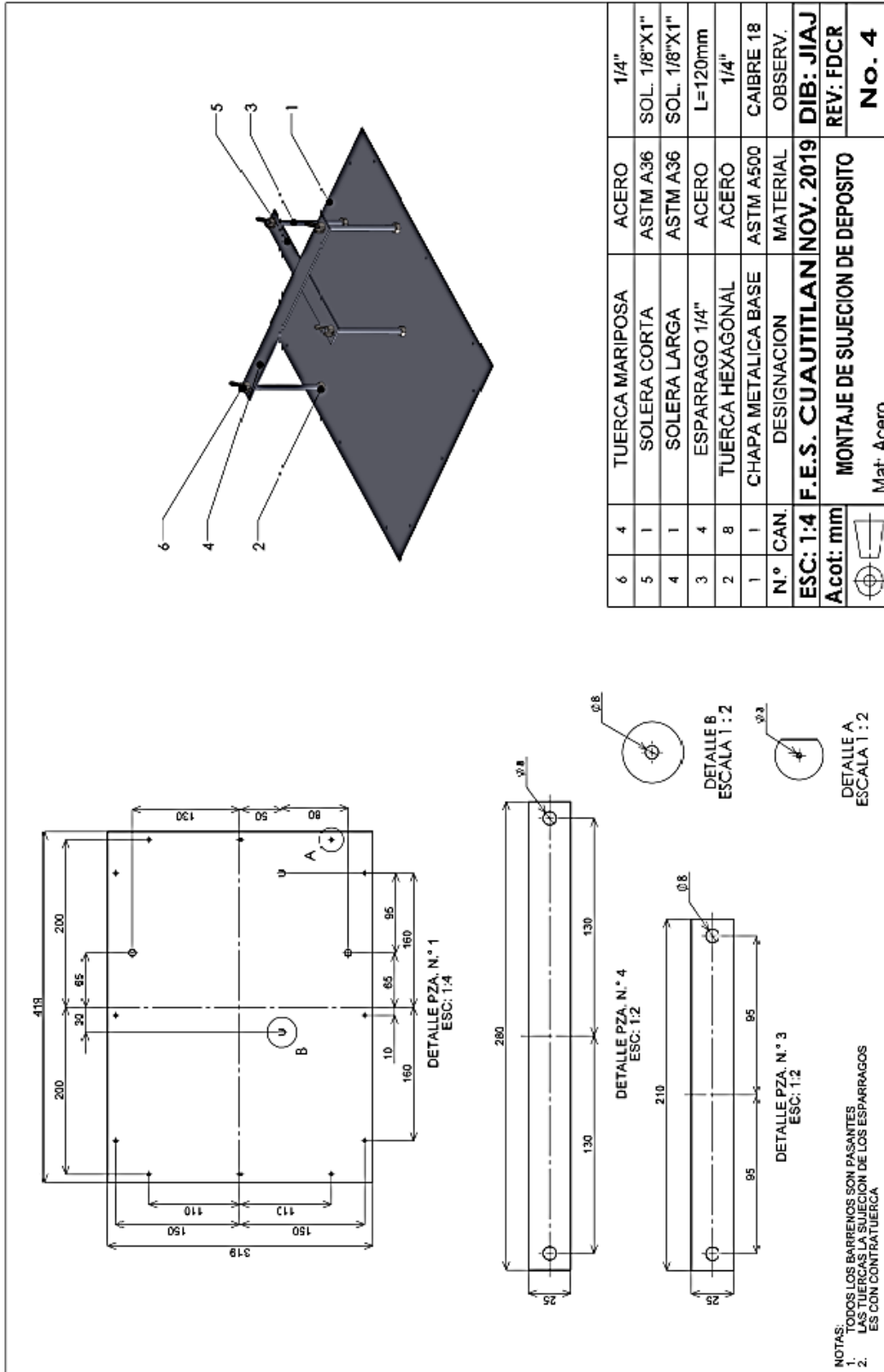


Figura 5.7. Montaje de sujeción de deposito

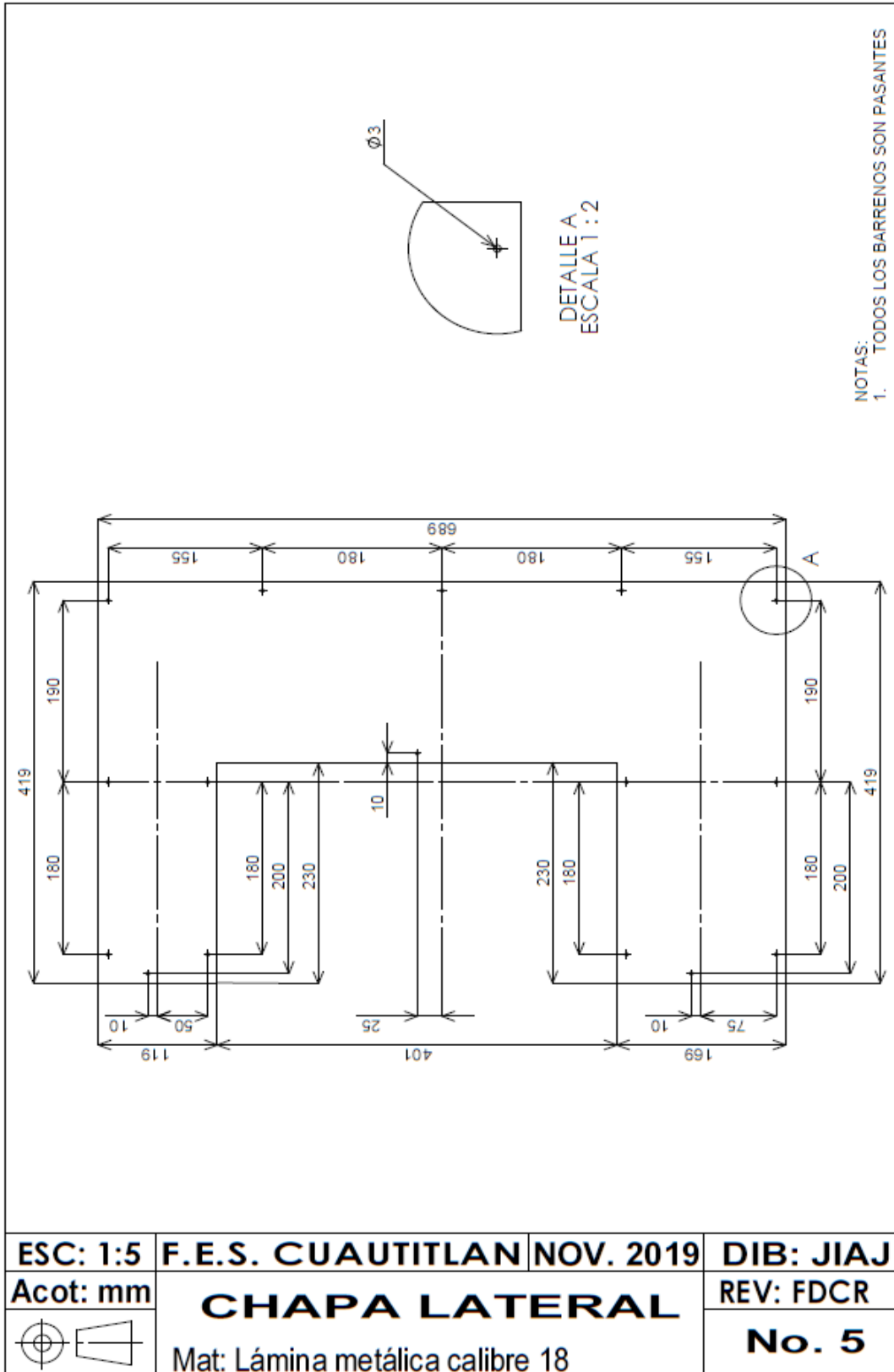
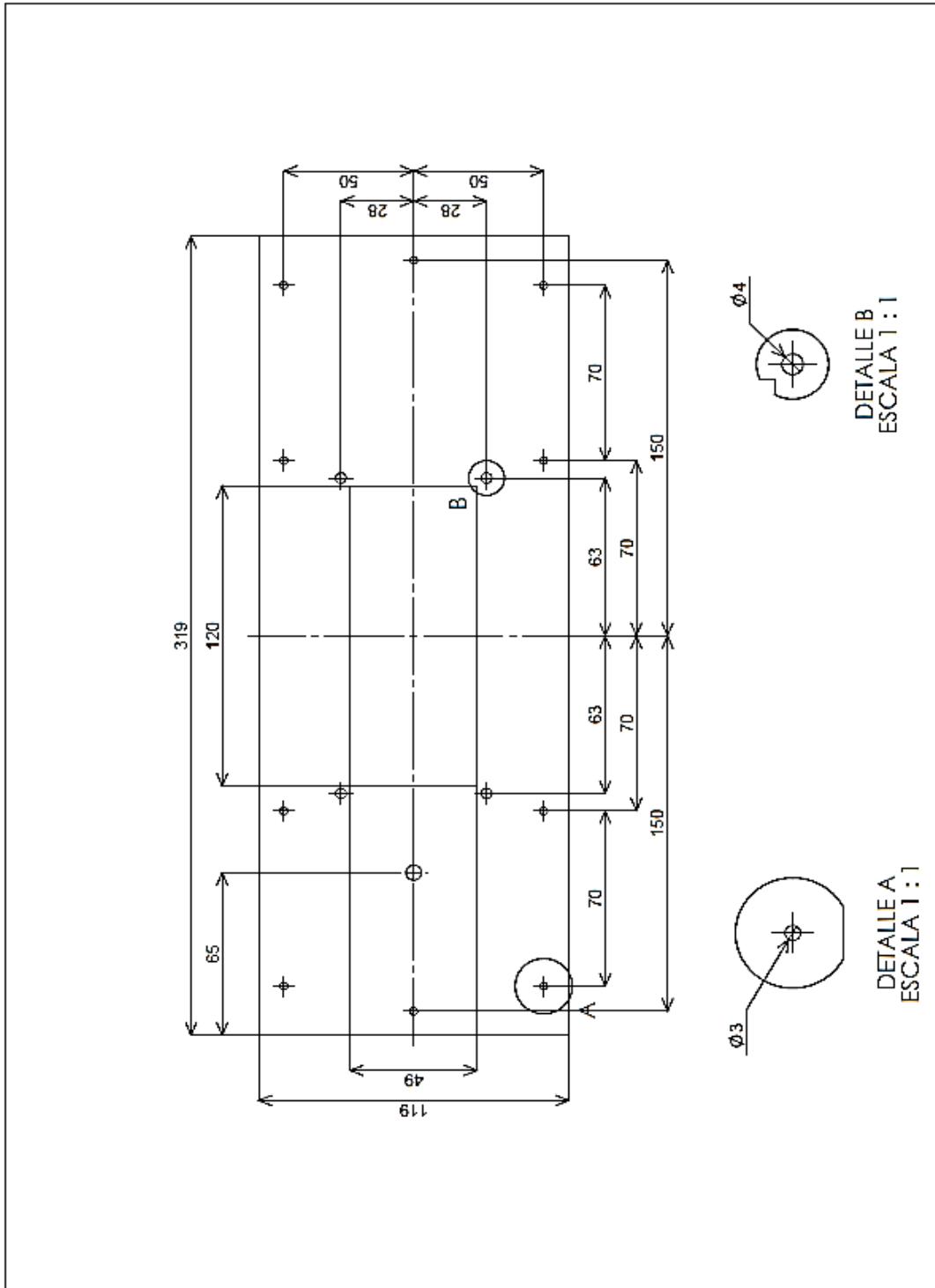


Figura 5.8. Chapa lateral



ESC: 1:2	F.E.S. CUAUTILAN	NOV. 2019	DIB: JIAJ
Acot: mm	CHAPA FRONTAL SUPERIOR		REV: FDCR
	Mat: Lámina metálica calibre 18		No. 6

