

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un sistema para la elaboración de Placas Bipolares para un
prototipo de Celda de Combustible"

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

José Ignacio Díaz Pilpe

Luis Adrian Saavedra Romero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres, Luis y Silvia, pilares en mi formación personal y académica.

A mi hermano Eduardo por ser siempre mi ejemplo de dedicación y perseverancia y a Silvia, Elías y Luciana, esperando ser el suyo.

Luis Adrian Saavedra R.

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermanos, su apoyo incondicional a lo largo de mi vida me ha permitido seguir adelante y cumplir mis metas.

A la memoria de la Sra. Margarita Elizabeth Pilpe León, a quien recuerdo con amor diariamente.

José Ignacio Díaz P.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a cada uno de los profesores que me guiaron a lo largo de mi carrera. A mis tutores por su tiempo y acompañamiento en la realización de este proyecto. A mis amigos, por su incondicional apoyo en cada etapa vivida dentro de estos 5 años de estudio.

Luis Adrian Saavedra R.

Agradezco a Dios y a todos mis amigos por hacer de mi carrera universitaria una experiencia placentera de la cual me llevo muchos recuerdos y aprendizajes.

Especiales agradecimientos a los profesores Mayken Espinoza, Andrés Rigail, Jorge Amaya y Gonzalo Almeida por guiarme durante mi etapa como ayudante de investigación.

José Ignacio Díaz P.

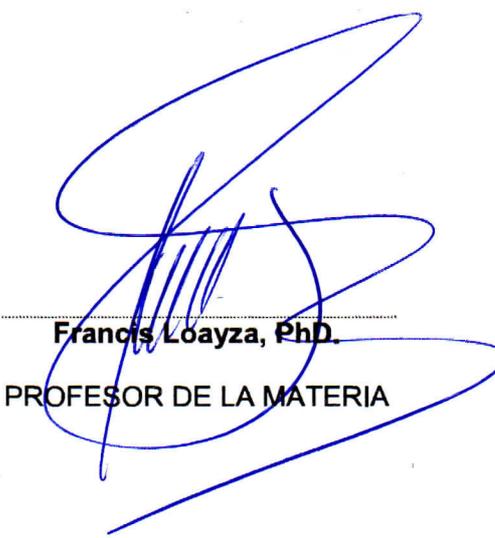
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *José Ignacio Díaz Pilpe* y *Luis Adrian Saavedra Romero* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"


José Ignacio Díaz P.


Luis Adrian Saavedra R.

EVALUADORES



Francis Loayza, PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA



Mayken Espinoza, PhD.

PROFESOR TUTOR



Andrés Rigall, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Numerosos estudios e investigaciones en la última década se encuentran destinados a la búsqueda de generación de energía limpia, razón por la cual las celdas de combustible están siendo centro de atención. Dado este precedente, el Laboratorio de Energías Renovables vio la necesidad de trabajar en el tema, por lo que se encuentra trabajando en el desarrollo de un prototipo de pila de celda de combustible. Siendo las placas bipolares uno de los componentes principales de las ya mencionadas celdas, se ha decidido diseñar un sistema para elaboración de placas bipolares usando un material compuesto de resina epóxica y refuerzos de grafito.

Se propuso realizar un sistema de compresión bajo temperatura, haciendo uso de materiales presentes en el mercado local, tales como acero ASTM A36, AISI 1020 y AISI 4340, así como también instrumentación para el control de temperatura. Se decidió hacer uso de un accionamiento hidráulico y cada elemento del sistema fue diseñado o seleccionado de acuerdo con su función dentro del mismo. Luego se realizó una simulación estructural para comprobar que el sistema no presente fallas mecánicas en ninguno de sus componentes, y una simulación térmica en estado estable para corroborar la distribución de temperatura durante la operación.

El sistema diseñado finalmente ocupa una superficie de 400 x 250 mm² y tiene una altura de 600 mm. El diseño no cuenta con uniones permanentes, lo cual permite que cada elemento de este pueda ser reemplazado sin problema y finalmente el costo de fabricación del sistema es de \$1,714.59.

Palabras Clave: Celda de combustible, Placa bipolar, Molde, Resina epóxica, Grafito.

ABSTRACT

Numerous studies and investigations in the last decade are aimed at the search for clean energy generation, which is why fuel cells are the focus of attention. Given this precedent, the Renewable Energy Laboratory saw the need to work on the topic, so it is working on the development of a fuel cell prototype. Since the bipolar plates are one of the main components of the cells, it has been decided to design a system for the fabrication of bipolar plates using an epoxy composite material and graphite reinforcements.

It was proposed to realize a compression system under temperature, making use of materials present in the local market, such as steel ASTM A36, AISI 1020 and AISI 4340, as well as instrumentation for temperature control. It was decided to use a hydraulic drive and each element of the system was designed or selected according to its function within it. Then a structural simulation was carried out to verify that the system does not present mechanical failures in any of its components, and a thermal simulation in a stable state to corroborate the temperature distribution during the operation.

The system finally designed occupies a surface of 400 x 250 mm² and has a height of 600 mm. The design does not have permanent unions, which allows that each element of this can be replaced without problem and finally the manufacturing cost of the system is \$ 1,714.59.

Keywords: *Fuel cell, Bipolar plate, Mold, Epoxy resin, Graphite.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Placas Bipolares	3
1.4.2 Moldeo por Compresión de elementos compuestos	4
1.4.3 Datos de Compresión para la Fabricación de Placas Bipolares	5
CAPÍTULO 2.....	7
2. Metodología	7
2.1 Requerimientos del Sistema.....	7
2.2 Selección de la configuración general del sistema.....	10
2.2.1 Configuración general del set de datos.....	10
2.2.2 Selección de elementos de transmisión de fuerza.....	17
2.3 Diseño conceptual.....	21