Figura 5.9. Chapa frontal superior

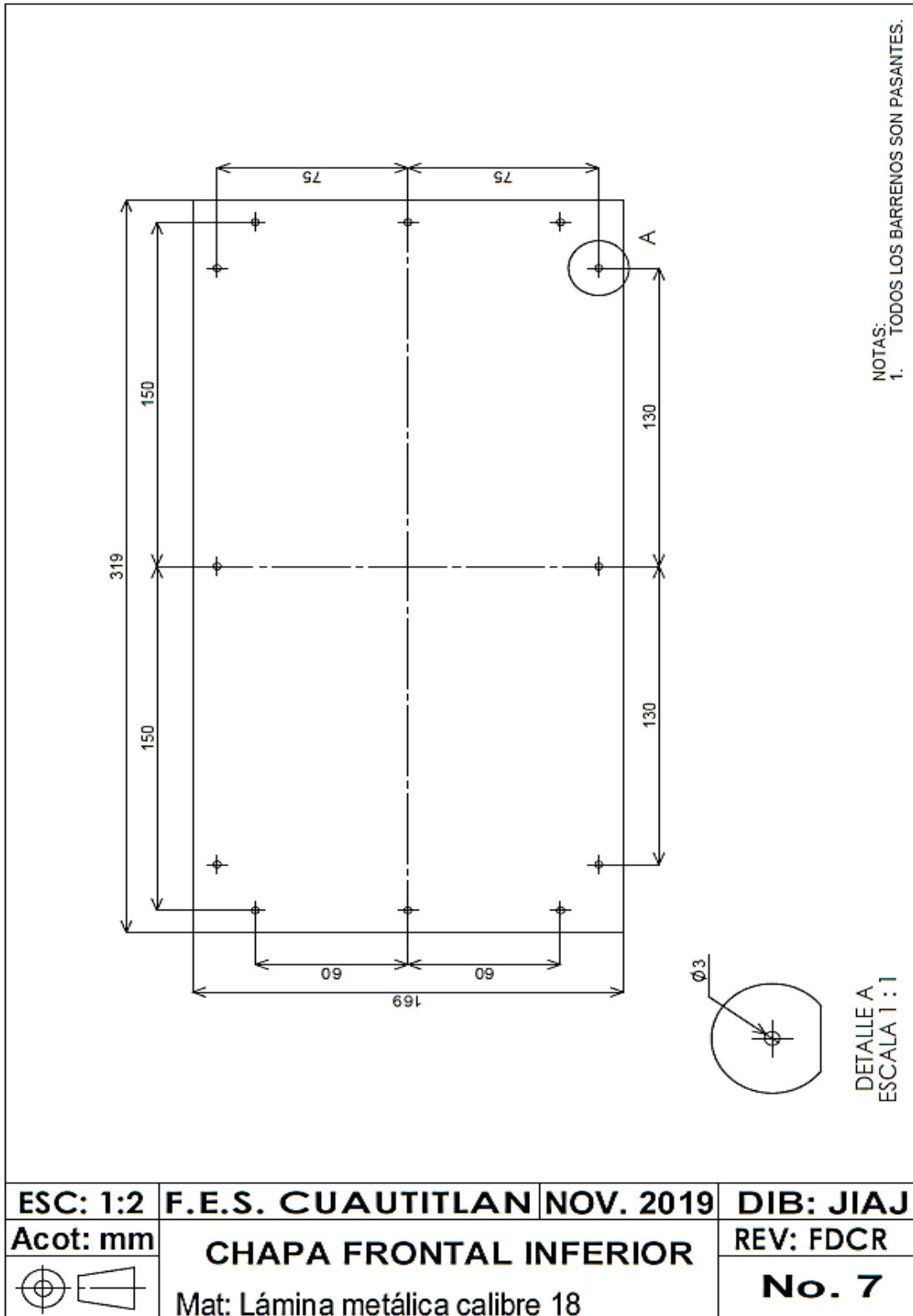


Figura 5.10. Chapa frontal inferior

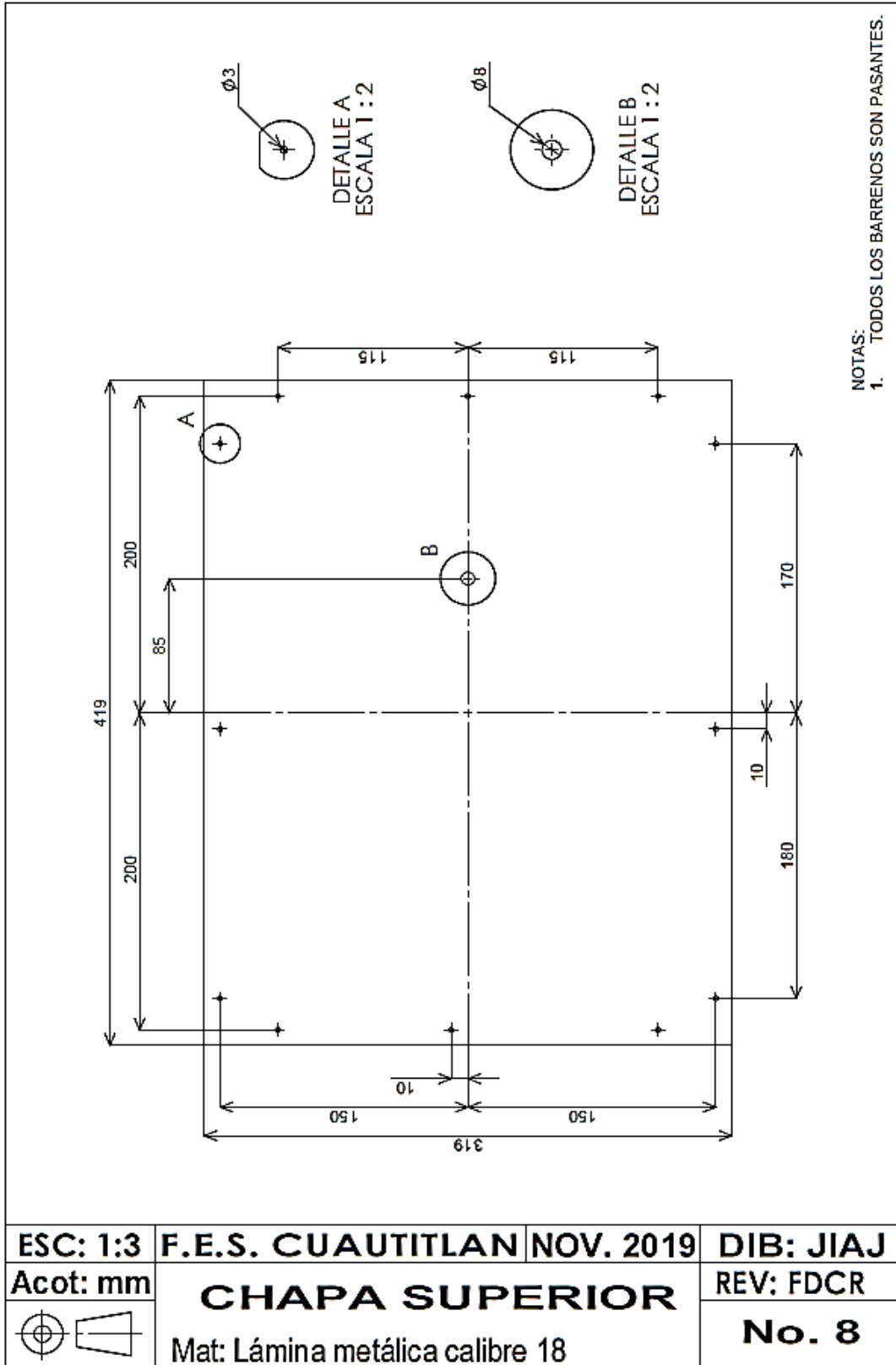


Figura 5.11. Chapa superior

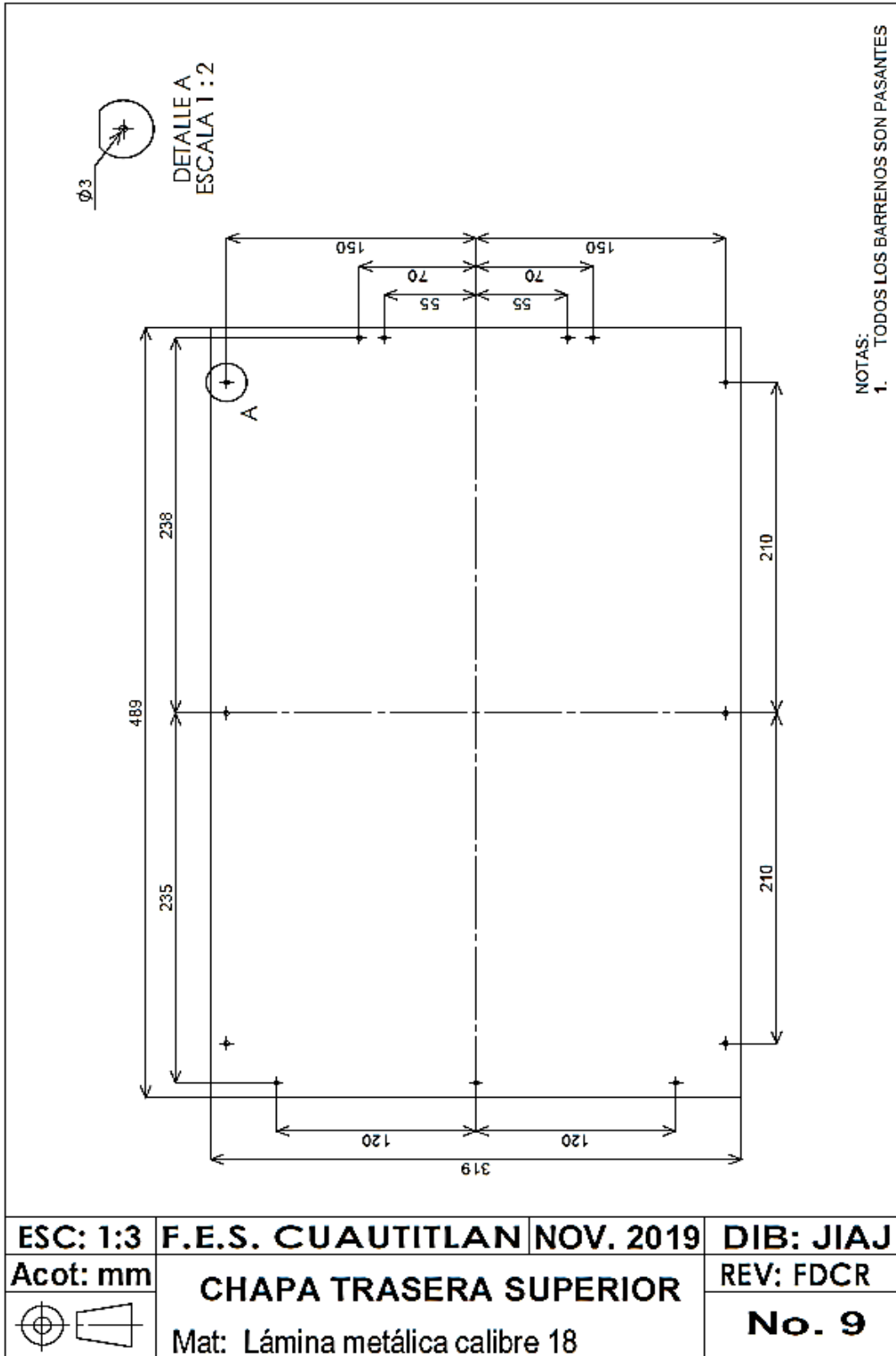


Figura 5.12. Chapa trasera superior

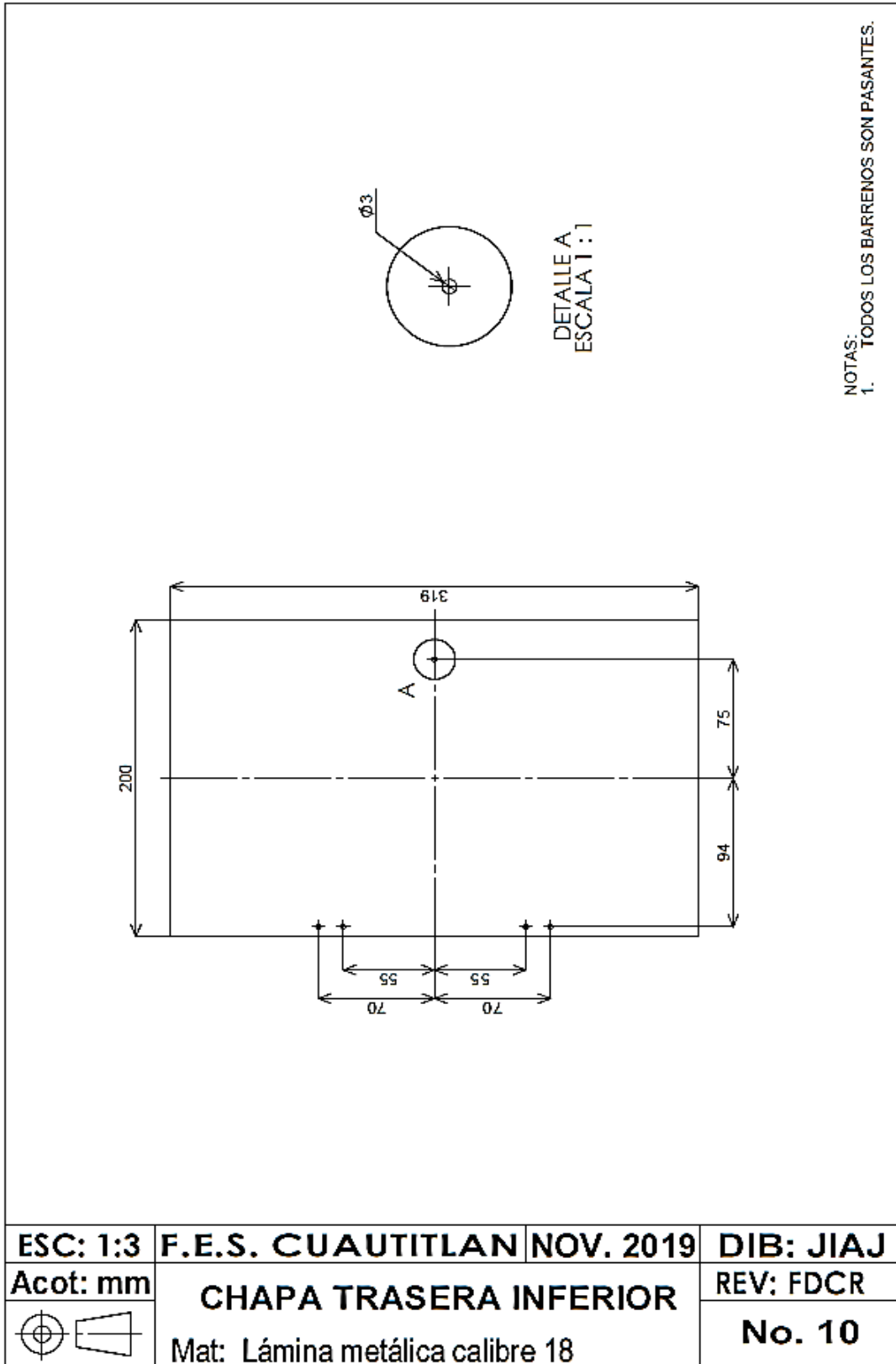


Figura 5.13. Chapa trasera inferior

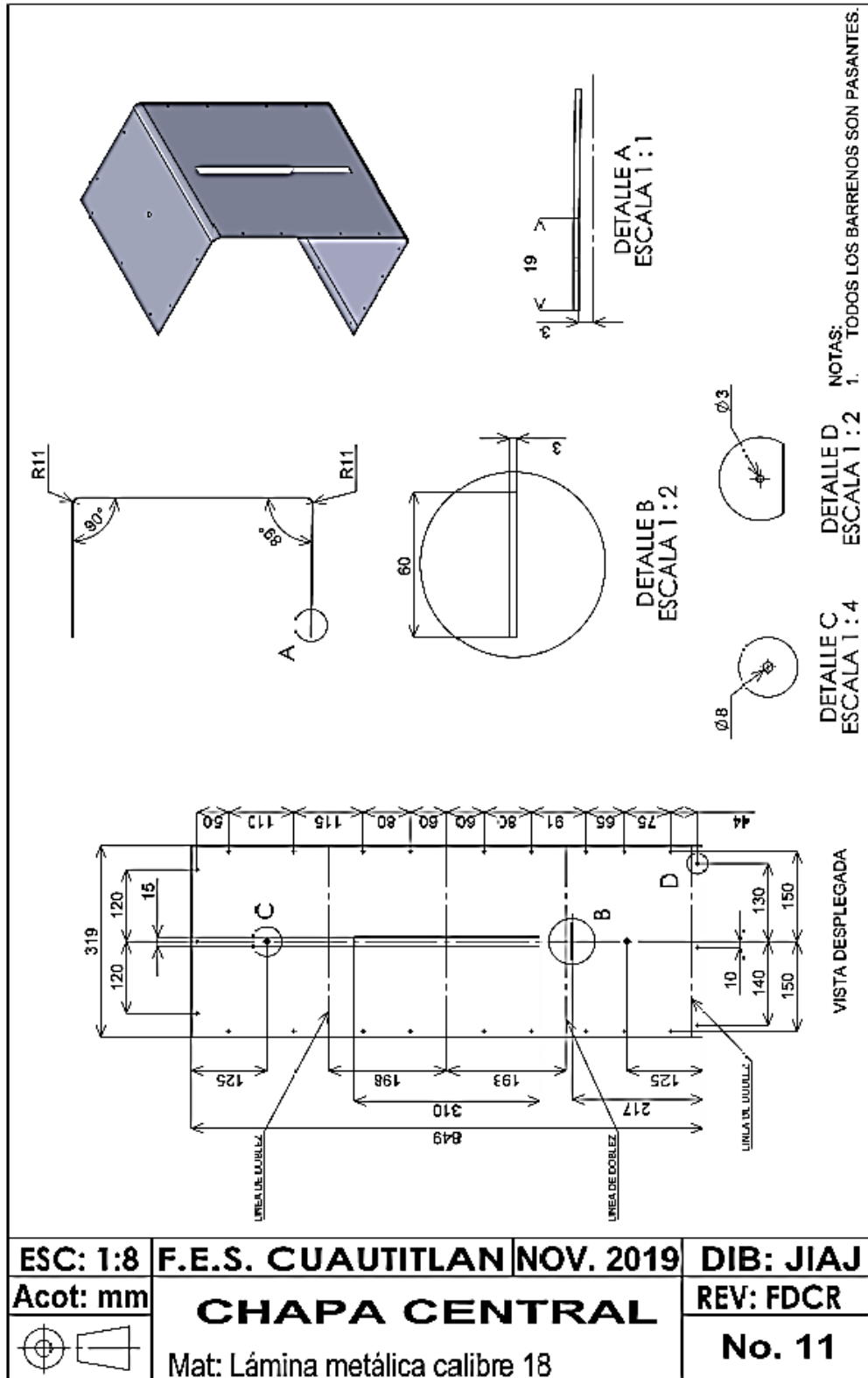


Figura 5.14. Chapa central

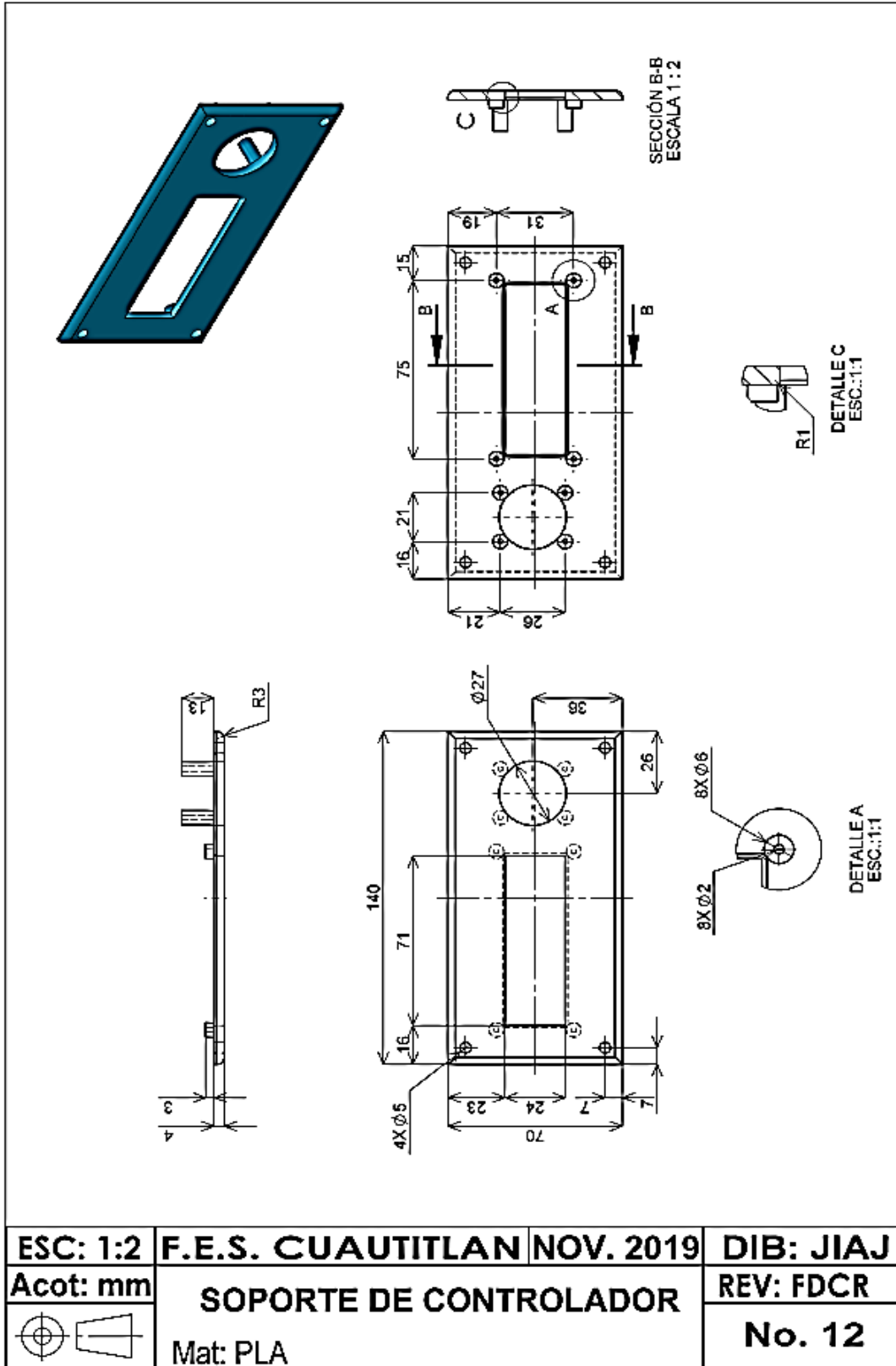


Figura 5.15. Soporte de controlador

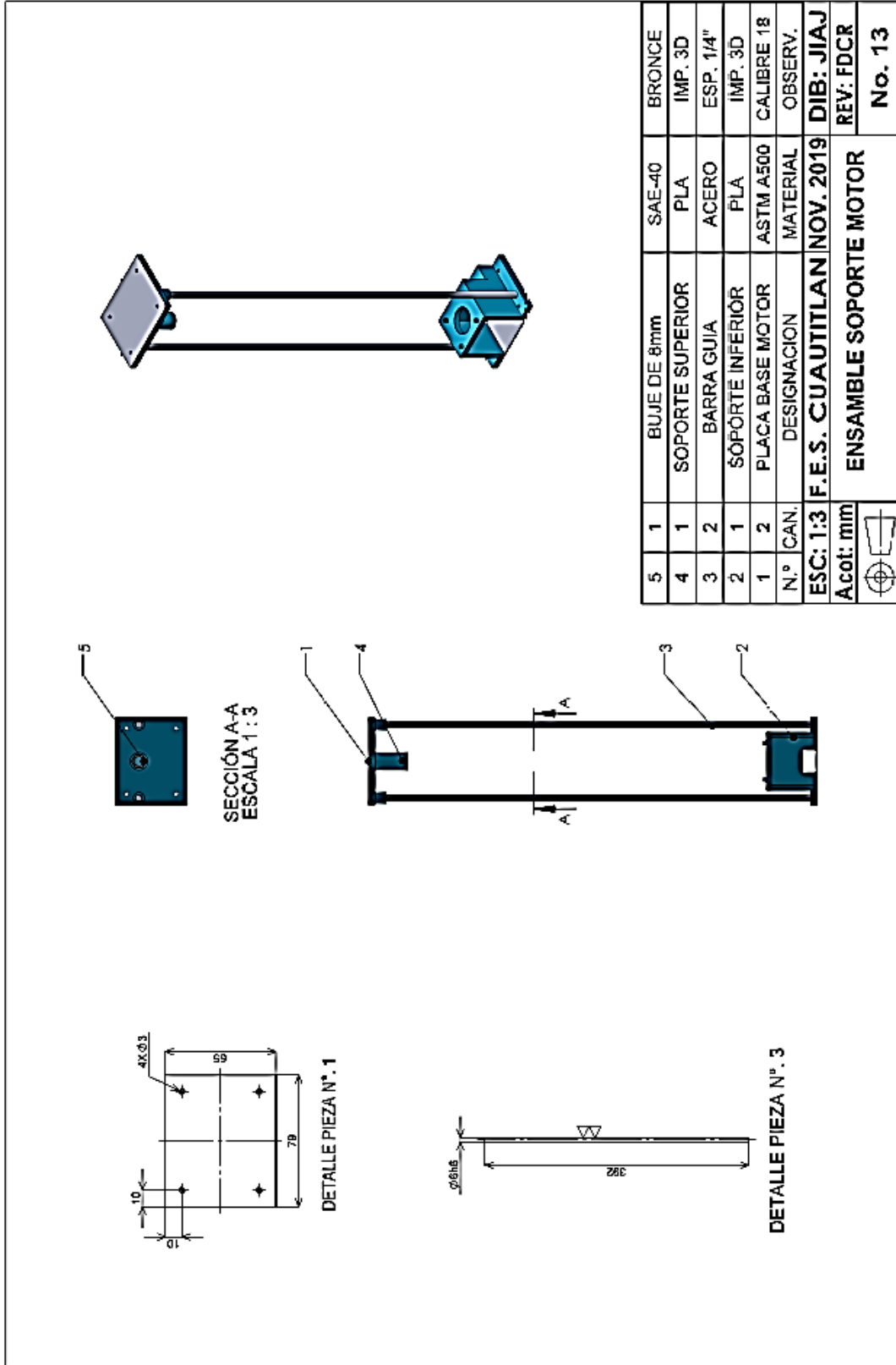


Figura 5.16. Ensamble soporte motor

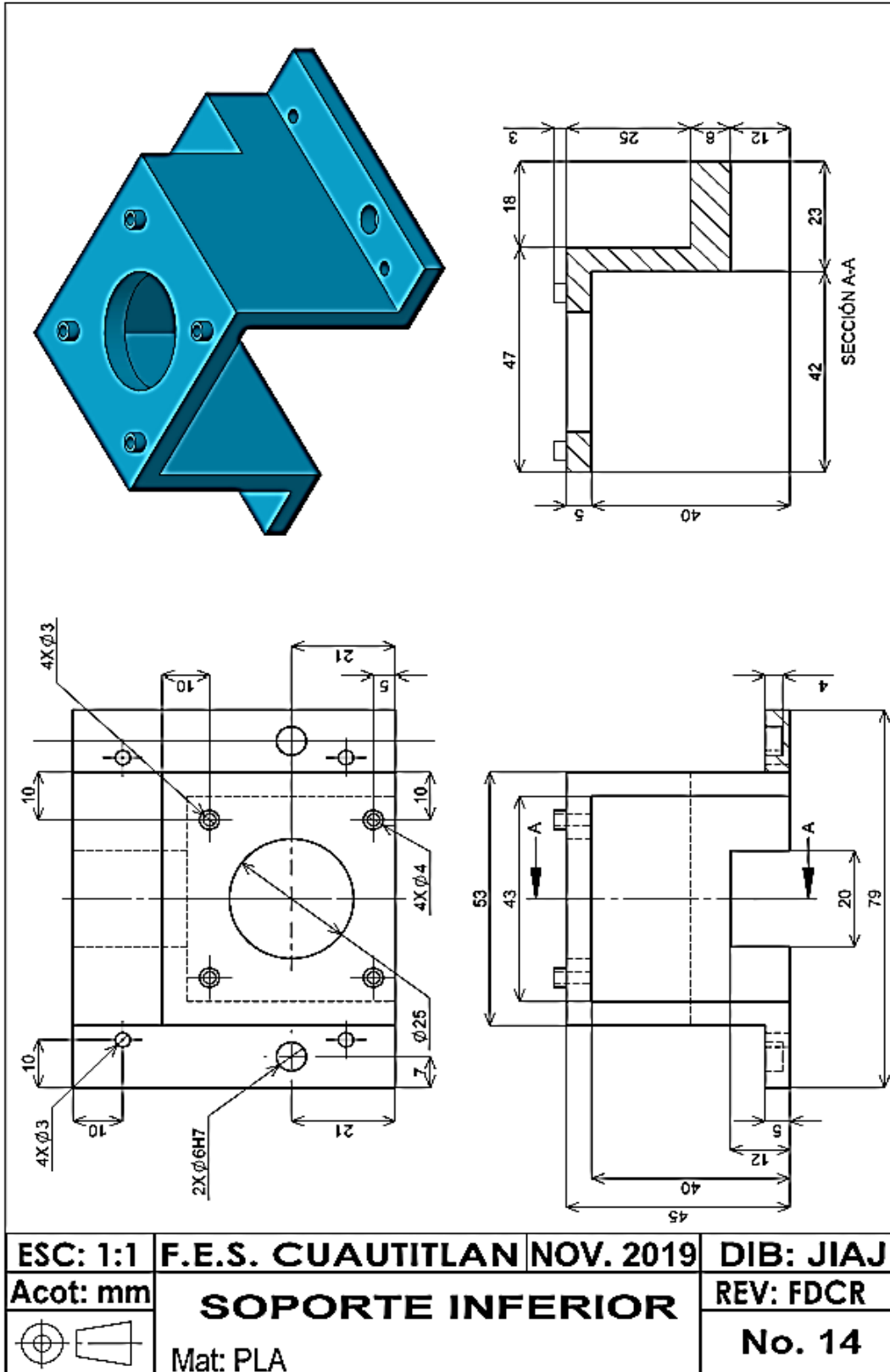


Figura 5.17. Soporte inferior

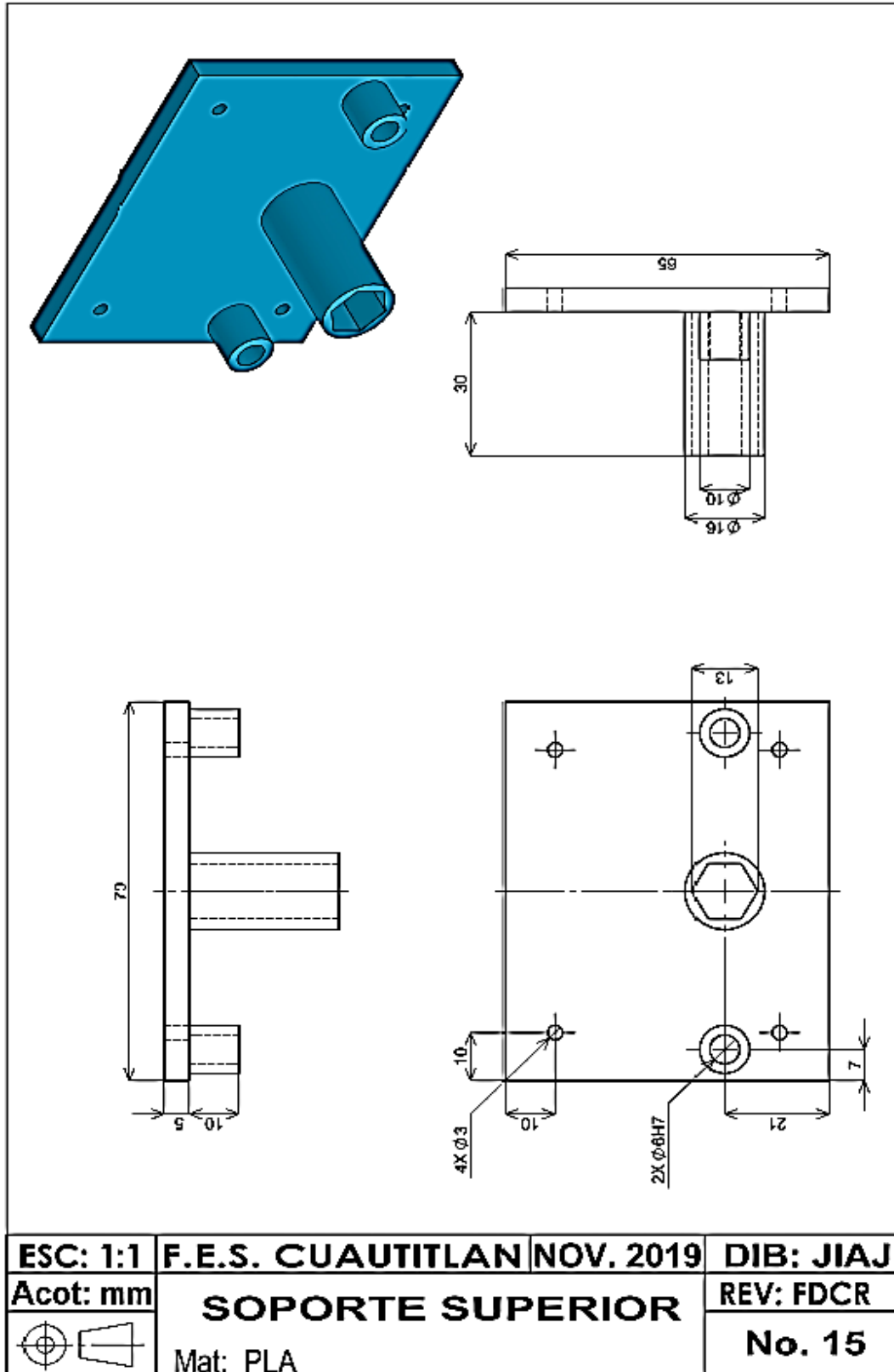


Figura 5.18. Soporte superior

5.3. SISTEMA DE REFRIGERANTE.

El sistema de refrigerante es el encargado de almacenar, bombear y distribuir el refrigerante sobre la superficie de la pieza a temprar, para lograr su propósito es necesario incluir dos manguera principales, las cuales no tienen una ubicación exacta sobre la tapa del depósito de refrigerante, ya que esta no es de suma importancia, siempre y cuando no se obstruyan algunos componentes, como la sujeción del depósito, otra ranura a contemplar sobre esta tapa es la de el sensor de nivel, dichas ubicaciones se ilustran en la figura 5.19.

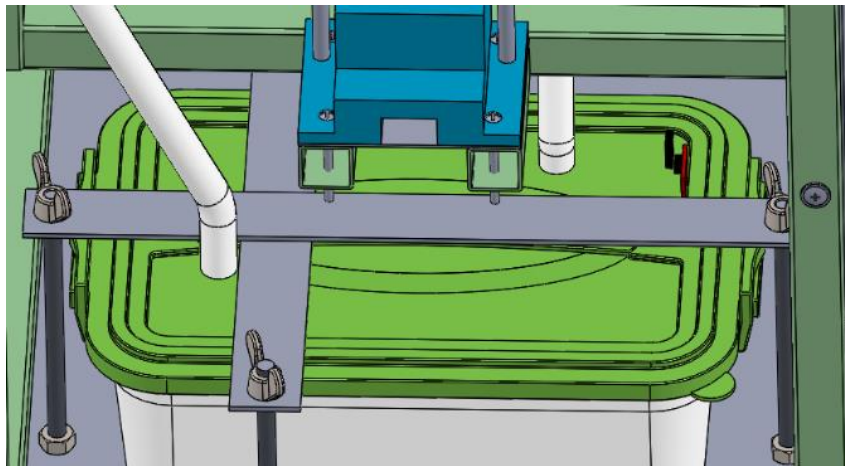


Figura 5.19. Ubicación de mangueras y sensor de nivel.

Las fugas son un punto importante en este sistema, ya que en esta máquina se encuentran dispositivos electrónicos, los cuales pueden presentar fallas con salpicaduras o exceso de humedad, por lo que se recomienda que una vez montado el sistema y antes de montar cualquier otro dispositivo electrónico más que la bomba, realizar una prueba, dejando circular agua durante 10 min ubicando el distribuidor de refrigerante en la parte más alta de la chapa metálica central de la máquina, si durante esta prueba se detectan fugas, se debe de interrumpir y sellarlas con silicón automotriz, dejar reposar el tiempo de curado del pegamento y repetir el proceso hasta que esté completamente libre de fugas.