2.4	Dimensionamiento y diseño de elementos del sistema	23
2.4.1	Selección de material.....	23
2.4.2	Cálculo del espesor mínimo de las zapatas del dado	24
2.4.3	Cálculo del esfuerzo máximo en las zapatas del dado	24
2.4.4	Cálculo del diámetro de los pines guías	24
2.4.5	Dimensionamiento de sección roscada en los pines	25
2.4.6	Cálculo de esfuerzos en las tuercas	26
2.4.7	Selección de bocines	26
2.4.8	Cálculo de la potencia requerida en la resistencia eléctrica	27
2.5	Simulación Computacional	27
2.5.1	Análisis estructural.....	27
2.5.2	Análisis temperatura en estado estable.	28
2.6	Diseño del sistema de control de temperatura	28
2.7	Estimación de Costos.....	28
CAPÍTULO 3.....		30
3.	Resultados y Análisis.....	30
3.1	Cálculo de fuerza requerida por el sistema	30
3.2	Cálculo del espesor mínimo de las zapatas	30
3.3	Cálculo del esfuerzo máximo en las zapatas	31
3.4	Cálculo del diámetro de los pines guía.....	32
3.5	Dimensionamiento de elementos roscados.....	33
3.5.1	Cálculo del esfuerzo cortante en los hilos de los pines.....	33
3.5.2	Cálculo de esfuerzo de aplastamiento en los hilos de los pines	33
3.6	Cálculo de esfuerzos en las tuercas.....	35
3.6.1	Selección del grado de material de las tuercas.....	35
3.6.2	Cálculo del esfuerzo cortante en los hilos de la tuerca.....	35
3.7	Cálculo de la potencia requerida por la resistencia	36

3.8	Diseño final.....	36
3.8.1	Modelo CAD del Dado de Compresión	37
3.9	Simulación Computacional	39
3.9.1	Simulación Estructural	40
3.9.2	Simulación térmica en estado estable	45
3.10	Diseño del sistema de control de temperatura	47
3.11	Estimación de Costos.....	48
3.11.1	Costos de Materiales	48
3.11.2	Costos de Mecanizado	49
CAPÍTULO 4.....		50
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	50
4.1	Conclusiones.....	50
4.2	Recomendaciones.....	51
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
FREE	Fuentes Renovables de Energía
US DOE	Departamento de Energía de Estados Unidos
PCC	Pila de Celda de Combustible
PEM	Proton Exchange Membrane
TS	Polímero Termofijo
ASTM	American Society for Testing and Materials

SIMBOLOGÍA

H ₂	Hidrógeno
O ₂	Oxígeno
S	Siemen
cm	Centímetro
MPa	Megapascal
W	Watt
m	Metro
μA	Microamstrong
kg	Kilogramo
kW	kilowatt
s	Segundo
°C	Grado Celsius
atm	Atmósfera
Pa	Pascal
psi	Libra por pulgada cuadrada
mm	Milímetro
μm	Micrómetro
N	Newton
in	Pulgada
K	Kelvin
kN	Kilonewton
GPa	Gigapascal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Moldeo por compresión de PMC. [Groover]	5
Figura 1.2 Esquema de un dado compuesto [Handbook of Die Design]	6
Figura 2.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño	8
Figura 2.2 Esquema básico del sistema.....	9
Figura 2.3 Diseño sugerido por la norma ASTM D5224-12 [ASTM International]	10
Figura 2.4 Zapata tipo abierta.....	11
Figura 2.5 Zapata tipo pilar.....	12
Figura 2.6 Juego de zapatas con dos seguidores	14
Figura 2.7 Juego de zapatas con cuatro seguidores	15
Figura 2.8 Proyección de una de las caras de una placa bipolar	17
Figura 2.9 Stack de prueba de celda de combustible [Lab. FREE (2018)]	18
Figura 2.10 Placa bipolar comercial (sin escala) [Lab. FREE (2018)]	18
Figura 2.11 Gata hidráulica ubicada dentro del sistema.....	19
Figura 2.12 Prensa mecánica accionada con tornillos de potencia.....	20
Figura 2.13 Diseño Conceptual del Sistema (Vista Frontal)	22
Figura 2.14 Diseño Conceptual del Sistema (Vista Isométrica).....	22
Figura 3.1 Diseño final del sistema.....	37
Figura 3.2 Vista en explosión de la mitad superior del dado	38
Figura 3.3 Vista en explosión de la mitad inferior del dado	38
Figura 3.4 Modelo 3D completo del dado de compresión	39
Figura 3.5 Mallado de la geometría del sistema	40
Figura 3.6 Reacciones que actúan en el sistema	41
Figura 3.7 Coeficiente de seguridad global de las zapatas	41
Figura 3.8 Deformación presente en las zapatas	42
Figura 3.9 Coeficiente de seguridad global de los pines seguidores.....	43
Figura 3.10 Deformación presente en los pines seguidores.....	44
Figura 3.11 Coeficiente de seguridad global de las tuercas	44
Figura 3.12 Deformación presente en las tuercas	45
Figura 3.13 Mallado de la geometría del Dado de Compresión.....	46
Figura 3.14 Distribución de temperatura en estado estable	46
Figura 3.15 Conexiones del sistema de control de temperatura [Fritzing]	47
Figura 3.16 Esquema del sistema de control de temperatura [Fritzing].....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Requerimientos Sugeridos por la US DOE para placas bipolares	4
Tabla 2.1 Criterios de evaluación para el tipo de zapata del sistema.....	13
Tabla 2.2 Matriz de decisión para el tipo de zapata del sistema	13
Tabla 2.3 Criterios de evaluación para número de pines guías del sistema.....	16
Tabla 2.4 Matriz de decisión para el número de pines guías del sistema	16
Tabla 2.5 Criterios de evaluación para el elemento de transmisión de fuerza	21
Tabla 2.6 Matriz de decisión para el elemento de transmisión de fuerza	21
Tabla 3.1 Materiales considerados para la construcción del sistema.....	49
Tabla 3.2 Mecanizado de piezas del sistema	49

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Sistema de Compresión bajo temperatura
PLANO 2	Dado Superior
PLANO 3	Placa Positiva
PLANO 4	Base de Dado Superior
PLANO 5	Dado Inferior
PLANO 6	Placa Negativa
PLANO 7	Placa Lisa
PLANO 8	Base de Dado Inferior
PLANO 9	Zapata Superior
PLANO 10	Zapata Inferior
PLANO 11	Cojinete
PLANO 12	Pin Seguidor
PLANO 13	Base

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Una celda de combustible es un dispositivo electromecánico que convierte la energía química presente en una sustancia, que actúa como combustible, en energía eléctrica y calor sin emitir gases contaminantes, en un proceso limpio y amigable con el ambiente [Rayment & Sherwin, 2003]. El combustible usado por estos dispositivos es el Hidrógeno (H_2), o cualquier otro compuesto que contenga H_2 , y el Oxígeno (O_2) que reaccionan dentro de la celda produciendo agua como residuo durante una reacción de combustión [Greenwood, 2010]. Las celdas de combustible son clasificadas principalmente de acuerdo con el electrolito usado en sus sistemas; siguiendo este criterio, actualmente existen seis diferentes tipos de celdas de combustibles: Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), Alkaline Fuel Cell (AFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) y Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), cada tipo de celdas opera a temperaturas diferentes y son empleadas para aplicaciones específicas [Johnson, 2009]. Los componentes principales de la celda de combustible son: i) Electrodo, ii) Electrolito, iii) Capa Difusora de Gases, iv) Capa Catalizadora y v) Placas Bipolares; de entre todos ellos, las placas bipolares destacan entre ellos debido a la función que tienen dentro de estos sistemas; siendo los encargados de otorgar rigidez, ser los medios de conducción de la electricidad generada y servir como canales de circulación de los fluidos (gases) de operación del dispositivo, además de ser uno de los componentes más caros de fabricar junto con las capas catalizadoras [Larminie & Dicks, 2003]. Las placas bipolares pueden ser fabricadas bajo distintos procesos (Mecanizado, inyección, compresión en caliente, etc.) empleando distintos materiales (metálicos y materiales compuestos).

1.1 Descripción del problema

El estudio que se está desarrollando en el Laboratorio de Energías Renovables (Lab. FREE) denominado: *“Desarrollo de Prototipo de Pila de Celdas de Combustible (PCC) tipo PEM para uso estacionario”*, busca evaluar la posibilidad del uso de un material compuesto de resina epóxica y grafito expandido como materia prima para la fabricación de placas bipolares, elementos fundamentales dentro del prototipo de celda de combustible que se

pretende construir. Los resultados publicados en la tesis de K. Leal & J. Medina [Leal & Medina, 2018], donde se realizaron estudios experimentales y se fabricaron probetas para distintas pruebas a partir del material compuesto antes mencionado, muestran que sus propiedades mecánicas se encuentran dentro del rango sugerido por el Departamento de Energía de Estados Unidos (US DOE) y las propiedades eléctricas son similares a las presentes en placas bipolares comerciales. Estos resultados han motivado al Lab. FREE a elaborar placas bipolares a partir de este compuesto, sin embargo, el sistema que se usó para la fabricación de las probetas no tiene la capacidad para fabricar las placas bipolares deseadas debido a que no existe suficiente espacio para alojar una nueva cavidad con la forma de estas. Los responsables han concluido que requieren el diseño de un nuevo sistema que permita fabricar placas bipolares, teniendo en cuenta las condiciones de operación bajo las que fueron elaboradas las probetas y corrigiendo los problemas que se presentaron durante la fabricación de estas. Los detalles del proceso de fabricación de las probetas y las recomendaciones hechas sobre el mismo se encuentran en la tesis mencionada anteriormente.

1.2 Justificación del proyecto

Para continuar con el estudio, se necesita comprobar el comportamiento de las placas bipolares fabricadas con este material al operar dentro de una pila de celda de combustible. Para lograrlo, las placas serán sometidas a pruebas dentro del equipo Fuel Cell Module FC50, presente en las instalaciones del Lab. FREE y se comparará su rendimiento con placas bipolares presentes en el mercado y aquellas reportadas en artículos científicos empleando otros materiales o similares.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseño de un sistema para la elaboración de placas bipolares a partir de un material compuesto con matriz polimérica mediante un proceso de compresión en caliente.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseño de la configuración general del set de dado de compresión.

2. Diseño del dado para la fabricación de placas bipolares mediante compresión en caliente.
3. Diseño del sistema de control de temperatura.
4. Realizar una simulación estructural del sistema.
5. Realizar una simulación de la distribución de temperatura en estado estacionario del dado de compresión.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Placas Bipolares

Las placas bipolares son uno de los elementos más importantes dentro de la celda de combustible, contribuyen aproximadamente al 80% del peso total de la celda y alrededor del 45% de los costos de fabricación [Herman, Chaudhuri & Spagnol, 2005]. Las principales funciones que cumplen las placas bipolares dentro de la celda son: i) Distribuir uniformemente el combustible y el oxidante, ii) Evitar el contacto entre los gases en el ánodo y el cátodo, iii) Conducir los electrones liberados en la reacción, iv) Descargar el agua producida en la reacción y v) Otorgar rigidez y resistencia mecánica al sistema [Planes, Flandin & Arberola, 2012].

Los materiales usados para la fabricación de placas bipolares pueden ser clasificados de forma general en: i) No metales: grafito y electro-grafito no poroso, ii) Metales y ii) Materiales Compuestos: polímero-carbono y polímero-metal. Tradicionalmente el material más común usado en la fabricación de placas bipolares es el grafito ya sea natural o sintético, debido a su estabilidad química y a su alta conductividad eléctrica. Sin embargo, el uso de grafito como única materia prima eleva los costos de producción de placas bipolares y provoca bajas resistencias mecánicas en la misma. El acero inoxidable, aluminio, titanio y níquel son alternativas a emplearse en la fabricación de placas bipolares entre los materiales metálicos, debido a su estabilidad y resistencia mecánica, conductividad eléctrica y la capacidad que tienen de tomar formas deseadas mediante conformado o mediante mecanizado, lo que facilita la formación de los canales de flujo en las placas. Actualmente los materiales compuestos a base de una matriz polimérica complementada con el uso de carbono constituyen la mejor opción como materia prima para la elaboración de

placas bipolares debido a su bajo peso, la facilidad con la que estos compuestos pueden moldearse para adoptar cualquier forma y sus propiedades mecánicas y eléctricas que pueden ser mejoradas mediante la combinación de diferentes materiales a base de carbono junto a la matriz polimérica [Herman, Chaudhuri & Spagnol, 2005]. Las placas bipolares, según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), deben cumplir con ciertas propiedades para ser operativamente eficientes, las cuales son mostradas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Requerimientos Sugeridos por la US DOE para placas bipolares [US DOE]

Propiedad	Valor
Máxima conductividad eléctrica	> 100 S/cm
Máximo esfuerzo de flexión	> 25 MPa
Máxima conductividad térmica	> 10 W/m K
Máxima resistencia a la corrosión	< 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Bajo peso	< 0.4 kg/kW
Baja permeabilidad de los gases	< 2 x 10 ⁶ cm ³ /s cm ² a 80°C y 3 atm.

1.4.2 Moldeo por Compresión de elementos compuestos con matriz polimérica

Consiste en colocar el material de trabajo en la sección inferior de un molde formado por dos secciones, las cuales se cierran bajo presión provocando que el material adopte la forma de la cavidad en la que se encuentra. Las dos secciones del molde son sometidas a temperatura para iniciar el proceso de curado del polímero termofijo (TS). Cuando el material ha curado lo suficiente, el molde es abierto y la nueva pieza es retirada [Groover, 2007]. La Figura 1.1 muestra el proceso brevemente de forma secuencial.