Un punto crítico de fuga de refrigerante es en la unión de la manguera colectora a la chapa metálica central, por lo que es necesario realizar un corte preciso, la ubicación de dicha manguera se muestra con mayor detalle en la imagen 5.20.

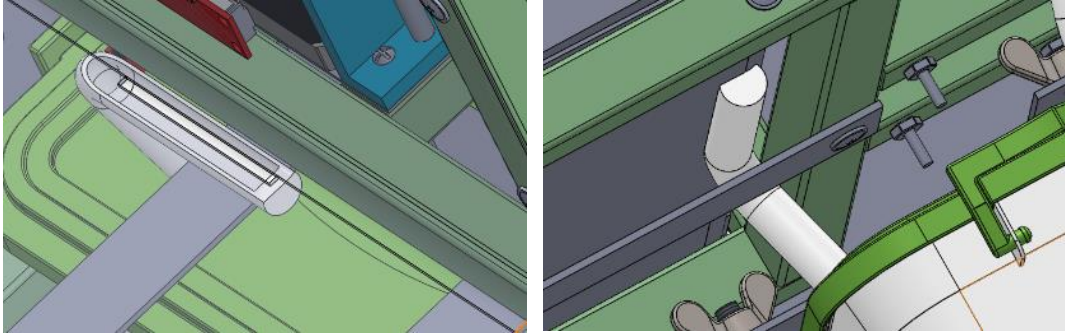


Figura 5.20. Ubicación de manguera colectora.

Como se puede observar en la imagen de la izquierda, la manguera debe de cubrir totalmente a la ranura de la chapa metálica central para que en la periferia se coloque correctamente el silicón automotriz, también es importante realizar el corte correcto para que la manguera “abraze” la curvatura del doblado de la chapa metálica.

Después de realizar las pruebas del sistema de refrigerante es necesario retirar el distribuidor de refrigerante para posteriormente montarlo junto con el ensamble del motor a pasos.

A continuación, en las figuras 5.21 a la 5.23 se presentan el dibujo de conjunto del sistema de refrigerante y los respectivos dibujos de detalle.

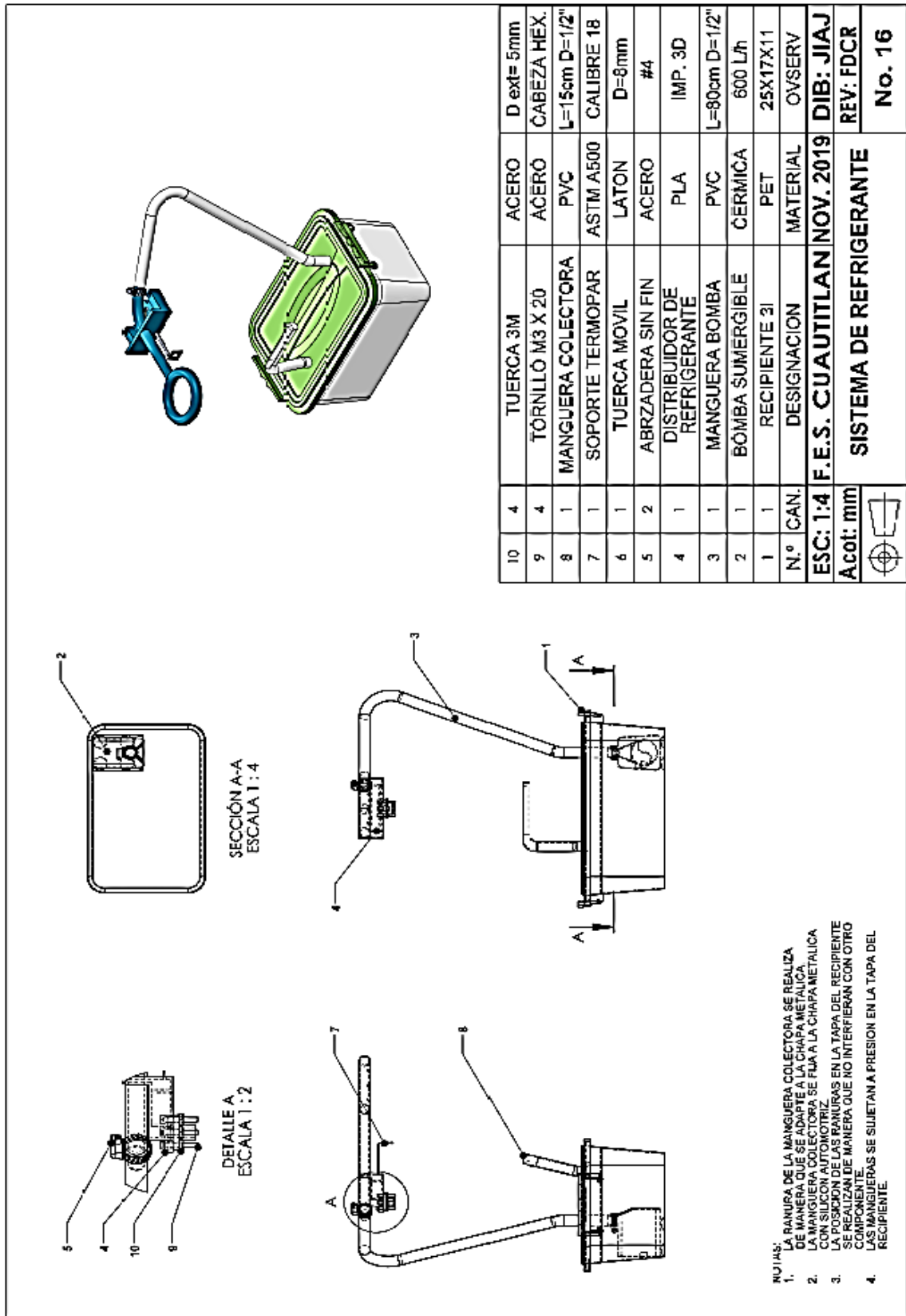


Figura 5.21. Sistema de refrigerante

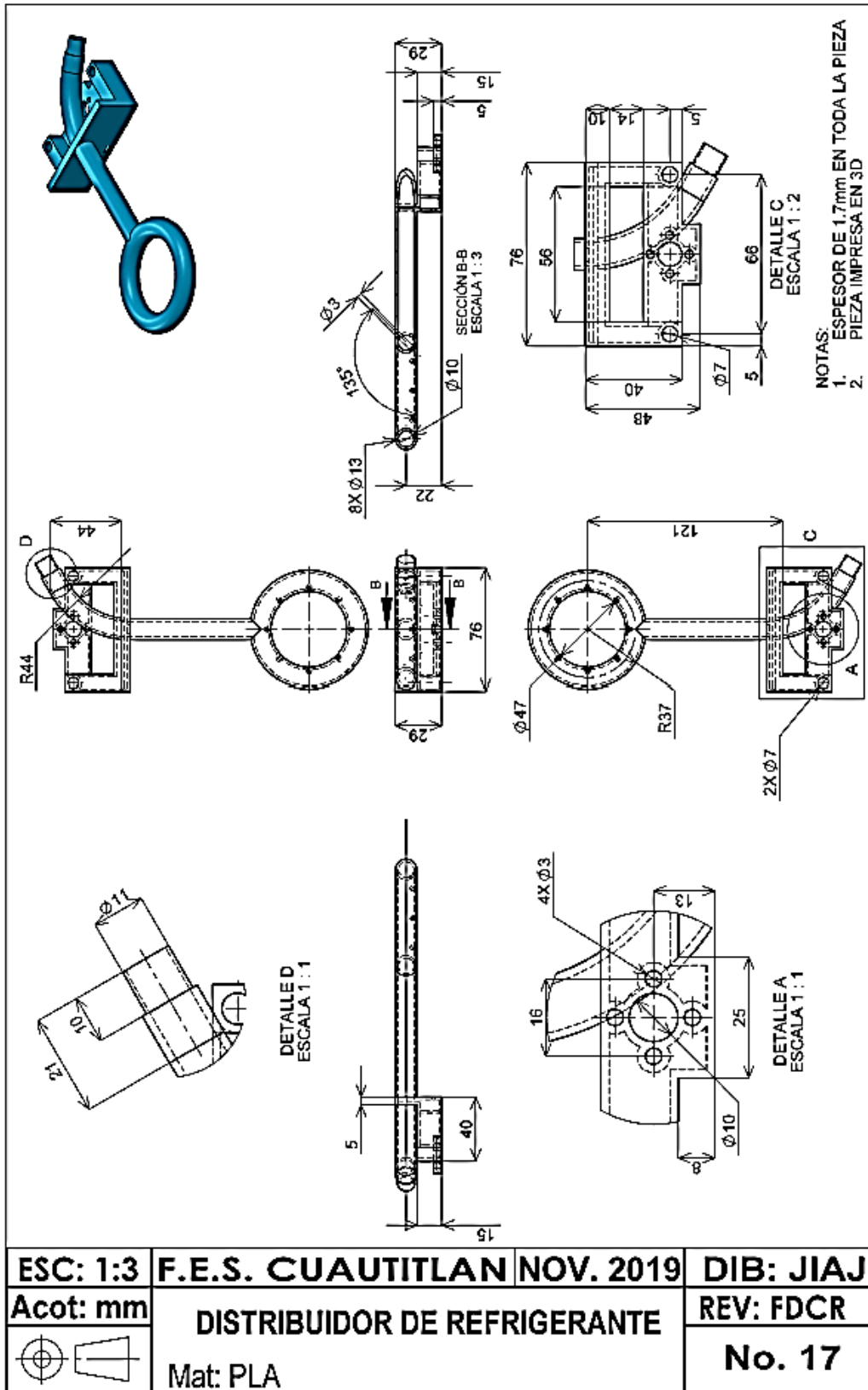


Figura 5.22. Distribuidor de refrigerante

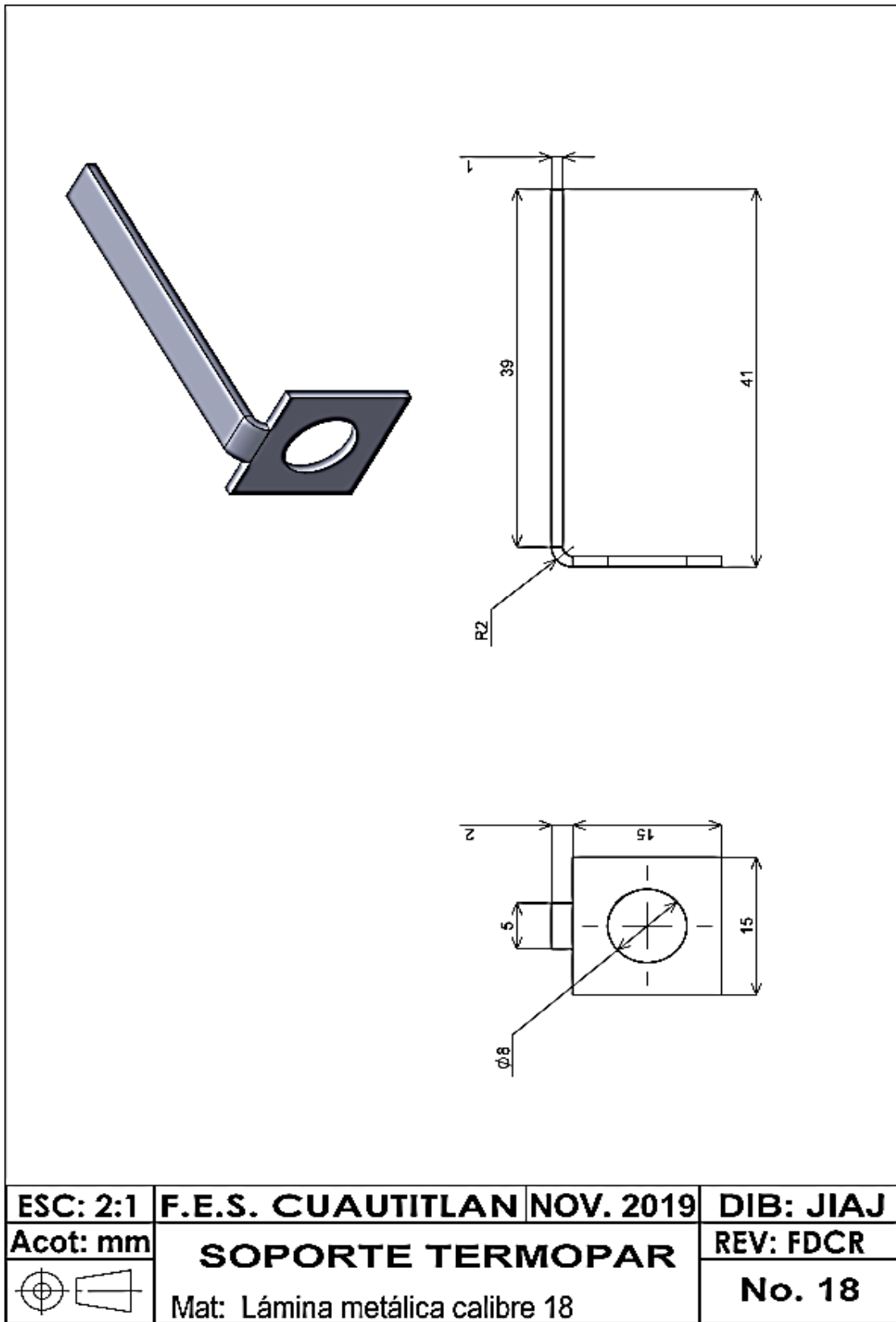


Figura 5.23. Soporte termopar

5.4. PROTECCIÓN.

La protección presentada alrededor de la chapa metálica central de la maquina se diseñó con el propósito de evitar la salpicadura de refrigerante e interferencias por parte del usuario durante la operación de la máquina, debido a esto es que se diseñó con materiales relativamente frágiles como el aluminio y cristal.

El principal punto a tener en cuenta durante la fabricación y el montaje es que la parte inferior de la protección quede bien sellada con respecto a la chapa metálica central y así prevenir fugas; se recomienda realizar el sellado de dicha estructura con silicón frio alrededor de toda la periferia mostrada en la figura 5.24.

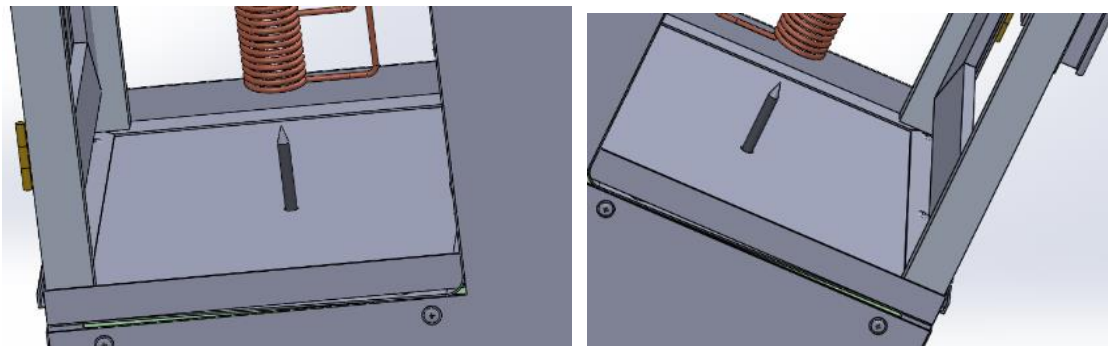


Figura 5.24. Perímetro inferior de la protección.

A continuación, en la figura 5.25 se muestra el dibujo de conjunto de la protección, cabe mencionar que fue diseñado con perfiles estándar de aluminio.

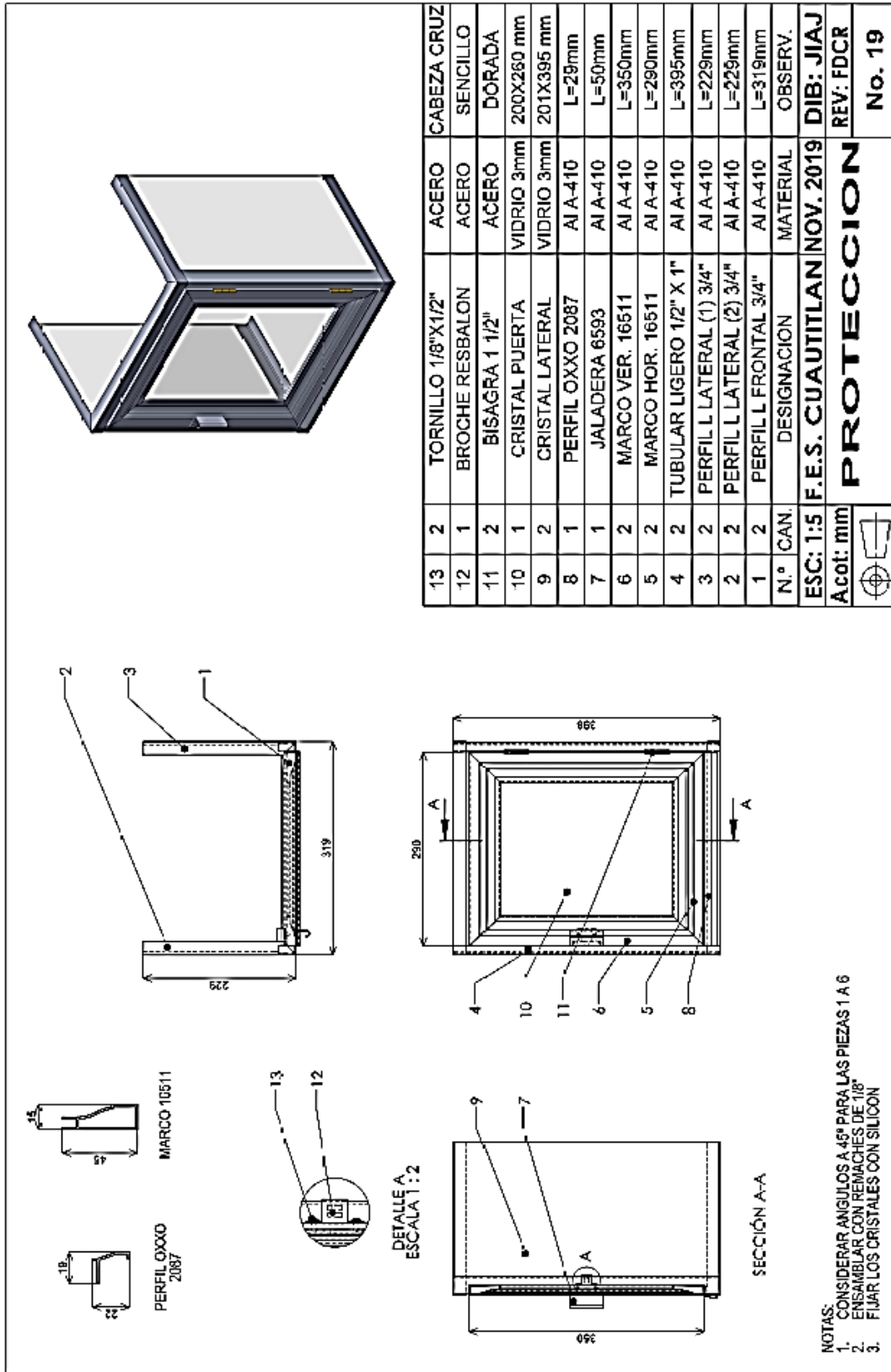


Figura 5.25. Protección

5.5. CIRCUITO INVERSOR.

El subensamble del circuito inversor representa una parte medular de este proyecto, ya que a través de los dispositivos que montados se logrará calentar adecuadamente a la pieza y realizar el posterior temple.

De los puntos a destacar en este subensamble es el de la fijación de los componentes y sus conexiones, ya que como viaja a través del tornillo sin fin, es posible que con el uso puedan presentar desplazamientos u obstrucciones con otros componentes de la máquina.

El principal punto de sujeción del circuito inversor es en las ménsulas, ya que debe de soportar el peso de todo el circuito y las vibraciones producidas en la trayectoria en el tornillo sin fin, dicha sujeción se muestra con gran detalle en la figura 5.26.

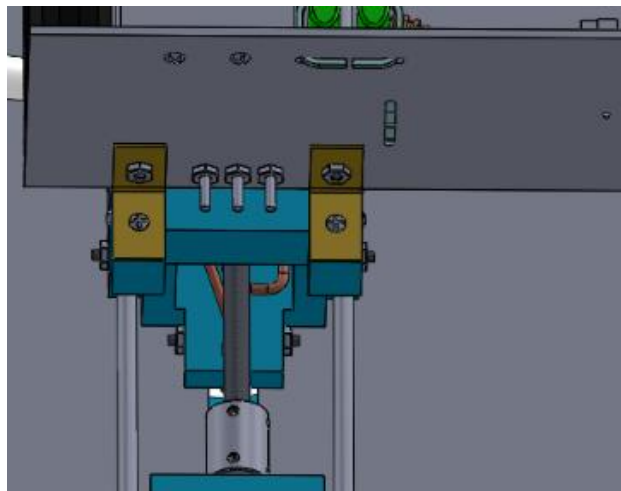


Figura 5.26. Sujeción del circuito inversor.

La principal razón de diseñar al circuito inversor como viajero, fue que debe de haber una distancia mínima entre la bobina LP y al circuito inversor y así evitar pérdidas excesivas.

Durante el montaje del circuito inversor es necesario montar primero los soportes de la bobina LP, después la bobina LP y apretar los espárragos hasta no tener movimiento en ella, posteriormente unir la placa base con el circuito ya montado al soporte trasero, para que por último este se una a los soportes izquierdo y derecho.

A continuación, en las imágenes 5.27 a la 5.32, se presentan el dibujo de conjunto y los respectivos dibujos de detalle del subensamble del circuito inversor.