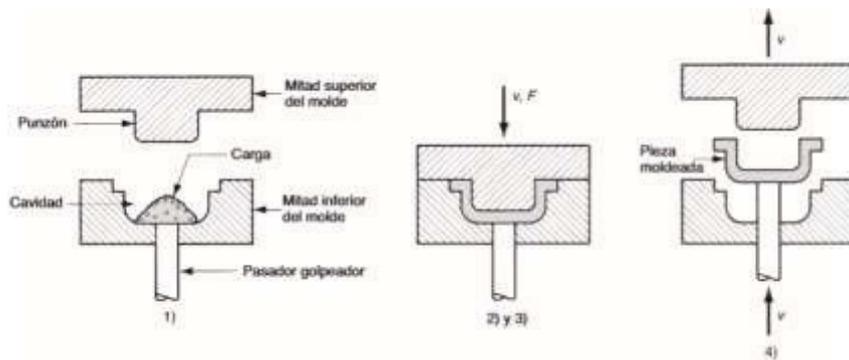


Figura 1.1 Moldeo por compresión de PMC. 1) se introduce el material; 2) y 3) el material se comprime y se cura; y 4) la pieza formada es retirada.

[Groover, 2007]

1.4.3 Datos de Compresión para la Fabricación de Placas Bipolares

Los dados utilizados en el proceso de prensado en caliente con el que se fabrican placas bipolares son conocidos como dados de compresión. Estos dados, como lo dice su nombre, comprimen al material y lo hacen fluir en su cavidad hasta llenarla por completo, adoptando la forma deseada. Son diseñados de tal manera que pueden operar bajo distintas presiones y, en algunos casos, bajo altas temperaturas según lo requiera el proceso de conformado [Suchy, 1994]. Tal como se muestra en la Figura 1.2, un juego o set de dado está compuesto por:

- Zapato inferior y superior: ambos maquinados para ser paralelos, el zapato superior normalmente cuenta con un mango, mediante el cual puede ser acoplado a la prensa.
- Pasadores o pines guías: son las partes encargadas de mantener los zapatos alineados durante la operación, se encuentran empotrados en el zapato inferior, mientras que en el superior se encuentran unos cojinetes para permitir el deslizamiento.
- Bloque de dado: se encuentra en el zapato inferior y aquí se encuentran los botones del dado y almohadillas de resorte principalmente.
- Plato de golpe: es el equivalente al bloque del dado, con diferencia de que se encuentra en el zapato superior.

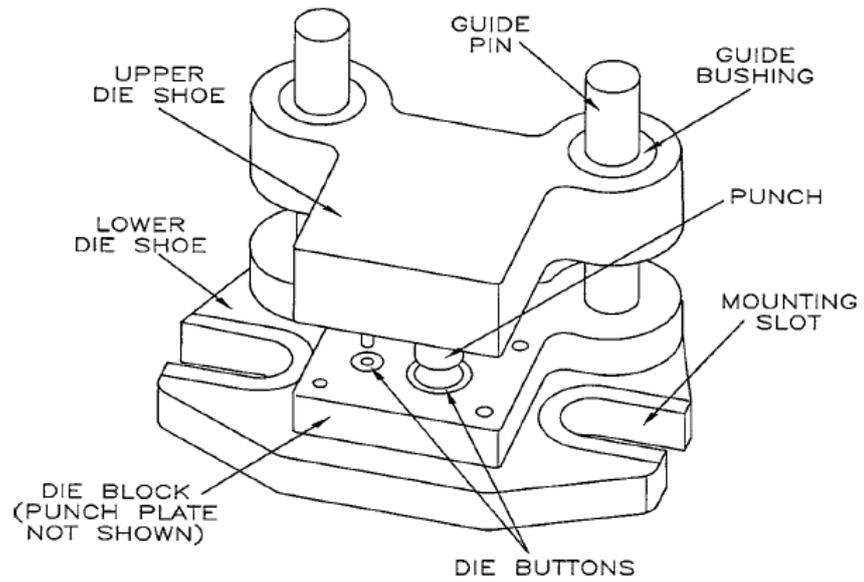


Figura 1.2 Esquema de un dado compuesto y sus partes [Suchy, 1994]

En este documento se tratará el diseño de un sistema para la fabricación de placas bipolares mediante el uso de un dado de compresión a partir de un material compuesto con matriz polimérica.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló por etapas, las cuales se encuentran resumidas en el diagrama de flujo presente en la figura 2.1. La primera etapa consistió en determinar las especificaciones de diseño con base a los requerimientos del sistema establecidos por el cliente. En la segunda etapa se realizó la selección de la configuración general del set de dado de compresión y la selección del sistema de transmisión de fuerza, dando como resultado el diseño conceptual del sistema. En la tercera etapa se realizó el diseño detallado, donde se seleccionó el material y se dimensionó los elementos de forma que se evite las posibles fallas mecánicas que puedan sufrir durante su operación. En la cuarta etapa se comprobó mediante una simulación computacional el correcto dimensionamiento y diseño de los elementos que conforman el sistema, adicionalmente se realizó el diseño del sistema de control de temperatura. Finalmente, la quinta y última etapa correspondió a la elaboración de una estimación de costos del sistema.

2.1 Requerimientos del Sistema

Las placas bipolares se pretenden fabricar a partir de un material compuesto de una resina epóxica (polímero termoestable) reforzada con partículas de grafito. La viscosidad de corte (dinámica) de este compuesto antes de someterse al moldeo por compresión es aproximadamente 35.000 Pa-s (35 veces mayor a la del agua pura a temperatura ambiente), lo que hace que el material tenga una consistencia similar a la de la arena mojada según se describe en la tesis de Leal & Medina [5]. En la sección de Anexos se encuentran las fichas técnicas de las sustancias que conforman el compuesto antes mencionado.

El sistema que se diseñará para la fabricación de las placas bipolares deberá moldear la materia prima bajo presión constante a una temperatura determinada. Para poder cumplir con estos parámetros, el sistema necesita contar con un dado de compresión que soporte las presiones y temperaturas de operación, zapatas para sujetar las secciones del dado, una fuente de calor para llegar a las temperaturas de operación, un sistema que transmita la fuerza necesaria para ejercer la presión de moldeo, un juego de seguidores o sistema que permita el

correcto alineamiento entre las mitades del dado y un sistema que permita controlar la temperatura de operación. Un esquema del sistema con los elementos básicos del sistema antes mencionados se presenta en la figura 2.2.