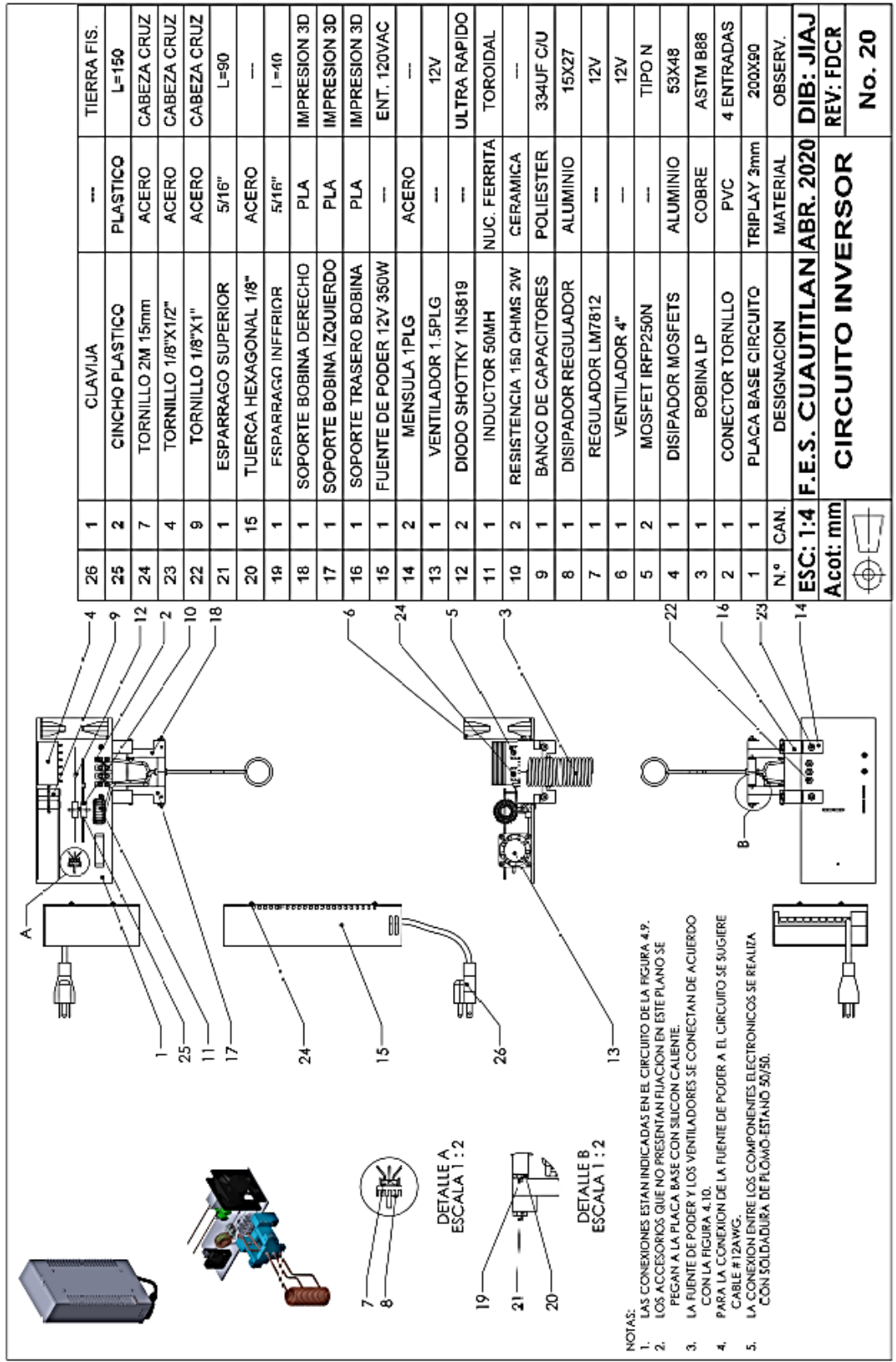


Figura 5.27. Circuito inversor

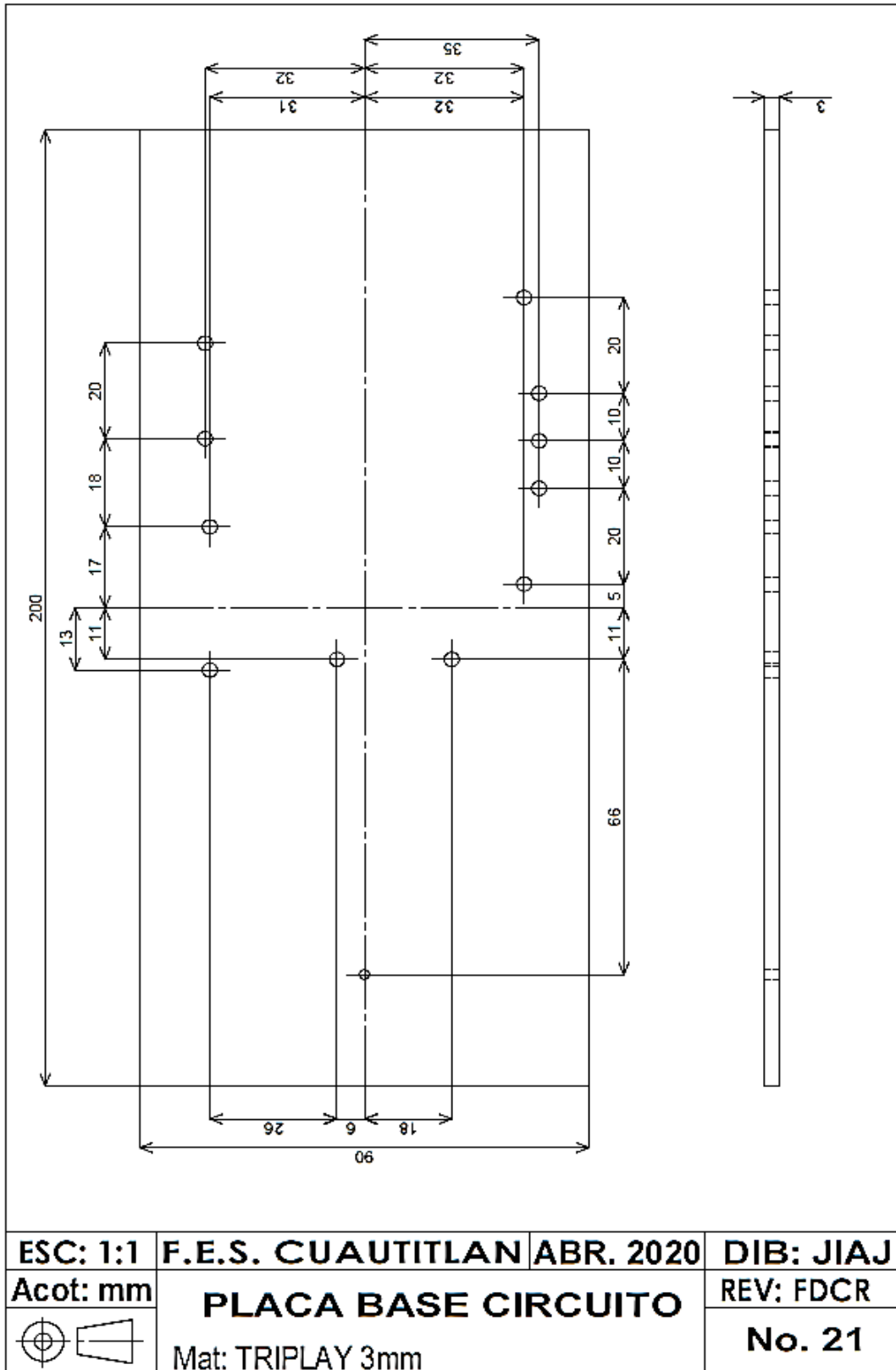


Figura 5.28. Placa base circuito

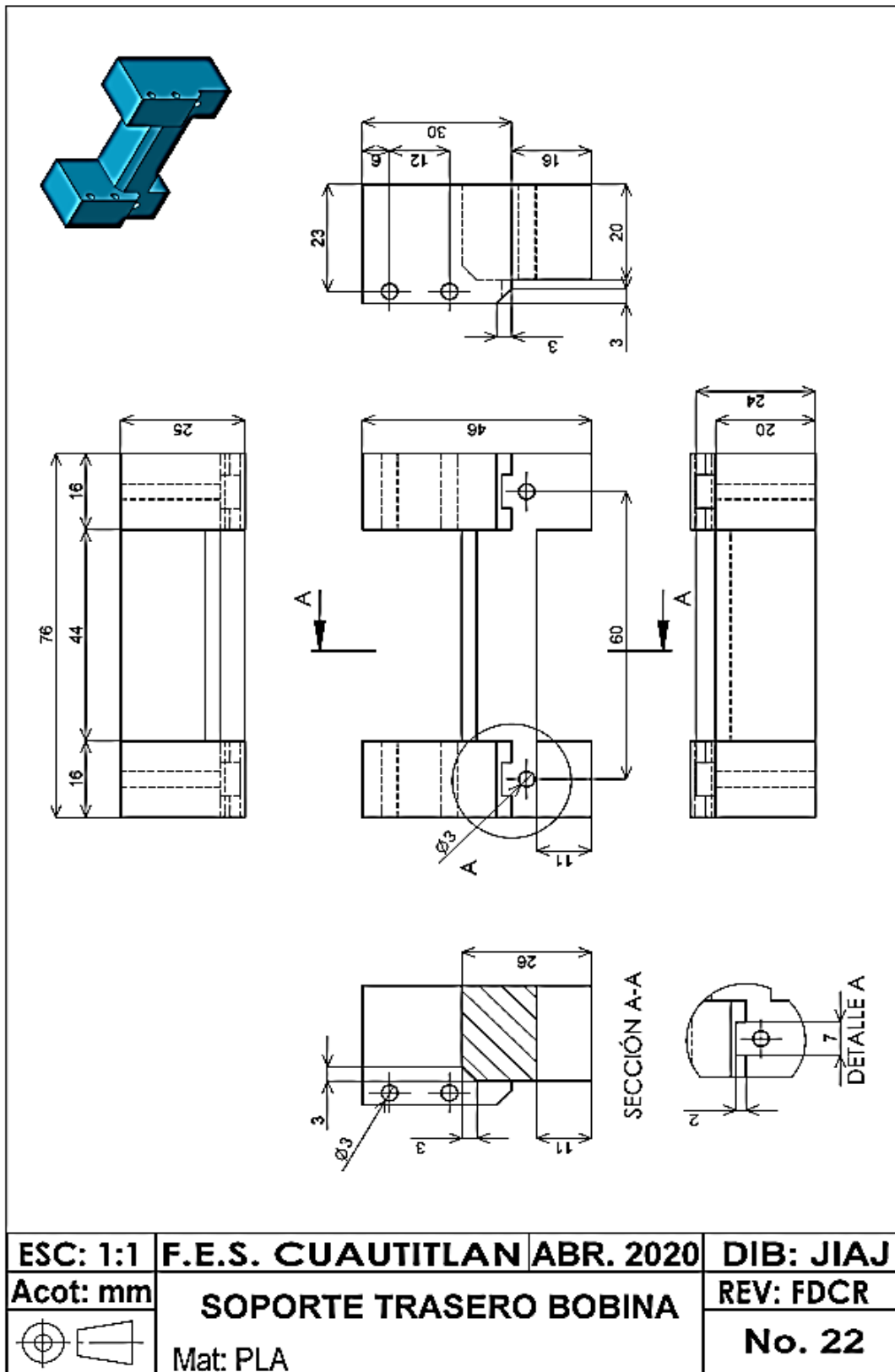


Figura 5.29. Soporte trasero bobina

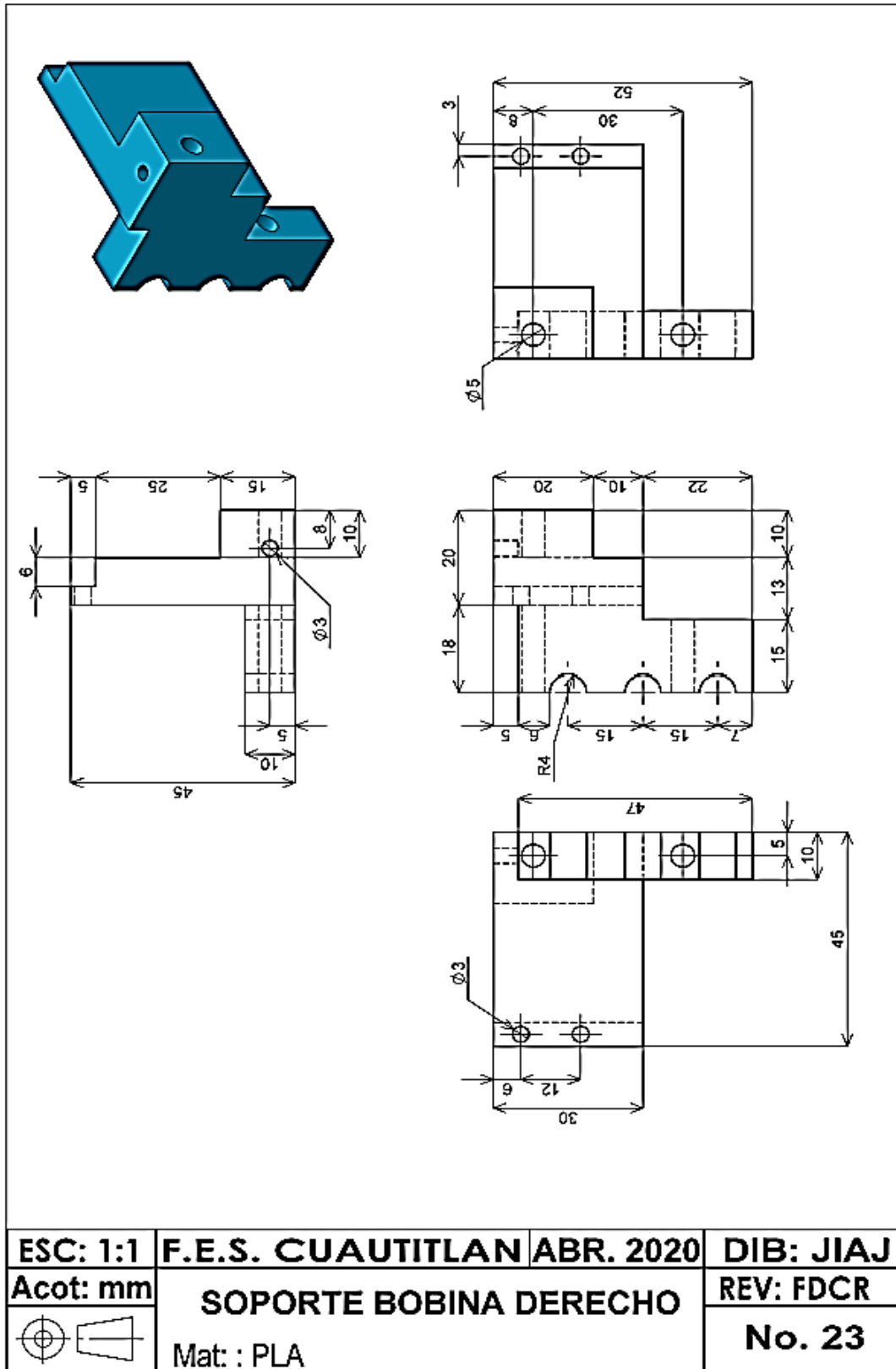


Figura 5.30. Soporte bobina derecho

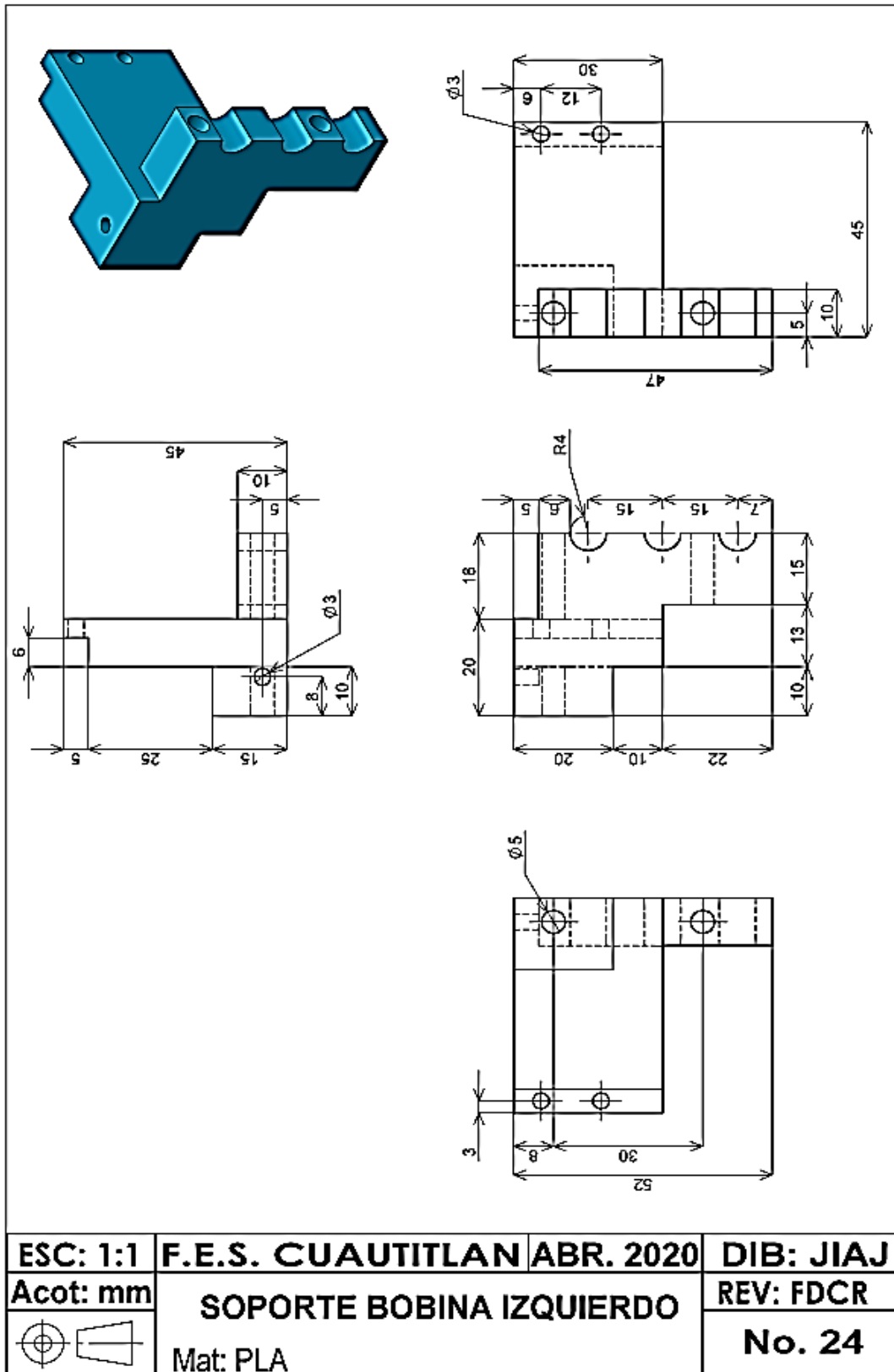


Figura 5.31. Soporte bobina izquierdo

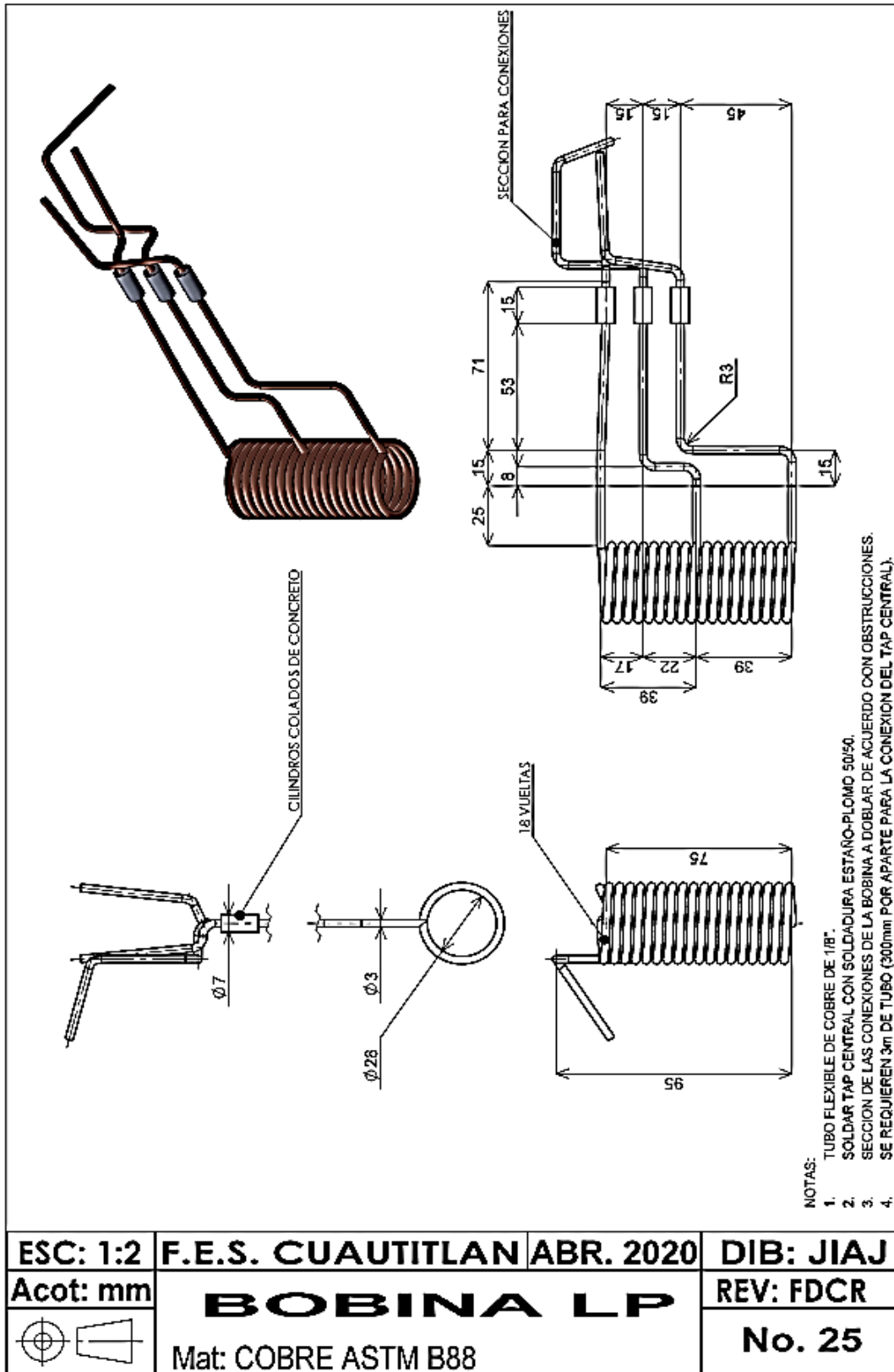


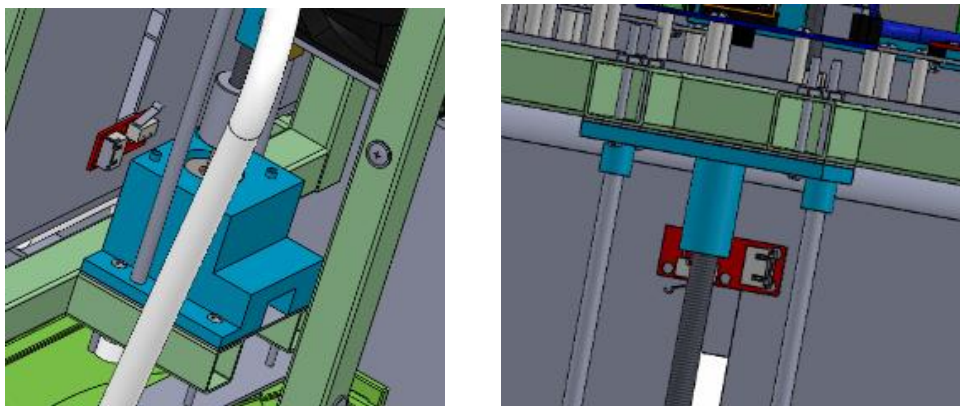
Figura 5.32. Bobina LP

5.6. SISTEMA DE CONTROL.

El subensamble del sistema de control presenta todos los dispositivos y módulos necesarios para la interfaz máquina-usuario y la correcta ejecución del proceso de temple en la máquina, al accionar el circuito de temple, el circuito de refrigerante, los ventiladores para el circuito inversor, entre otras funciones que posee el diseño.

En los planos del sistema de control no se muestran los cables de conexión, es por eso que aquí se hace mención que se deben de tomar en cuenta que dichas conexiones deben de tomar rutas en las cuales no se obstruyan otros componentes de la máquina, como lo es el prisionero superior y todo el trayecto que describe el tornillo sin fin del otor a pasos junto con los componentes que traslada, también, es importante tener en cuenta que todos los cables deben de fijarse a la estructura de la maquina con cinchos de plástico.

En el ensamblaje del sistema de control es importante dejar al último el montaje de los switch de finde carrera, ya que por pequeñas variaciones en el ensamble general pueden no hacer contacto adecuadamente con los soportes que viajan en el tornillo sin fin; para evitar esto se sugiere, una vez ya ensamblado el circuito inversor y ejecutando las conexiones pertinentes, mover los dispositivos de extremo a extremo en el tornillo sin fin, ubicando en una posición tentativa el swintch inferior y el superior, después de verificar que estos hacen un buen contacto con los soportes se procede a la sujeción en la posición correcta, la posición tentativa de los switches de presenta en la figura 5.33.



5.33. Posición del interruptor fin de carrera.

A continuación, en las figuras 5.34 a la 5.36 se muestra el dibujo de conjunto y sus respectivos dibujos de detalle del subensamble del sistema de control.

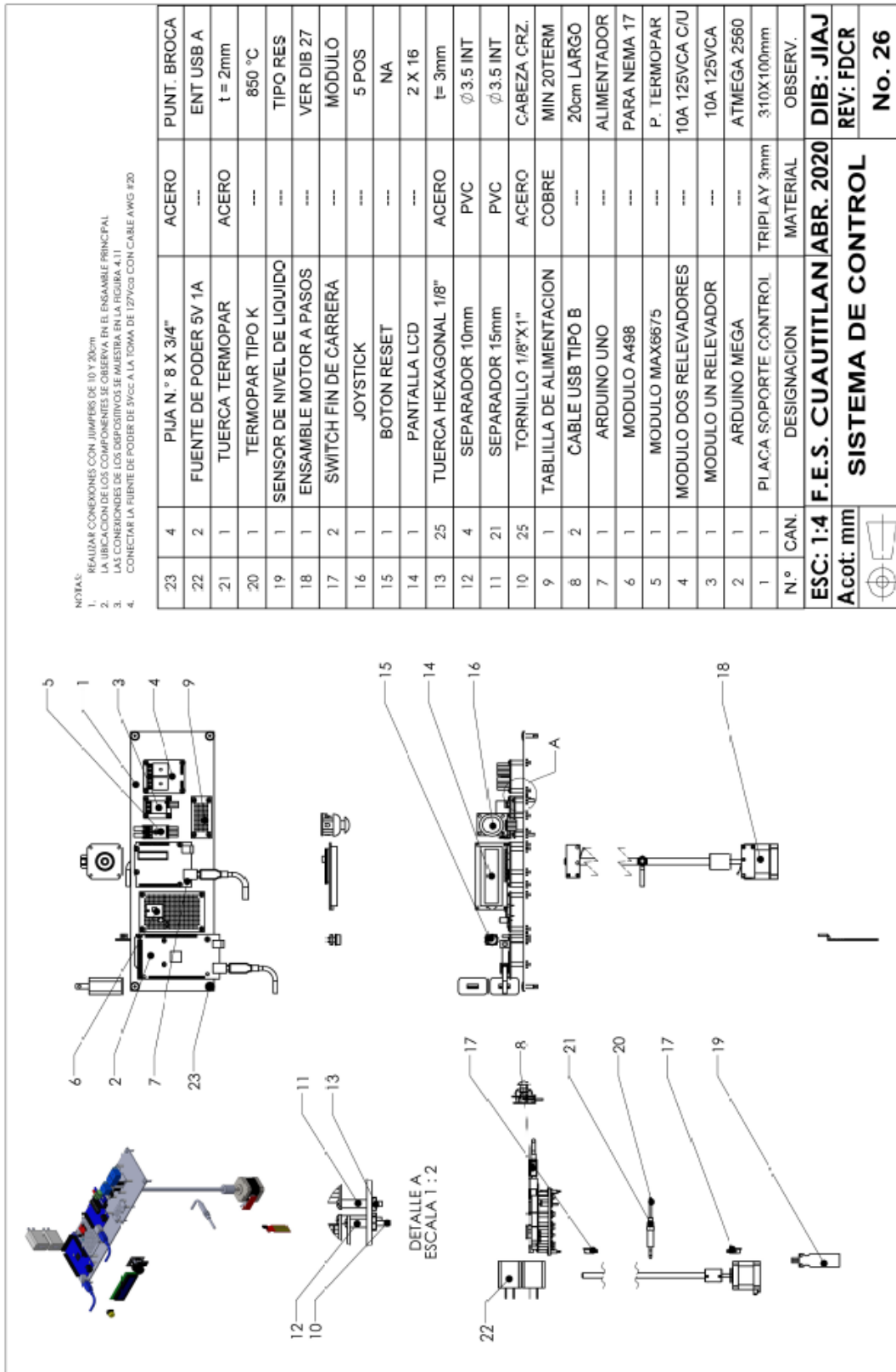


Figura 5.34. Sistema de control

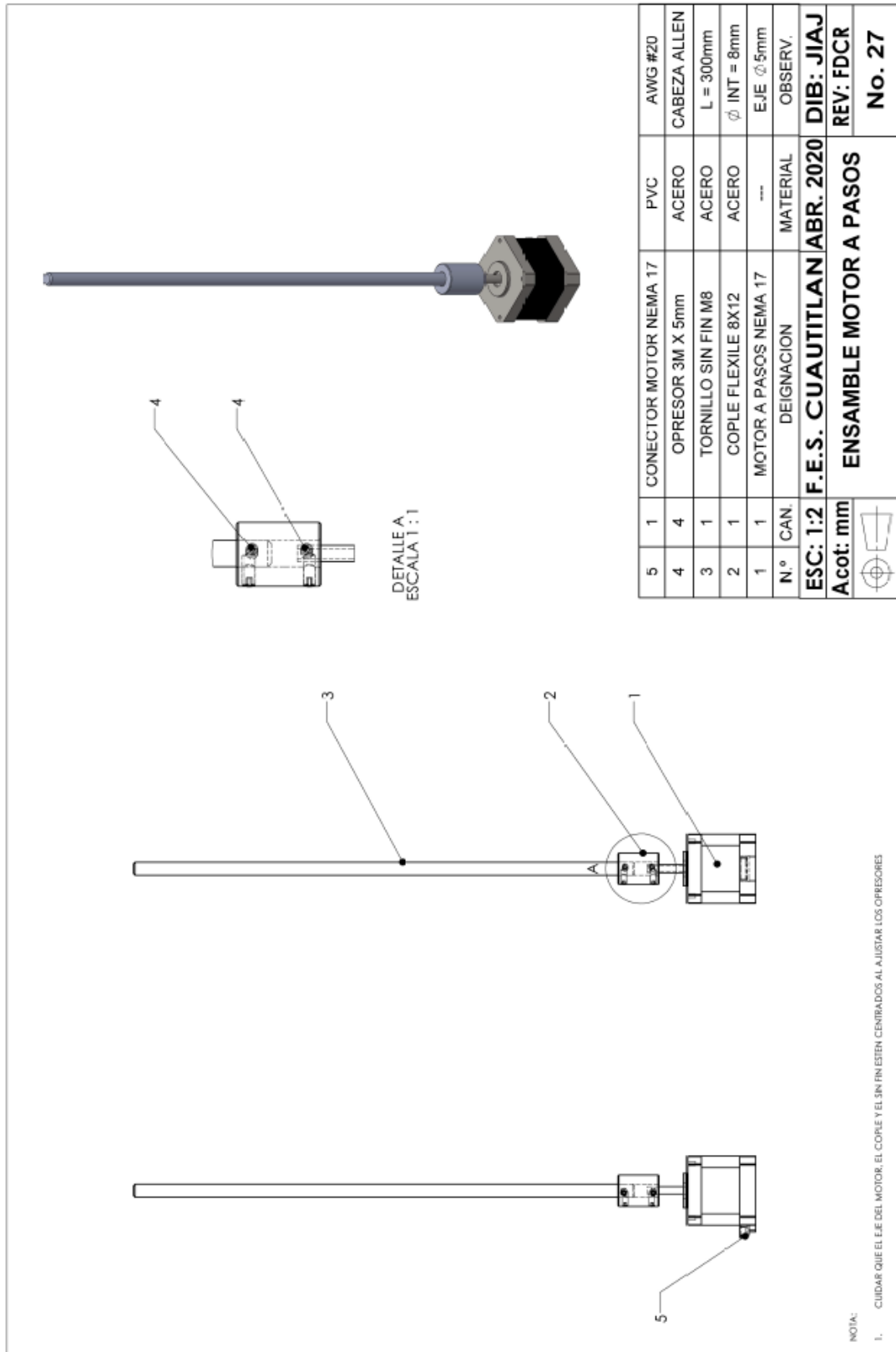


Figura 5.35. Ensamble motor a pasos

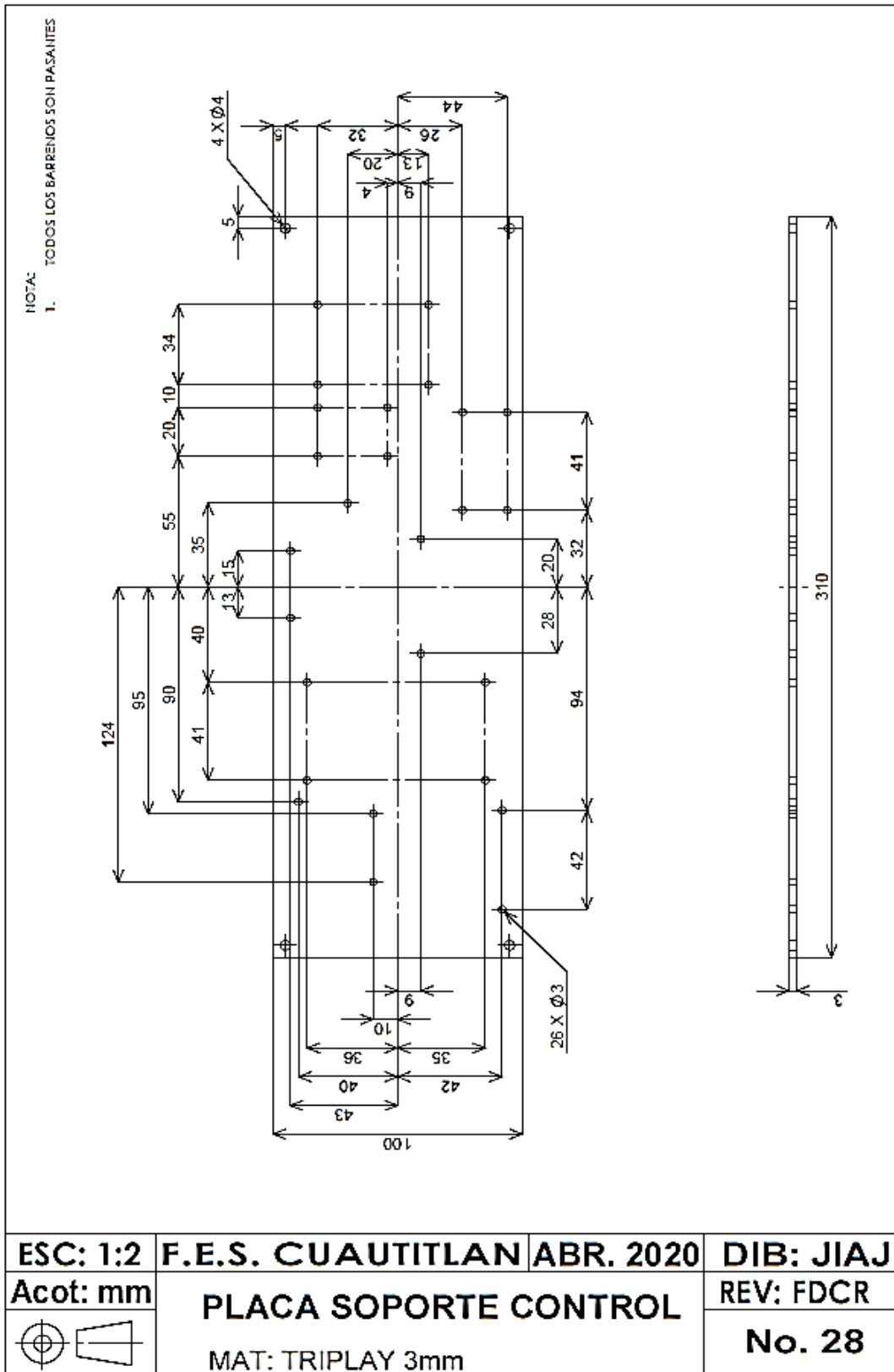


Figura 5.36. Placa soporte control

5.7. RESUMEN.

En este capítulo se han mostrado los dibujos y algunas notas para poder construir correctamente la máquina de temple por inducción, es necesario que este procedimiento se realice de manera cronológica con forme a lo presentado en el capítulo, aunque con algunas excepciones como lo es el caso del montaje de las chapas metálicas superior y trasera, ya que estas se deben de montar al último para poder tener acceso al interior de la máquina y así poder montar los dispositivos necesarios.

Es importante mencionar que, para el diseño de esta máquina se tomó en cuenta que las piezas a temprar tendrán un diámetro máximo de 10 mm y una longitud de 25 a 30mm.

Para poder tener una mejor referencia del montaje de la máquina, puede se puede consultar el capítulo 7, en el cual se incluye un reporte fotográfico.

CAPÍTULO 6.

ENSAMBLE Y USO DEL EQUIPO.

En este capítulo se muestra un panorama de es ensamblada la máquina de calentamiento por inducción, explicado y representado en fotografías, además se presenta un manual de usuario con una guía de cómo utilizar correctamente la maquina y algunas recomendaciones.

6.1. ENSAMBLE DE LA MAQUINA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

En este apartado se pueden observar fotografías captadas en etapas criticas durante el proceso de construcción de la máquina de temple; dichas imágenes pueden servir como referencia para alguna reparación o construcción de esta, así también se mencionan los detalles especiales que hay que tener en consideración durante dicho proceso.

El primer paso el proceso de construcción fue tener la estructura principal soldada, como se muestra en la figura 6.1, teniendo en cuenta que cada esquina quede perfectamente escuadrada.



Figura 6.1. Estructura principal soldada.

Posteriormente se comienza a realizar los barrenos para fijar las chapas metálicas que cubren a la estructura, aunque aún no se fijan todas, ya que se debe de tener espacio para realizar el acomodo de los componentes internos de la máquina, después de fijar algunas chapas, se puede montar la protección ya construida, para que al maquina se observe como en la figura 6.2; cabe mencionar que el soporte del refrigerante en la chapa inferior ya debe de encontrarse ensamblado.



Figura 6.2. Estructura con protección y chapas metálicas.

Después de tener el ensamble mostrado en la figura 6.2 se procede a la colocación de la manguera colectora del sistema de refrigerante, así también a realizar las pruebas mencionadas en el capítulo 5 para revisar las fugas que se puedan presentar, es necesario que después de realizar dichas pruebas se retire el sistema de refrigerante, ya que puede estorbar en el ensamble de los demás componentes.

Paralelo o después del proceso antes mencionado se debe de realizar la programación, pruebas y posterior montaje en la placa principal de todos los elementos del sistema de control, ya que, una vez instalados en la estructura, es más complicado y conlleva a dañar los dispositivos, en el omento de cablear los dispositivos, es necesario tener en cuenta su ubicación en la estructura y así contemplar la longitud de cable necesaria. Cuando el sistema de control se encuentra listo es momento de ensamblarlo a la máquina, desconectando el panel de control del resto del circuito y ensamblándolo como se muestra en la figura 6.3.



Figura 6.3. Montaje del panel de control.

Una vez ensamblado el panel de control se ensambla la placa principal con todos los módulos y sensores que se incluyen, se debe de tener especial cuidado en que los cables no obstruyan el paso del prisionero superior, ya que durante el uso de la máquina podría dañarse, el montaje se puede observar en la figura 6.4.

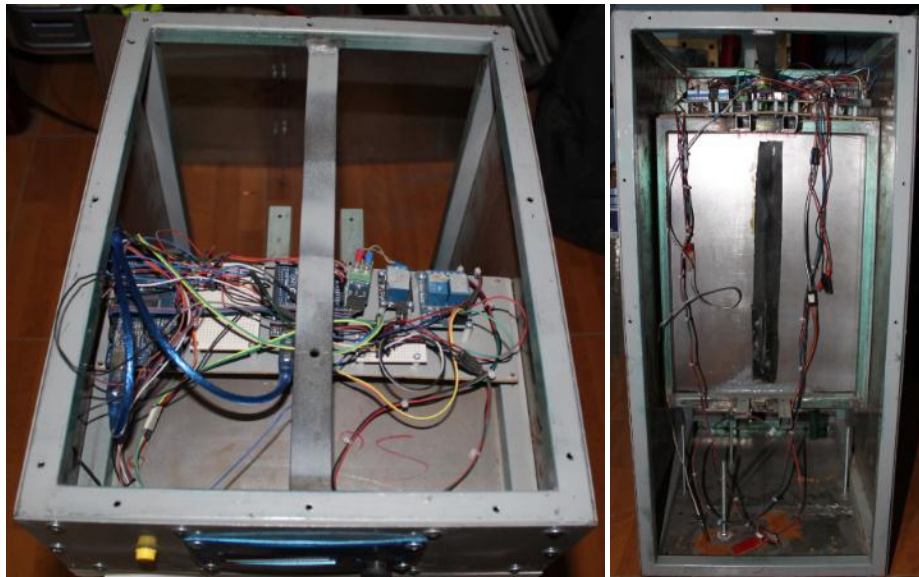


Figura 6.4. Montaje del circuito de control.

Posteriormente se ensambla el soporte del motor junto con las barras guía, junto con el distribuidor de refrigerante, y posteriormente el tornillo sin fin y el motor NEMA 17 ya conectado, como se muestra en la figura 6.5; paralelamente se puede ensamblar el sistema de refrigerante y haciendo pruebas, montando provisionalmente los soportes izquierdo y derecho de la bobina Lp, se pueden ubicar y montar los interruptores de limite en sus lugares correspondientes (arriba y abajo), este ensamble se puede observar en la figura 6.5.

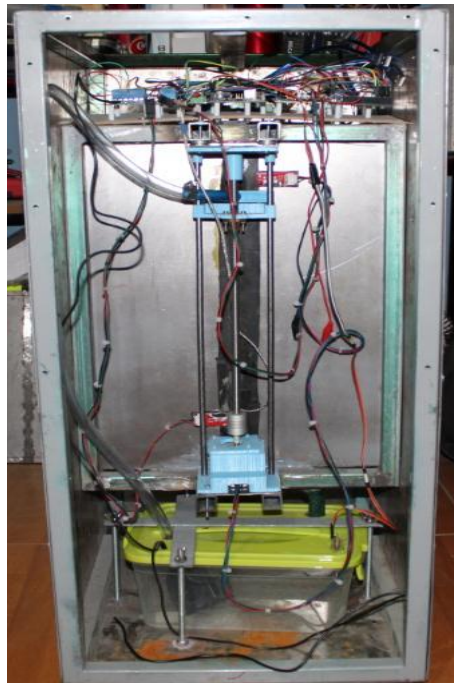


Figura 6.5. Montaje del sistema de refrigerante y soporte de motor.

En cuanto al ensamble del circuito inversor, es necesario montar los soportes izquierdo y derecho de la bobina a ella fuera de la máquina para poder realizar los dobleces necesarios en las terminales, una vez realizados se conecta en el resto del circuito y se realizan pruebas con él, para saber si el calentamiento se lleva a cabo de la manera correcta, este ensamble se puede observar en la figura 6.6.

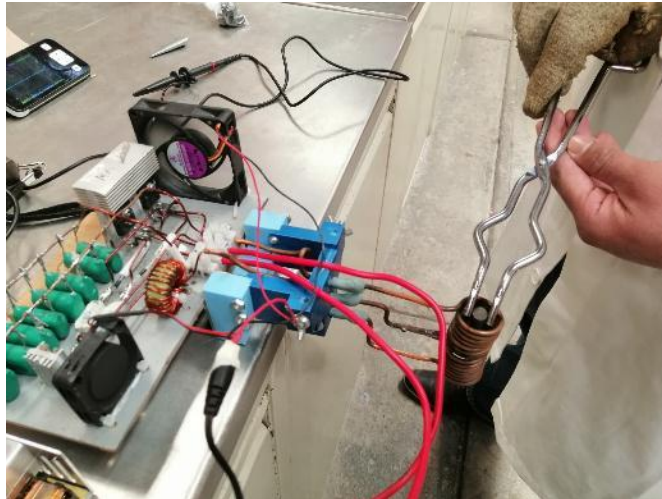


Figura 6.6. Pruebas de calentamiento.

El siguiente paso es montar el circuito inversor a la máquina, lo cual se realiza introduciendo cuidadosamente la bobina L_p desde la parte frontal y posteriormente sujetándola con los soportes izquierdo y derecho desde la parte posterior, para finalmente conectarla al circuito inversor, el cual se fija en los soportes de la bobina; un aspecto importante a considerar en este proceso es revisar que la bobina no haga contacto en ningún otro componente metálico ni de PLA, al igual que se deben de acomodar los cables del circuito de control en rutas que no obstruyan en el recorrido de los componentes móviles. El ensamble anteriormente enunciado se muestra en la figura 6.7.

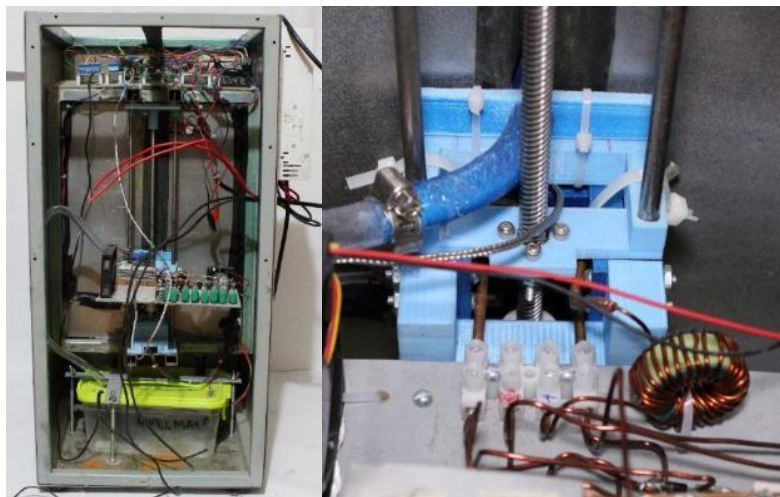


Figura 6.7. Montaje del circuito inversor y fuente de poder.

Después de ensamblar el circuito inversor, se procede a realizar las conexiones en el interior de la máquina, montando la fuente de poder y acomodando los cables en rutas que no obstruyan a los demás componentes, en el caso de los cables que permaneces en movimiento, deben de asegurarse en una sola trayectoria agrupando el cable del termopar tipo K, la alimentación del circuito y la alimentación de los ventiladores, teniendo cuidado en que no se tensen durante la trayectoria, como se muestra en la figura 6.8.

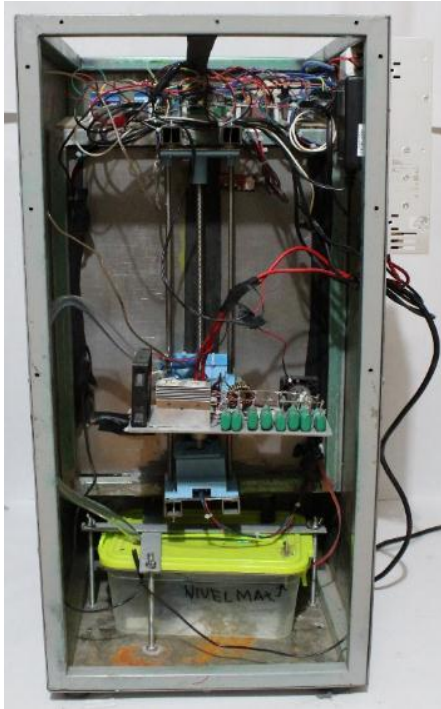


Figura 6.8. Conexiones de la máquina.

Después de realizar las conexiones se procede a ensamblar las chapas metálicas restantes y el prisionero superior; después de realizar esto se puede proceder a las pruebas. La máquina queda ensamblada como se muestra en la figura 6.9.



Figura 6.9. Máquina de temple por inducción ensamblada.

6.2. MANUAL DE USUARIO.

Para poder dar un uso adecuado a la máquina de temple por inducción eléctrica y con esto no tener problemas de funcionamiento a corto plazo, es necesario leer cuidadosamente las instrucciones siguientes, las cuales hacen referencia a los pasos necesarios para poder realizar un ciclo de trabajo completo, así como algunos otros procedimientos necesarios.

Las partes principales de la máquina de temple por inducción eléctrica se muestran en la figura 6.10.