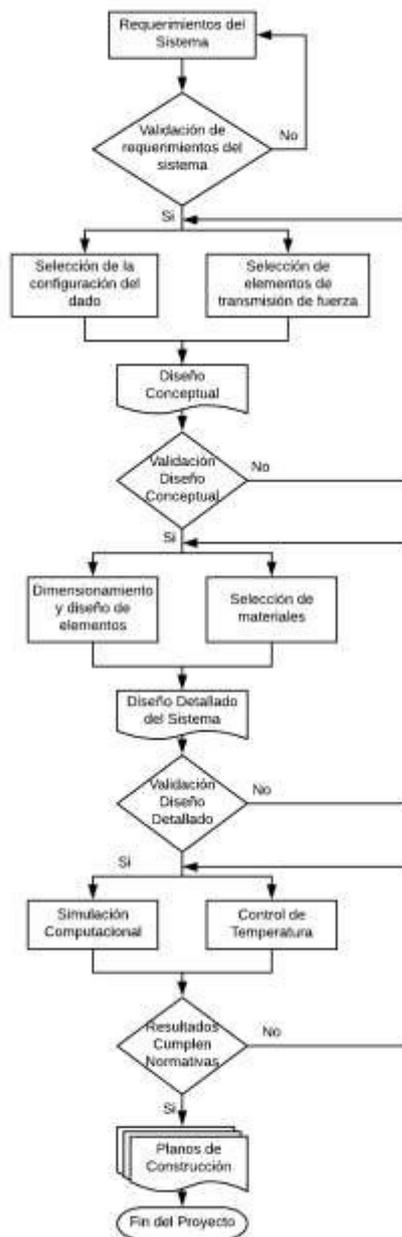


Figura 2.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño

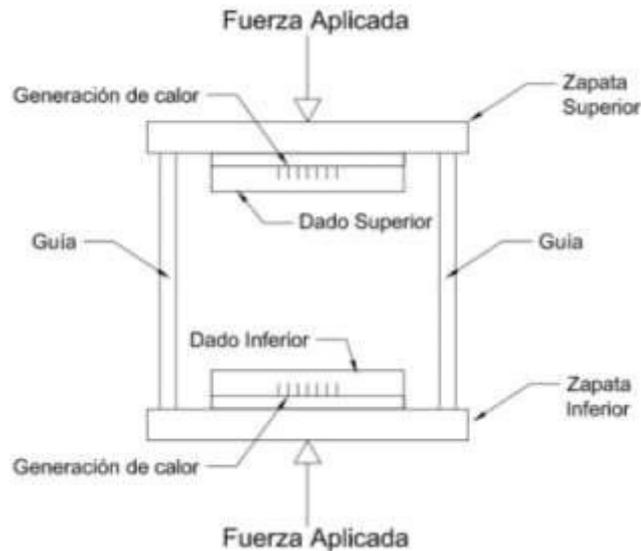


Figura 2.2 Esquema básico del sistema

A continuación, se detallan los requerimientos del sistema establecidos por el cliente, los cuales se dividieron en dos grupos: Requerimientos de Diseño y Requerimientos de Operación.

Requerimientos de Diseño:

1. Emplear la norma ASTM D5224 – 12: Standard Practice for Compression Molding Test Specimens of Thermosetting Molding Compounds para el diseño del dado de compresión [ASTM, 2012].
2. El sistema debe ser fácilmente desmontable para ser ubicado en cualquier sitio del Laboratorio de Ensayos Metalográficos, para facilidad de mantenimiento y/o reemplazo de algún elemento.
3. El diseño debe facilitar la extracción de la pieza moldeada.

Requerimientos de Operación:

1. El material debe ser moldeado a presiones entre 2000 y 3000 psi.
2. La temperatura de operación en la cavidad de moldeo deberá alcanzar al menos los 150 °C, aunque se opere entre los rangos de 90 a 110 °C. Será necesario un sistema de control que permita mantener la temperatura en el rango antes mencionado.
3. El sistema debe producir al menos dos muestras por operación.

2.2 Selección de la configuración general del sistema.

En esta sección se muestra la selección de la configuración general del set de dado, la selección del sistema de transmisión de fuerza y se muestra el diseño conceptual del sistema.

2.2.1 Configuración general del set de dados

A continuación, se definen las características del dado de compresión, la selección del tipo de zapata, la selección del juego de guías y la selección del tipo de bocines a emplear en el sistema.

2.2.1.1 Características del dado de compresión

El diseño del dado de compresión se basó en lo sugerido por la norma ASTM D5224-12, que establece el procedimiento a seguir para la elaboración de probetas hechas con materiales termoestables moldeadas bajo compresión. Aquellas características que fueron tomadas en cuenta para este proyecto se detallan a continuación:

1. El diseño del dado se basó en el mostrado en la figura 2.3. Este diseño consiste en un dado de tres placas, donde una de las placas es considerada como flotante y es donde se aloja el material, las dos placas restantes (superior e inferior) realizan la presión sobre el material que toma la forma que genera la placa flotante.

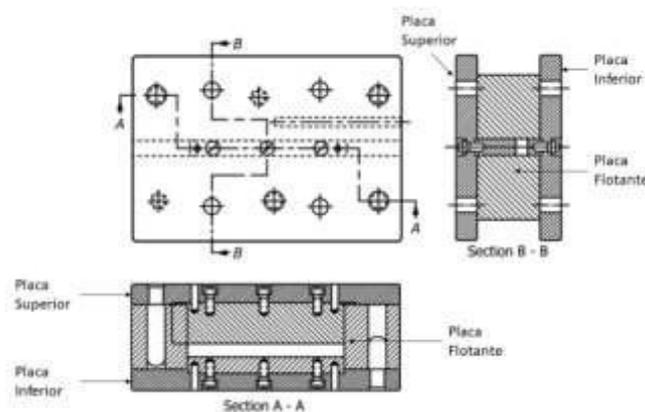


Figura 2.3 Diseño sugerido por la norma ASTM D5224-12 [ASTM, 2012]

2. El claro entre la pared vertical de la cavidad y la pared que transmite la fuerza al material es de 0.1 mm.
3. El acabado superficial de las superficies que están en contacto con el material tiene una rugosidad de 0.8 μm , logrado mediante un cromado.
4. El ángulo de desmoldeo empleado es de 3°.
5. El calor requerido por el sistema será generado por una resistencia eléctrica como lo sugiere la norma.

El diseño detallado del dado se encuentra en la sección 3.8.1.