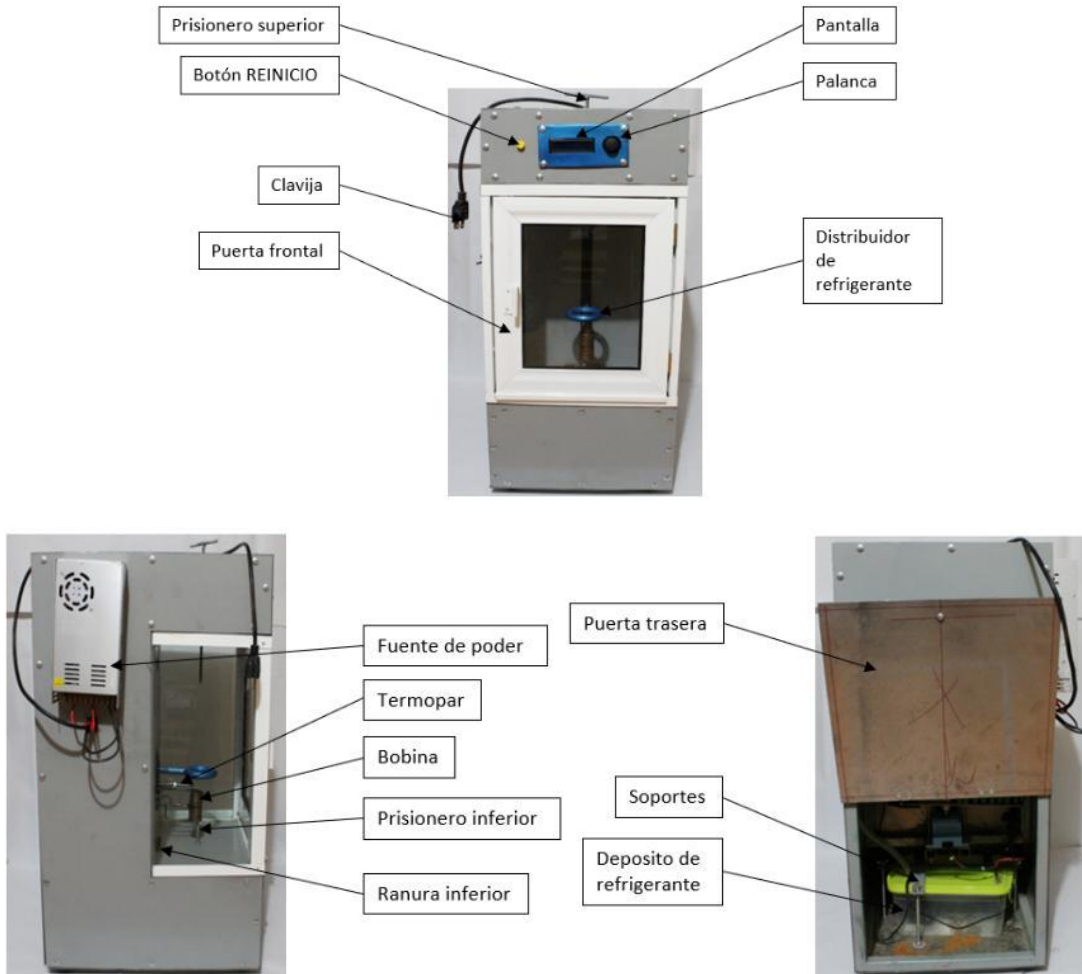


Figura 6.10. Partes principales de la máquina de temple por inducción eléctrica.

6.2.1. Instalación.

- Colocar la maquina en un lugar nivelado, lejos de la humedad y donde se pueda conectar a un enchufe sin necesidad de alguna extensión.
- Se recomienda que la máquina quede a una altura de 1.5m del suelo para tener una mejor manipulación.
- Se recomienda tener 0.5m de espacio libre alrededor de la periferia de toda la máquina.
- Se recomienda lubricar las barras guía.

6.2.2. Procedimiento para el refrigerante.

Este procedimiento se debe realizar con la máquina completamente desconectada de la energía eléctrica.

6.2.2.1. Llenado de refrigerante.

Es necesario llenar de refrigerante el depósito de la máquina acatando los siguientes pasos:

1. Abrir la puerta trasera
2. Revisar que el depósito de refrigerante esté correctamente colocado, con las mangueras en su sitio y asegurado
3. Cerrar la puerta trasera.
4. Abrir la puerta frontal
5. Con un recipiente pequeño vaciar agua o salmuera como refrigerante, dando tiempo a que circule por la ranura inferior, como se indica en la figura 6.11, hasta que llegue al nivel de la marca “Nivel max.”.
6. Cerrar la puerta frontal



Figura 6.11. Llenado del depósito de refrigerante.

6.2.2.2. Vaciado del refrigerante.

Se recomienda revisar constantemente el refrigerante para observar sus propiedades y determinar si aún es útil o de lo contrario cambiarse atendiendo a los siguientes pasos:

1. Abrir la puerta trasera
2. Retirar los soportes del depósito de refrigerante
3. Abrir el depósito de refrigerante y acomodar la tapa de tal manera que permanezca abierto
4. Con un recipiente pequeño comenzar a retirar la mayor cantidad de refrigerante posible (como se puede observar en la figura 6.12 a)
5. Retirar el depósito de refrigerante y vaciar el resto del refrigerante (Como se muestra en la figura 6.12 b)
6. Colocar el depósito en su posición correcta
7. Cerrar la puerta trasera



a)



b)

Figura 6.12. Vaciado del depósito de refrigerante.

6.2.3. Preparación de la probeta.

Las probetas de la máquina de temple por inducción de deben de tener un diámetro máximo de 10mm, y deben de contar con dos barrenos de centro en sus dos extremos, tal y como se muestra en la figura 6.13.

- ❖ Es necesario tener en cuenta que en esta máquina solo se pueden calentar materiales ferromagnéticos

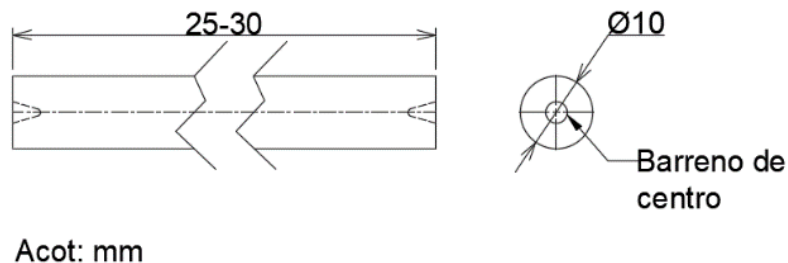


Figura 6.13. Probeta.

6.2.4. Ciclo de trabajo.

- ❖ Antes de comenzar el ciclo de trabajo asegúrese que la maquina haya sido correctamente instalada y se haya realizado correctamente el proceso de llenado de refrigerante.
- ❖ Cada pulsación o movimiento que se realiza en la palanca debe de durar aproximadamente 1s.
- ❖ Para poder tener una referencia del tiempo de calentamiento consultar la tabla 7.1.

El procedimiento es el siguiente:

1. Conectar la maquina a la corriente eléctrica (127Vca)
2. Colocar la probeta sujetándola entre los prisioneros superior e inferior en sus barrenos de centro
3. En la pantalla de la maquina se muestra el menú de inicio (Figura 6.14 a), para proceder a colocar la bobina en la posición deseada se mueve la palanca hacia la derecha hasta que aparezca el menú 1 “POSICIÓN” (Figura 6.14 b) y mientras se está en ese menú, mover la palanca hacia arriba o hacia abajo según se desee hasta lograr la posición indicada y mover la palanca hacia la derecha para que deje de moverse.



a)



b)

Figura 6.14. Pantalla de inicio y posición.

4. Seleccionar el proceso que se desea realizar, temple o revenido, moviendo la palanca hacia la derecha o la izquierda para que aparezca el menú 2 (Figura 6.15a) o 3 (Figura 6.15 b) y seleccionar presionando la palanca



a)



b)

Figura 6.15. Menús temple y revenido.

5. En la pantalla se mostrará el menú de selección de tiempo de calentamiento (Figura 6.16), y se selecciona moviendo la palanca hacia arriba para aumentar o hacia abajo para disminuir, cuando se tenga el tiempo deseado se debe mover la palanca hacia arriba y hacia abajo y presionarla; en el caso que se halla seleccionado el proceso de revenido comenzará el calentamiento, mostrándose en la pantalla la temperatura y el nivel de refrigerante como se muestra en la figura 6.17.



Figura 6.16. Tiempo de calentamiento.

6. Si se seleccionó la opción del proceso de temple, seguido de la selección de tiempo de calentamiento, aparecerá la selección de tiempo de refrigerante (Figura 6.17), el cual se selecciona moviendo hacia arriba para aumentar y hacia abajo para disminuir, una vez seleccionado el tiempo requerido, se debe de mover la palanca hacia arriba y hacia abajo y presionarla; después de esto se llevará a cabo el proceso de temple durante el cual se mostrará la pantalla de que se muestra en la figura 6.18.



Figura 6.17. Tiempo de refrigerante.



Figura 6.18. Pantalla de ejecución.

7. Después de realizar cualquiera de los dos procesos la bobina se moverá hasta la parte inferior de su recorrido y se mostrará el menú de inicio
8. Retirar la probeta de la maquina aflojando el prisionero superior
9. Desconectar la máquina si no se volverá a usar durante más de media hora.

6.2.5. Precauciones.

- ❖ Esperar 15 min entre cada ciclo de trabajo
- ❖ Revisar antes de comenzar la programación del temple o revenido, si la bobina no está tocando a la probeta
- ❖ No programar más de 120s de calentamiento en un a probeta de 10mm

- ❖ Antes de colocar la probeta en la máquina, verificar que su diámetro no exceda de 10mm
- ❖ No abrir la puerta frontal mientras se ejecuta el proceso de temple o revenido
- ❖ En caso de cualquier emergencia o conflicto durante la programación presionar el botón REINICIO
- ❖ Proteger la máquina del polvo
- ❖ Solo trabajar con aceros simples al carbono o aceros de baja aleación.

6.3. COSTO DEL EQUIPO

En la tabla 6.1. se presenta una lista de los materiales utilizados en la fabricación del equipo, así como su precio, debiendo mencionar que no se toma en cuenta el costo del tiempo empleado en el diseño, y en la fabricación de este.

Tabla 6.1. Lista concentrada de materiales y precios

Lista concentrada de materiales y precios					
No.	Cant.	Unidad	Descripción	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Material para la estructura de la máquina					
1	9	m	Perfil tubular cuadrado 3/4" X 3/4"	20	180
2	1.2	m ²	Chapa metálica calibre 18	150	180
3	2	PZA	Bisagra 1"	5	10
4	1	m	Esparrago de 1/4"	15	15
5	1,5	m	Barra de acero redonda 1/4"	15	22,5
6	4	PZA	Tuerca tipo mariposa 1/4"	1	4
Total					\$411.5
Material para el sistema de refrigerante					
7	1	PZA	Bomba sumergible 600L/h	250	250
8	1	PZA	Recipiente 3/	35	35
9	1	m	Manguera plástica transparente de 1/2"	5	5
10	2	PZA	Abrazadera sin fin #4	5	10
11	1	PZA	Tuerca móvil 8M	20	20
12	4	PZA	Tornillo cabeza Allen 3M	2	8
13	4	PZA	Tuerca 3M	1	4
Total					\$332
Material para la protección					
14	2	m	Perfil de aluminio "L" 3/4"	20	40
15	1	m	Perfil de aluminio tubular 1/2"X1"	20	20
16	1,5	m	Perfil de aluminio marco 16511	20	30

No.	Cant.	Unidad	Descripción	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
17	0,05	m	Jaladera de aluminio	20	1
18	0,3	m	Perfil de aluminio OXXO 2087	20	6
19	0,3	m ²	Cristal de 3mm de espesor	100	30
20	2	PZA	Bisagra 1 1/2"	5	10
21	1	PZA	Broche resbalón	20	20
Total					\$157
Material para el circuito inversor					
22	1	PZA	Conector tipo tornillo de 4 entradas	10	10
23	3	m	Tubo flexible de cobre de 1/8"	50	150
24	1	PZA	Disipador doble de aluminio	30	30
25	1	PZA	Ventilador 4" 12V	65	65
26	2	PZA	Mosfet IRFP250N	80	160
27	1	PZA	Regulador LM7812	20	20
28	1	PZA	Disipador de aluminio	20	20
29	2	PZA	Capacitor poliéster 334uF	8	16
Material para el circuito inversor					
30	2	PZA	Resistencia 150Ω 2W	5	10
31	1	PZA	Inductor toroidal 50mH	25	25
32	2	PZA	Diodo Schottky 1N5819	5	10
33	1	PZA	Ventilador 1 1/2 " 12V	35	35
34	2	PZA	Ménsula 1"	5	10
35	1	PZA	Fuente de poder 12V 350W	520	520
36	1	m	Esparrago de 5/16"	15	15
37	7	PZA	Tornillo cabeza cruz 2M 15mm	1	7
38	1	PZA	Clavija	20	20
39	0,5	kg	Cemento gris	6	3
Total					\$1126
Material para sistema de control					
40	1	PZA	Arduino MEGA	201	201
41	2	PZA	Switch fin de carrera	37	74
42	1	PZA	Motor NEMA 17	250	250
43	1	PZA	Módulo 2 relés	55	55
44	1	PZA	Cople flexible	59	59
45	1	PZA	Driver A4988P	35	35
46	1	PZA	Termopar tipo K	170	170
47	2	PZA	Jumpers M-H	35	70
48	1	PZA	Arduino UNO	200	200
49	1	PZA	Módulo de 1 relé	30	30
50	1	PZA	LCD 2X16	70	70
51	1	PZA	Modulo joystick	50	50

No.	Cant.	Unidad	Descripción	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
52	1	PZA	Sensor de nivel de liquido	30	30
53	1	PZA	Modulo MAX6675	35	35
54	2	PZA	Cable USB tipo B	15	30
55	1	PZA	Tablilla 20 terminales	20	20
56	21	PZA	Separador 15mm Φ 3,5mm	0,5	10,5
57	4	PZA	Separador 10mm Φ 3,5mm	0,5	2
58	1	PZA	Boton push	2	2
59	2	PZA	Fuente de poder 12V 5A	50	100
60	0,3	m	Tornillo sin fin M8	70	21
Total					\$1514,5
Material misceláneo					
61	1	kg	Filamento PLA para impresora 3D	450	450
62	1	PZA	Silicon automotriz	50	50
63	100	PZA	Cincho plástico 150mm X 2mm	0,1	10
64	0,08	m ²	Triplay 3mm	150	12
65	150	PZA	Pija No 8 X 3/4" punta de broca	0,5	\$75
Material misceláneo					
66	15	PZA	Tornillo 1/8" X 1/2"	0,5	7,5
67	34	PZA	Tornillo 1/8" X 1"	0,5	17
68	8	PZA	Tornillo 1/8" X 1 1/2"	0,5	4
69	57	PZA	Tuerca hexagonal 1/8"	0,5	28,5
70	5	m	Cable AWG #22	5	25
71	3	m	Alambre AWG #12	10	30
Total					\$709
Costos extra					
72	1	UN	Mano de obra externa	460	\$460
Máquina de temple por inducción					
73	1	PZA	Costo total		\$4710

6.4. RESUMEN.

En este capítulo se puede observar que la máquina fue ensamblada cuidadosamente atendiendo factores críticos que pueden afectar su desempeño, como lo es la fuga de refrigerante, el libre recorrido de los componentes móviles y la sobrecarga de la fuente de poder.

También es posible denotar que el manual de usuario presenta pasos sencillos para poder llevar a cabo un uso correcto de la máquina y que no presente ningún problema, programando correctamente los tiempos de calentamiento y refrigeración.

Como se puede observar el costo de los materiales con los que se construye esta máquina es mínimo y muy reducido a comparación con los equipos industriales, ya la máquina fabricada y diseñada en esta tesis no tiene el rendimiento ni capacidad para poder ser utilizada en una línea de producción, aparte que solo es capaz de templar hasta 10mm de diámetro.

CAPÍTULO 7.

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL EQUIPO.

El equipo diseñado en este trabajo es capaz de templar superficialmente piezas de aceros ferromagnéticos de hasta 10 mm de diámetro y de acuerdo con pruebas rápidas realizadas en el proceso de armado es posible alcanzar el calentamiento hasta el rojo vivo de algunas piezas de acero, pero es necesario saber cuál es el tiempo óptimo de calentamiento, la profundidad de penetración del temple y la dureza que se puede alcanzar, es por eso que a continuación se muestra una serie de pruebas a probetas templadas en la máquina haciendo la comparación entre distintos tiempos de calentamiento y medios de temple.

7.1. IDENTIFICACIÓN DE ACEROS A TEMPLAR.

Para poder tener la seguridad de la composición del acero al cual se le somete al proceso de temple superficial en la máquina diseñada se realiza una prueba metalográfica, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

Después de preparar una de cuatro probetas de 3 cm de largo y 9 mm de diámetro, puliéndolas y realizando un ataque químico con Nital al 2% y al observarla al microscopio se puede notar que la cantidad de perlita es de aproximadamente 65% y de acuerdo con la experiencia y aplicando la regla de la palanca, esto corresponde aun acero 1060, tal como se muestra en la figura 7.1.

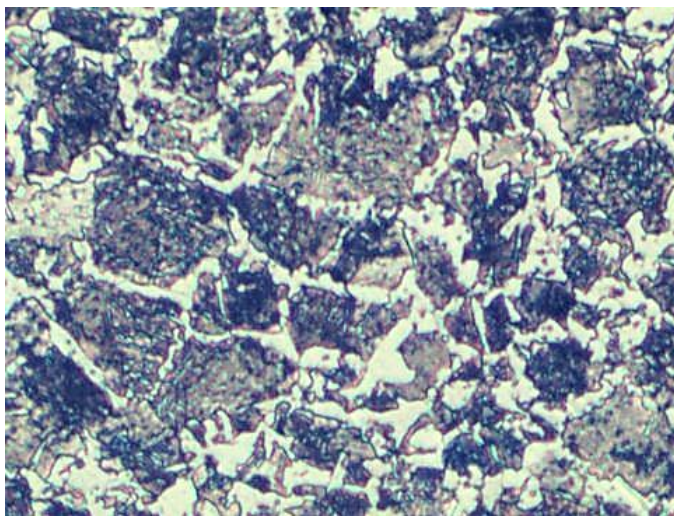


Figura 7.1. Acero 1060 a 200X.

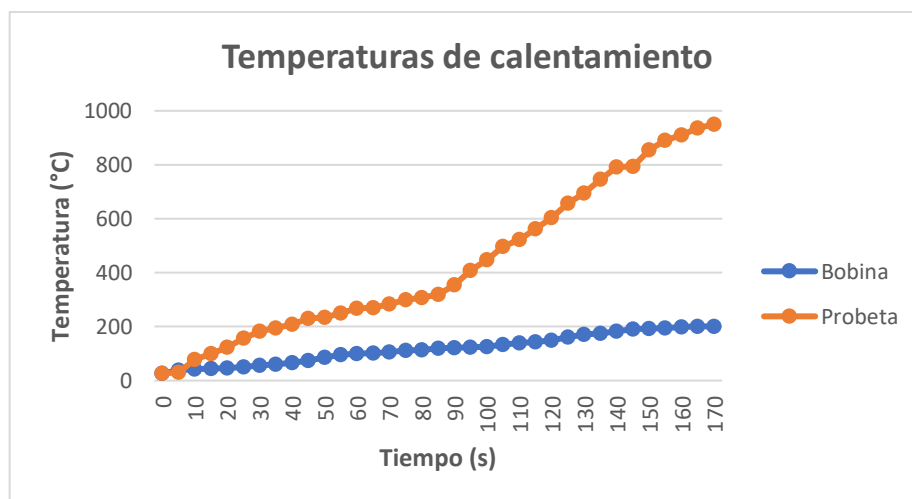
7.2. TEMPERATURAS DE CALENTAMIENTO.

Cuando se realiza el proceso de calentamiento en la máquina la bobina también sufre calentamiento, el mismo que se ha medido con un termopar tipo K en la superficie de esta, obteniendo los resultados que se observan en la tabla 7.1 y la gráfica de la figura 7.2; de igual manera se realiza la misma medición de temperatura en la probeta mostrándola también en la tabla 7.1 y la figura 7.2, como se puede observar la bobina logra estabilizar su temperatura en 200°C, y la probeta llega a calentarse hasta 950°C aproximadamente, lo que coincide aproximadamente con el punto amagnético (Temperatura de Curie 770°C aproximadamente) del acero.