2.2.1.2 Selección del tipo de zapata

Las zapatas inferior y superior del set de dado pueden ser de tipo abierto o de tipo pilar. Las alternativas para la mejor opción de zapata que operará en el sistema se escogieron con base a esta clasificación:

- **Alternativa A:** Zapata de tipo abierta como la mostrada en la figura 2.4; no tiene pines seguidores y es adecuada para la fabricación de piezas poco complejas y en una baja cantidad, son las zapatas más económicas que se pueden fabricar.

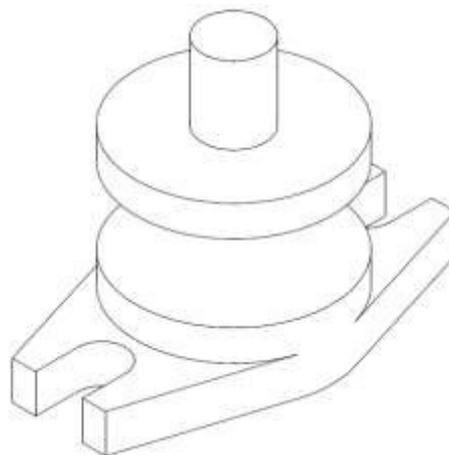


Figura 2.4 Zapata tipo abierta

- **Alternativa B:** Zapata tipo pilar como la mostrada en la figura 2.5; cuentan con un juego de pines seguidores y son adecuadas para la fabricación de piezas complejas y simples, su costo es mayor a las

zapatas de tipo abierto dependiendo del número de seguidores con los que cuenta el sistema y la precisión que se requiera.

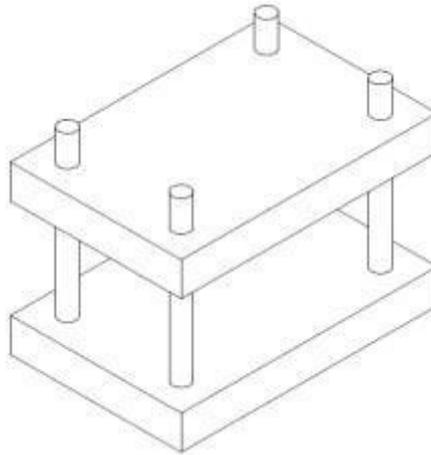


Figura 2.5 Zapata tipo pilar

Algunos de los criterios de evaluación para la selección del tipo de zapata fueron:

- **Ajuste entre los elementos guías:** hace referencia a la tolerancia que debe existir entre los elementos como pines guías y bocines (en el caso de las zapatas tipo pilar) o el alineamiento mínimo de las zapatas inferior con respecto a la superior (en el caso de zapatas abiertas); mientras menor sea la tolerancia requerida entre elementos, el sistema es más fácil de construir.
- **Peso otorgado al sistema:** considera el peso que se sumaría al sistema empleando cada una de las alternativas; mientras menor sea el peso del sistema, es más fácil de transportar.
- **Complejidad de las piezas fabricadas:** evalúa que tan compleja puede ser la geometría de la pieza que se puede fabricar con cada una de las alternativas. Por ejemplo: piezas con sección transversal constante, filos rectos, filos redondeados, ranuras, etc.; mientras mayor es la complejidad de las piezas que se puedan fabricar, el

producto final requerirá menos de un proceso secundario como el mecanizado para lograr su forma final.

- **Costos:** hace referencia al costo total que le sumaría al proyecto emplear uno u otro tipo de zapata.

De los criterios antes mencionados, los detallados en la tabla 2.1 son aquellos que se consideró más relevantes y se les dio una ponderación mayor o menor por orden de importancia arbitraria. La matriz de decisión de la mejor alternativa se encuentra en la tabla 2.2.

Tabla 2.1 Criterios de evaluación para el tipo de zapata del sistema

Criterio de evaluación	Ponderación
Complejidad de las partes fabricadas	60
Peso otorgado al sistema	20
Costo	20

Tabla 2.2 Matriz de decisión para el tipo de zapata del sistema

Criterio de evaluación	Ponderación	A	B
Complejidad de las partes fabricadas	60	30	60
Peso otorgado al sistema	20	20	10
Costo	20	20	10
Total		70	80

Como se puede observar en la tabla 2.2, la alternativa B tuvo la ponderación más alta, por lo tanto, se decidió emplear una zapata tipo pilar para este sistema, lo cual permitirá crear placas bipolares con geometrías más complejas sin depender de un proceso secundario de fabricación, pero el sistema será más pesado y más costoso.

2.2.1.3 Selección del número de pines guía

La configuración de 2 guías o pines seguidores es la más común en un set de dado; sin embargo, cuando un mayor alineamiento entre las mitades del

dado es requerido, una configuración de 4 guías es recomendada. A continuación, se presentan las alternativas de solución:

- **Alternativa A:** Combinación de 2 guías o seguidores como se muestra en la figura 2.6; los seguidores para esta alternativa tienen un diámetro mayor debido a que las cargas que deben soportar, peso zapata superior, peso de dado superior y la fuerza que se transmite en el sistema se reparten uniformemente entre las dos. Esta configuración ofrece la menor estabilidad y alineamiento entre las mitades del dado, pero es la alternativa más económica.

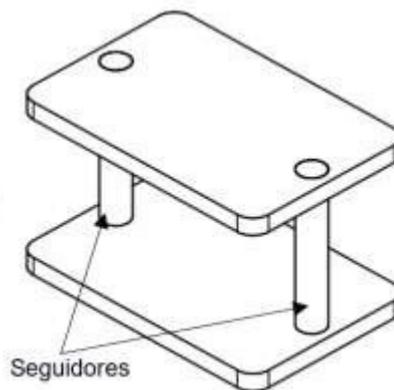


Figura 2.6 Juego de zapatas con dos seguidores

- **Alternativa B:** Combinación de 4 guías o seguidores como se muestra en la figura 2.7; los seguidores en esta alternativa tienen un menor diámetro debido a que las cargas son distribuidas uniformemente entre los 4. Esta configuración ofrece mejor estabilidad debido al mayor número de seguidores que a su vez mejoran el alineamiento entre las mitades del dado, pero es la alternativa menos económica.

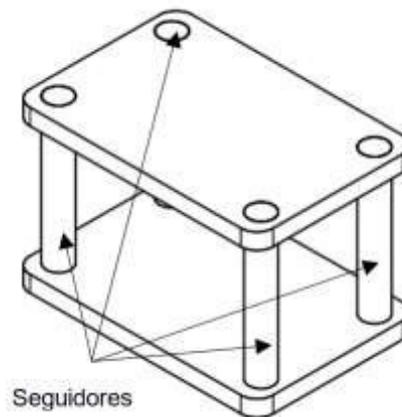


Figura 2.7 Juego de zapatas con cuatro seguidores

Algunos de los criterios de evaluación para la selección del número de pines guías fueron:

- **Alineamiento:** considera el alineamiento entre las mitades del dado entre ambas alternativas. Al aumentar el número de guías, el sistema asegura un mejor alineamiento mientras una de las mitades del dado se mueve hasta ejercer la presión sobre el material ubicado en la segunda mitad.
- **Estabilidad:** evalúa el posible movimiento del sistema mientras una de las mitades del dado se encuentra en desplazamiento paralelo a los ejes de los seguidores. Con un mayor número de seguidores el sistema tendería a moverse menos durante la carrera de operación de una de las mitades del dado.
- **Distribución de las cargas:** hace referencia a que, al aumentar el número de seguidores, el diámetro mínimo requerido por los mismos disminuye debido a que la carga que soportan durante la operación del sistema se ve reducida al repartirse entre los seguidores.
- **Costos:** se refiere al costo total que le sumaría al proyecto emplear un determinado número de seguidores.

En este caso todos los criterios antes mencionados se los consideró como más relevantes y se les dio una ponderación mayor o menor por orden de importancia de manera arbitraria como se muestra en la tabla 2.3. La matriz de decisión de la mejor alternativa se encuentra en la tabla 2.4.

Tabla 2.3 Criterios de evaluación para número de pines guías del sistema

Criterio de evaluación	Ponderación
Distribución de cargas	40
Estabilidad	25
Alineamiento	25
Costo	10

Tabla 2.4 Matriz de decisión para el número de pines guías del sistema

Criterio de evaluación	Ponderación	A	B
Distribución de cargas	40	30	40
Estabilidad	25	17	25
Alineamiento	25	20	25
Costo	10	10	5
Total		77	95

Como se puede observar en la tabla 2.4, la alternativa B tuvo la ponderación más alta, por lo tanto, se decidió emplear un juego de 4 seguidores donde se distribuirán de mejor manera las cargas y asegurará un menor diámetro de los seguidores en comparación con la alternativa A. La alternativa B también asegura una mejor estabilidad y alineamiento entre las partes durante su operación, aunque el sistema es más costoso.

2.2.1.4 Selección de bocines

Los bocines son elementos que trabajan junto a los seguidores o pines guías para permitir el desplazamiento de otros elementos sobre los mismos, disminuyendo la fricción entre las superficies que se desplazan. El manual de diseño de dados [Suchy, 1994] recomienda el uso de rodamientos para aplicaciones que no sean dados de corte o perforación y trabajen con materiales con un espesor mayor a 0.38 mm. Sin embargo, el uso de rodamientos aumentaría considerablemente el costo del sistema, por lo tanto, se decidió el uso de cojinetes de superficie lisa.

2.2.2 Selección de elementos de transmisión de fuerza

Para seleccionar el tipo de elemento de transmisión de fuerza del sistema, fue necesario conocer la fuerza que debe actuar en el mismo para llegar a la presión de operación máxima de 3000 psi establecida en los requerimientos del sistema en la sección 2.1. Se define a la presión como la relación entre la fuerza y un área perpendicular a la dirección donde actúa la misma:

$$P_s = \frac{F_s}{A_{bp}} \quad (2.1)$$

Donde P_s es la presión de operación del sistema [Pa], F_s es la fuerza que actúa sobre el sistema [N] y A_{bp} es el área proyectada [m²] de una cara de la placa bipolar como se muestra en la figura 2.8.

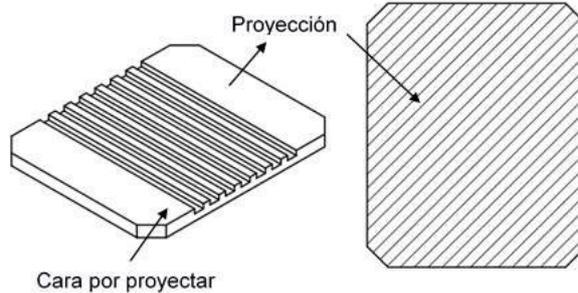


Figura 2.8 Proyección de una de las caras de una placa bipolar

Las placas bipolares fabricadas por el sistema serán probadas en el stack de celda de combustible presente en la figura 2.9.

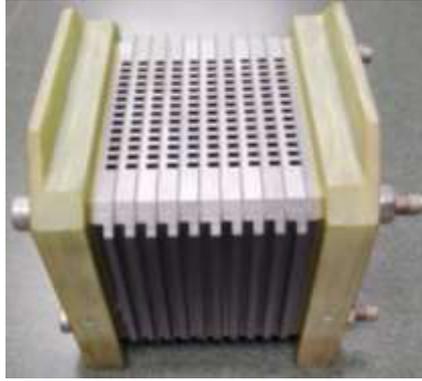


Figura 2.9 Stack de prueba de celda de combustible [Lab. FREE, 2018]

Este stack sirve para probar placas bipolares comerciales como la que se encuentra en la figura 2.10, en consecuencia, las placas bipolares fabricadas tendrán una geometría y medidas iguales a estas placas comerciales para que puedan ser probadas.



Figura 2.10 Placa bipolar comercial (sin escala) [Lab. FREE, 2018]

El área superficial de las placas bipolares comerciales fue calculada mediante un dibujo CAD como el presente en la figura 2.6 y es de $5.96E-3 \text{ m}^2$ (9.24 in^2). El sistema producirá hasta un máximo de 2 placas bipolares por proceso según lo acordado con el cliente, por lo tanto, al valor del área proyectada será multiplicada por 2, $A_{bp} = 11.92E-3 \text{ m}^2$ (18.48 in^2).

Reordenando la ecuación 1 y reemplazando A_{bp} por el valor antes mencionado fue posible determinar que la fuerza necesaria para que el sistema opere es de 25 toneladas, el cálculo de la fuerza requerida se encuentra en la sección 3.1. Teniendo en cuenta esta información, se procedió a evaluar la mejor alternativa para el elemento de transmisión de fuerza del sistema. Las alternativas fueron:

- **Alternativa A:** Gata hidráulica como la presente en la figura 2.11; estos elementos se encuentran en el mercado local de hasta una capacidad máxima de 50 toneladas, tienen un costo máximo de 98 dólares dependiendo de su capacidad y su instalación es sencilla, ya que vienen listas para operar.