Tabla 7.1. Temperaturas de calentamiento

Temperaturas de calentamiento		
Tiempo	Temperatura	
	Bobina	Probeta 1
s	°C	°C
0	27	27
5	39	30
10	43	79
15	45	100
20	47	124
25	51	157
30	56	182
35	60	195
40	67	209
45	75	230
50	86	235
55	95	250
60	99	267
65	102	270
70	105	284
75	111	299
80	114	308
85	120	320
90	121	355
95	124	409
100	125	448
105	133	498
110	140	523

Temperaturas de calentamiento		
Tiempo	Temperatura	
	Bobina	Probeta 1
s	°C	°C
115	144	562
120	150	604
125	162	657
130	171	695
135	175	747
140	182	792
145	190	794
150	193	855
155	195	890
160	198	910
165	201	937
170	200	950



*Las pruebas de calentamiento se realizaron con una probeta de 9mm de diámetro.

Figura 7.2. Gráfica de calentamiento.

También debido a que la máquina debe de llegar a temperatura ambiente antes de poder ser usada de nuevo, se obtiene la tabla 7.2 y la figura 7.3, por lo que se determina que solo se puede templar una probeta cada 6 min.

Tabla 7.2. Temperaturas de enfriamiento

Temperaturas de enfriamiento	
Tiempo	Bobina
s	°C
0	200
20	182
40	153
60	125
80	97
100	84
120	82
140	76
160	72
180	70
200	67
220	60
240	51
260	43
280	38
300	35
320	31
340	30
360	27

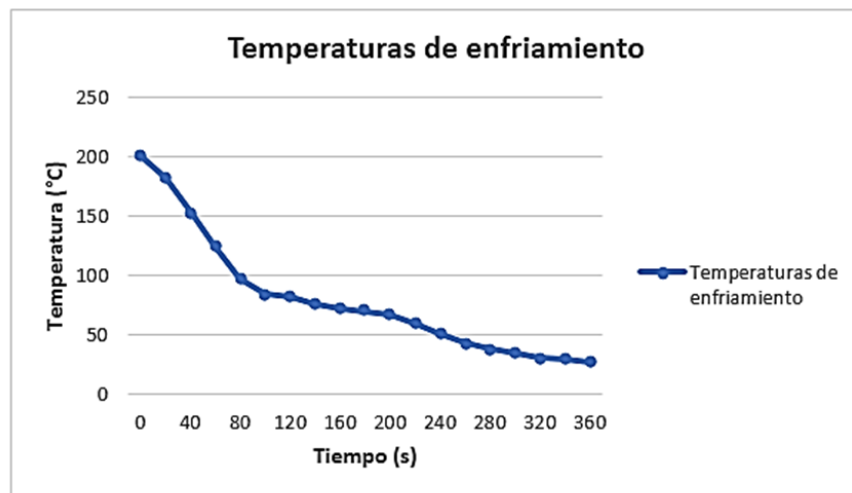


Figura 7.3. Gráfica de enfriamiento.

* Cabe mencionar que estas pruebas se realizan con el circuito inversor separado del resto de la máquina tal como se presenta en la figura 6.6.

7.3. TEMPLE DE LAS PROBETAS.

Después de conocer la relación entre el tiempo y la temperatura que puede alcanzar la probeta se realiza el proceso de temple completo en la máquina, como se muestra en la figura 7.4 siguiendo el procedimiento que a continuación se muestra.



Figura 7.4. Temple de probetas.

El procedimiento por seguir en esta prueba es el siguiente:

1. Preparar la probeta como se indica en el punto 6.2.3.
2. Seguir los pasos descritos en el punto 6.2.4, programando el tiempo de calentamiento de acuerdo con la tabla 7.3 y el tiempo de refrigerante adecuado (Se recomienda mínimo 60s).
3. Dejar reposar 1 min, retirar la probeta e identificar el punto templado.
4. Después de obtener la probeta templada aplicar proceso de pulido hasta obtener un término tipo espejo en la cara principal.

Tabla 7.3. Temperaturas de pruebas de temple

Temperatura de pruebas de temple				
Probeta	Tiempos prueba [s]			
	T. de refrigerante	T. de calentamiento (1)	T. de calentamiento (2)	T. de calentamiento (3)
Acero 1060	60s	120s	180s	240s

Cabe mencionar que los tiempos de calentamiento para cada probeta se obtuvieron con las relaciones de la gráfica de la figura 7.3 y las temperaturas mostradas en el diagrama de fases Fe-Fe₃C, debido a que los dos aceros son hipoeutectoides se calientan de 30 a 50°C por encima de la línea A₃ como se muestra en la figura 7.5.

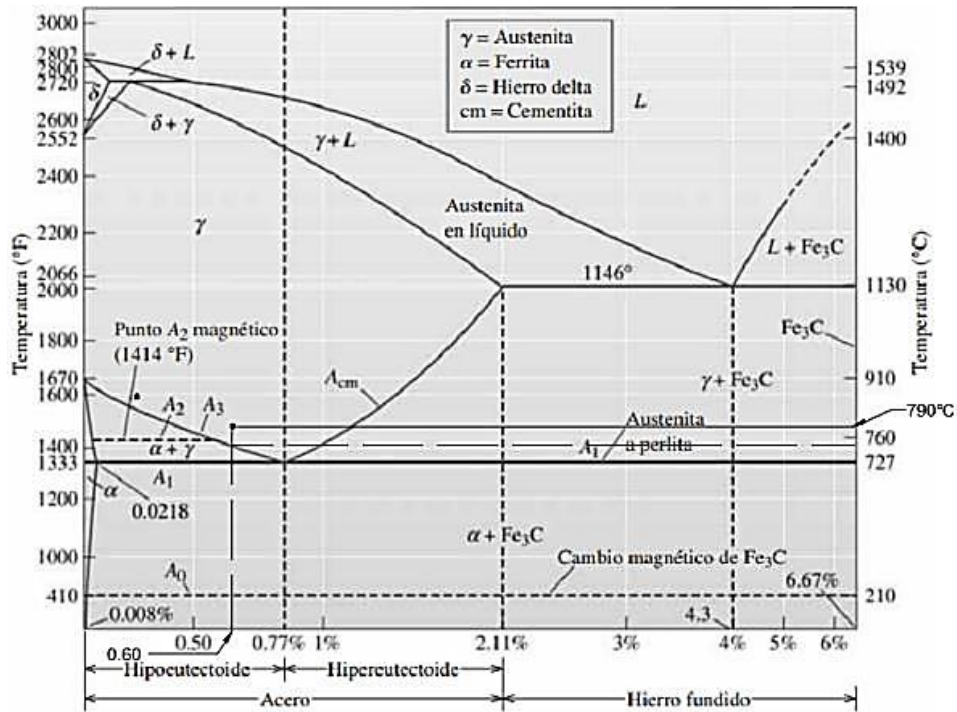


Figura 7.5. Temperaturas de temple del acero 1060 en el diagrama Fe-Fe₃C.

En la figura 7.6 Se puede observar el calentamiento de una de las probetas templadas, la cual alcanza el rojo vivo en aproximadamente 2min



Figura 7.6. Calentamiento de probetas en el circuito separado.

Como se puede observar en la tabla 7.3, se realizaron tres pruebas con diferentes probetas de acero 1060 a diferentes tiempos ya que, aunque la temperatura de temple se alcanza desde los 2min hay que dar tiempo a la transformación martensítica y así poder aumentar la dureza.

7.4. PRUEBA DE DUREZA.

El proceso de temple tiene como objetivo aumentar la dureza de un acero, en este caso como se trata de temple superficial solo se debe endurecer un determinado espesor de la probeta, como se pudo observar en el punto anterior.

Para poder comprobar el aumento de dureza al aplicar el proceso de temple en la máquina diseñada se realizan las pruebas que a continuación se describen:

- Es necesario tomar en cuenta que para tener una referencia del incremento en la dureza de los materiales templados se realiza la prueba de dureza en la probeta sin temprar (Las que se utilizan en el punto 7.1) y posteriormente las tres probetas templadas; para todas ellas se realizan los pasos siguientes.
1. Se prepara el durómetro con escala Rockwell C que implica el uso de un indentador de diamante (Brale) y una carga de 150 kg.
 2. Se coloca la probeta en el yunque para piezas cilíndricas logrando que la punta del penetrador quede en el centro de ella.
 3. Se aplica precarga de 10 kg aproximadamente, comprobando que la carátula del durómetro este calibrada a 0.

4. Se procede a aplicar la carga de 150kg.
5. Se obtiene el resultado de dureza.
6. Se retiró la probeta.
7. Esto se repitió tres veces en cada probeta tanto en la parte plana como en la parte cilíndrica, obteniendo de ellas un promedio.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4 Dureza medida.

Dureza de las distintas probetas de acero 1060				
	Probeta	Probeta	Probeta	Probeta
	1	2	3	4
Tiempo de calentamiento	0min	2min	3min	4min
Medio de temple	NA	Salmuera	Salmuera	Salmuera
Dureza en la parte lateral	12Rc	38Rc	40Rc	46Rc
Dureza en la cara plana	8Rc	16Rc	18Rc	31Rc

*A los resultados de dureza en la parte lateral cilíndrica de las probetas se les aplico el factor para piezas de 3/8plg, se le suman 3Rc

Como se puede denotar, la dureza del acero 1060 aumentó hasta 280% en la zona templada, quedando con una menor dureza en el centro de la barra, es decir se logra un buen temple superficial.

7.5. PRUEBA DE LONGITUD DE PENETRACIÓN DEL TEMPLE.

Después de temprar y pulir las tres probetas se procedió a realizar un macroataque durante 20 segundos con Nital al 2%, de acuerdo con la bibliografía consultada, la fase martensítica es más resistente al ataque que la perlita, por lo tanto, al observar la probeta, figura 7.7. en el centro se puede observar una zona más oscura, característico del ataque químico excesivo de la perlita, y a las orillas una zona mucho más clara que denota la presencia de otra fase, en este caso, la martensita.

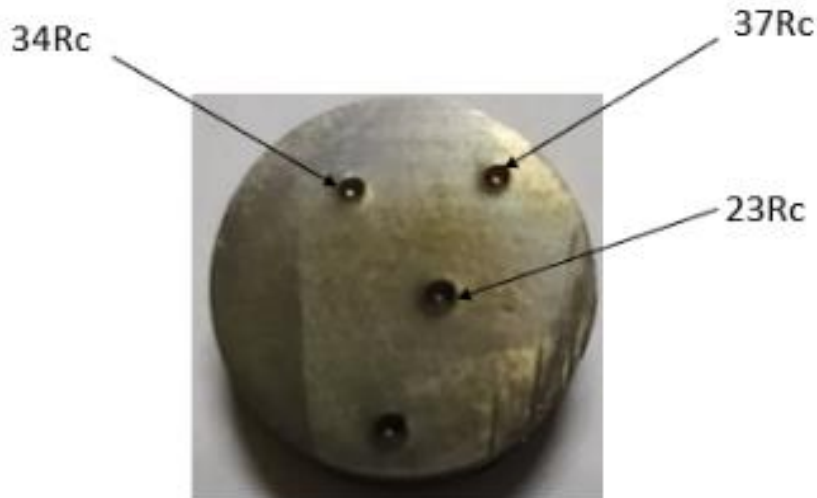


Figura 7.7. Probeta después de 15s de ataque químico con Nital 2%.

Como se puede observar se obtuvo una buena penetración de temple, aproximadamente 3.5mm en la parte más profunda, pudiendo decir que la zona endurecida no es uniforme, esto debido al mal centrado de la probeta en la bobina de calentamiento. Para comprobar la veracidad de la prueba del ataque químico, se realizaron varios ensayos de dureza en las distintas zonas, como se puede observar en la figura 7.7 correspondiendo los valores más elevados en las zonas más claras, en donde se presume la presencia de martensita

Lo que se muestra en la figura 7.7 sucede en las dos probetas restantes, es decir tienen la misma penetración de temple, pero debido a el tiempo de calentamiento y variaciones en el medio de temple se pueden obtener diferentes durezas, como se muestra a continuación.

7.6. RESUMEN.

La máquina de temple de calentamiento por inducción de alta frecuencia tiene limitantes y diversos factores que se deben de contemplar durante la utilización de la misa, ya que si se desatiende alguno de ellos los resultados no pueden ser favorables e incluso pueden llegar a dañar y dejar inservible a dicho artefacto, los factores son mencionados en el capítulo 6; atendiendo estos parámetros se realizaron las pruebas mencionadas con anterioridad.

Tomando como principal objetivo de esta máquina endurecer los aceros por medio del temple, en especial el temple superficial, las pruebas han sido exitosas, ya que se logró

endurecer el acero 1060 en un 280% obteniendo una dureza redituable, con una buena penetración (3.5mm aprox), es importante mencionar que, durante el temple de las dos probetas, no se observó deformación alguna, aunque son piezas de poca complejidad geométrica.

Otra de las grandes cualidades que se denotaron durante la realización de las pruebas es el no poder sobrecalentar el acero, ya que al llegar a una temperatura de aproximadamente 950°C esta no aumenta, debido a que el acero se convierte en un material amagnético.

En lo que respecta al tiempo de calentamiento, la máquina presenta un tiempo prolongado en comparación con máquinas industriales de este tipo, pero aun así es corto en comparación con una mufla eléctrica, la cual puede llegar a tardar hasta cinco veces más en calentar la misma probeta aunque para un temple completo; el tiempo que tarda en calentar la probeta es debido a la baja potencia de la fuente de poder (350W) la cual es casi tres veces menor que la de una mufla eléctrica de laboratorio, redituando así aún más en el consumo de energía eléctrica.

Aunque la máquina se puede utilizar con probetas de hasta 30cm de largo, al realizar las pruebas se observó que es mejor utilizar probetas cortas de aproximadamente 3cm de largo, ya que así se tiene una menor disipación de calor al ambiente.

Debido a el tiempo de espera entre ciclos de trabajo y a la limitación en el tamaño de las piezas a templar esta máquina no puede ser utilizada de manera industrial, pero complementa de manera importante la docencia asociada con el laboratorio de tecnología de materiales.

CONCLUSIONES.

Después del trabajo realizado se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- En el calentamiento por inducción electromagnética se puede controlar mejor la profundidad de calentamiento y con ello la profundidad de endurecimiento, debido a la rapidez con la que se lleva a cabo.
- El principal efecto que logra que las piezas a temprar se calienten, son las corrientes de Foucault, dejando de lado al efecto de histéresis con una menor presencia.
- Es necesario obtener un circuito puramente resistivo ya que así se obtiene la mayor cantidad de potencia disipada, por lo tanto, mayor aumento en la temperatura.
- Para la ubicación de componentes en el diseño se debe considerar la protección de los componentes electrónicos de la máquina, ya que en ella se alojan líquidos, los cuales pueden llegar a dañarlos, por lo que se optó por colocar el depósito de refrigerante hasta el fondo, donde si existe un escurrimiento fuga no habría daños severos, así también se tuvo especial cuidado en la verificación de fugas.
- La bobina Lp conduce corrientes relativamente altas y debido a su alta frecuencia, las perdidas aumentan en la trayectoria del conductor, por lo que debe de haber una distancia corta entre el circuito inversor y dicha bobina, es por lo que el circuito inversor debe viajar con la bobina.
- El equipo de temple por inducción de alta frecuencia resulta ser una maquina muy útil en empresas (aunque el equipo diseñado en esta tesis no, como ya se mencionó en el capítulo 7) y laboratorios universitarios, ya que realiza el proceso de temple superficial de una manera rápida, aunque es necesario tener en cuenta que la respuesta al calentamiento por inducción es mejor en materiales ferromagnéticos, las dimensiones de las piezas que se pueden temprar en el equipo y la geometría de la bobina necesaria y la profundidad de temple requerida.
- La velocidad de calentamiento que se logra en la maquina diseñada es 5 veces mayor que en una mufla eléctrica y con un menor consumo de energía.

- Para lograr calentar acero mediante inducción magnética es necesario lograr mínimo una frecuencia de resonancia de 60 kHz, mientras que la potencia que se puede suministrar al circuito inversor (teniendo en cuenta que sus componentes deben de soportar la corriente y el voltaje suministrado) será directamente proporcional al tamaño de las piezas que se pueden calentar.
- La máquina presentada en este trabajo es capaz de calentar una probeta de 30cm de largo, sin embargo, se obtienen mejores resultados de endurecimiento si se calientan probetas cortas de aproximadamente 3cm de largo, ya que así se logra tener una menor disipación de calor.
- De acuerdo con el diseño de esta máquina se puede calentar cualquier material ferromagnético siempre y cuando respete las dimensiones de las probetas, recalando que los tiempos de calentamientos y la dureza alcanzadas tienden a variar.
- Los aceros para herramienta son materiales que comúnmente contiene grandes cantidades de elementos de aleación, tendiendo a formar compuestos cerámicos, disminuyendo las propiedades magnéticas, al igual que los aceros inoxidable, los cuales tienen muy bajas propiedades magnéticas por lo que para efectos del diseño de esta máquina quedan descartados, ya que se requiere de gran potencia y elementos costosos, que, desde una perspectiva económica, no son factibles de emplear, prefiriéndose otros métodos de calentamiento.
- Para poder llevar a cabo el temple superficial es necesario lograr la temperatura de temple adecuada para un temple convencional, pero debido a los procesos de calentamiento, esta temperatura no debe de llegar al centro de la pieza, sino solo en la profundidad de temple que se desea obtener, tomando en cuenta que se debe de dar el tiempo necesario a la transformación martensítica.
- En el temple es necesario enfriar la pieza a una velocidad superior a la crítica, por lo que se diseñó un sistema de refrigerante eficiente (accionamiento rápido y abundante flujo de líquido).
- Debido a que los aceros que se contemplan temprar en la maquina diseñada son solo aceros simples, solo se diseña un sistema de refrigerante para agua y salmuera.

- Aunque el centro de la probeta también presenta aumento de dureza después del temple, este es mucho menor que la dureza alcanzada en la periferia.
- Se consiguió que el temple fuera más eficiente debido a la rapidez y la manera en la que se aplica el refrigerante, de ahí la importancia de implementar un sistema de control semiautomático.
- La máquina de temple mediante calentamiento por inducción de alta frecuencia diseñada en esta tesis es una buena opción para realizar pruebas de laboratorio con distintos materiales, recomendando un diámetro máximo de 10mm.

REFERENCIAS.

1. Acevedo Picón, A., Barrero Pérez, J., & Gélvez Figueredo, J. (2007). Calentamiento por inducción electromagnética: Diseño y construcción de un prototipo. *UIS Ingenierías*, 69-76.
2. Arias., A. G. (2008). *Laboratorio de ensayos industriales metales* (Decimo cuarta ed.). Buenos Aires: Nueva libreria.
3. Askeland, D. R. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales* (Septima ed.). México: CENGAGE Learning.
4. Barreiro, J. A. (2002). *Tratamientos termicos de los aceros* (Decima ed.). Madrid: DOSSAT 2000.
5. Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2010). *Engineering Materials properties and selection* (Ninth ed.). New Jersey: Prentice Hall.
6. Cain, T. (1995). *Endurecimiento, revenido y tratamiento termico*. México: Ediciones G. Gili.
7. Callister., W. D. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales* (Segunda ed.). México: REVERTÉ.
8. Elorz, J. A.-S. (2004). *Aceros Metalurgia física, selección y diseño*. Madrid: DOSSAT 2000.
9. Giraldo, A. V. (2009). *Tecnología del tratamiento térmico de los metales* (Segunda ed.). Medellin: Editorial Universidad de Antioquia.
10. Gonsález, J. L. (2006). *Metalurgia Mecánica*. México: Limusa.
11. Kreith, F. (2011). *Principles of heat transfer* (Seventh ed.). USA: CENGAGE Learning.
12. Maria Elena Sánchez Vergara, e. (2006). *Tratamientos termicos de la A a la Z*. México: trillas.
13. Ortega Alejos, J., & al., e. (2015). Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Fisico-Química. *Pistas educativas*, 641-664.
14. Rodríguez, D. C., & Díaz, F. (20 de Diciembre de 2019). *Facultad de Estudios Superiores departamento de ingeniería*. Obtenido de Ingeniería de materiales: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Ingenieria%20de%20materiales2017-1.pdf