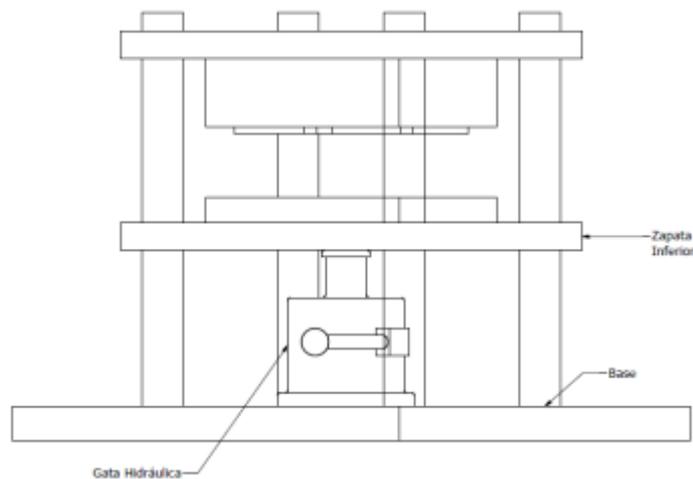


Figura 2.11 Gata hidráulica ubicada dentro del sistema

- **Alternativa B:** Tornillo de potencia como la presente en la figura 2.12; la capacidad de estos elementos es amplia y depende del motor usado para generar la fuerza que se transmitirá, es un sistema complejo y costoso, ocupa mucho espacio y el mantenimiento o el reemplazo de los elementos principales que lo conforman, como el motor y los tornillos de rosca cuadrada es costoso.

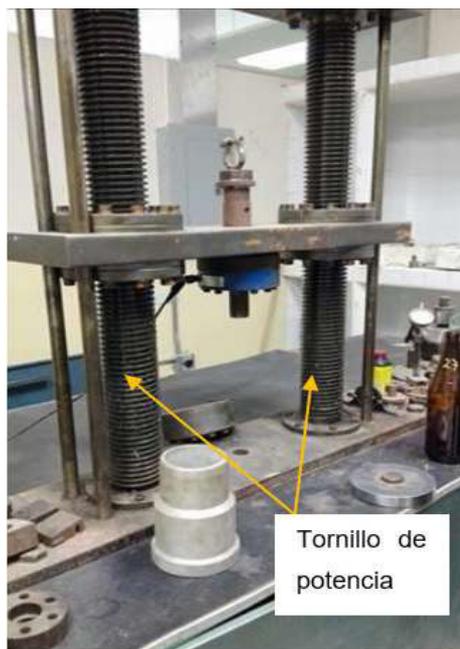


Figura 2.12 Prensa mecánica accionada con tornillos de potencia, [Laboratorio de Mecánica de Sólidos (FIMCP – ESPOL)]

Algunos de los criterios de evaluación considerados para la selección del elemento de transmisión de fuerza fueron:

- **Fuerza máxima transmitida:** considera la fuerza máxima que puede producir el equipo. La evaluación de este criterio asegura que el equipo pueda transmitir la fuerza necesaria que requiere el sistema para operar.
- **Tamaño:** evalúa al espacio ocupado por el equipo que transmite la fuerza. La evaluación de este criterio condiciona directamente a la configuración del sistema, por ejemplo, el tamaño de las zapatas para que se acople al sistema de transmisión de fuerza.
- **Facilidad de instalación:** se refiere a que si el sistema se lo adquiere listo para usar o se debe hacer algún trabajo adicional como el montaje de los elementos.
- **Costo:** se refiere al costo que tiene el sistema de transmisión de fuerza, sumando los costos de adquisición, transporte e instalación.

En este caso todos los criterios antes mencionados se los consideró como más relevantes y se les dio una ponderación mayor o menor por orden de

importancia de manera arbitraria como se muestra en la tabla 2.5. La matriz de decisión de la mejor alternativa se encuentra en la tabla 2.6.

Tabla 2.5 Criterios de evaluación para el elemento de transmisión de fuerza

Criterio de evaluación	Ponderación
Fuerza máxima transmitida	40
Costo	30
Facilidad de instalación	20
Tamaño	10

Tabla 2.6 Matriz de decisión para el elemento de transmisión de fuerza

Criterio de evaluación	Ponderación	A	B
Fuerza máxima transmitida	40	20	40
Costo	30	30	10
Facilidad de instalación	20	20	5
Tamaño	10	10	3
Total		80	58

Como se puede observar en la tabla 2.6, la alternativa A tuvo la ponderación más alta, en consecuencia, se determinó que el elemento de transmisión de fuerza más adecuado para esta aplicación es una gata hidráulica.

2.3 Diseño conceptual

Luego de definir las especificaciones de diseño en la primera etapa del proyecto, y una vez ya determinadas todas las características del sistema mediante matrices de decisión o normativa apropiada, se enlistan a continuación las mismas a manera de resumen, seguido de las Figura 2.13 y 2.14 en la que se puede observar de manera gráfica el diseño conceptual del sistema.

- Tipo de zapata: tipo pilar con juego de pines seguidores.
- Número de pines: 4
- Tipo de bocines: cojinetes de superficie lisa.
- Transmisión de fuerza: gata hidráulica.

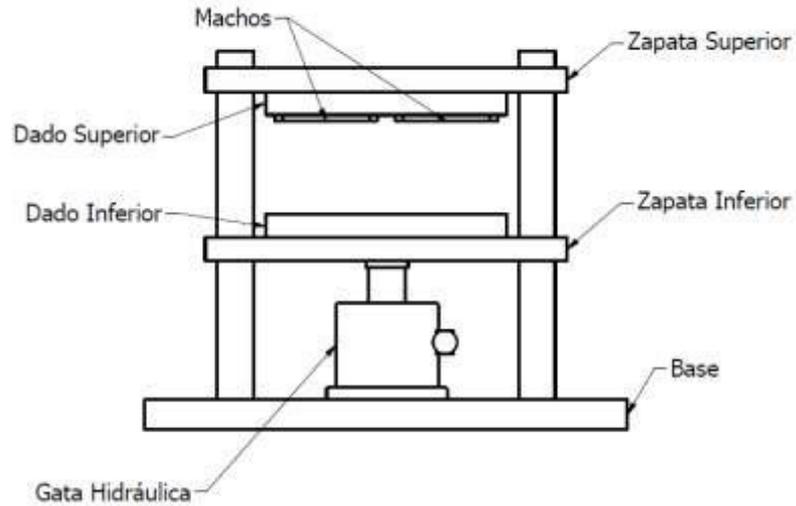


Figura 2.13 Diseño Conceptual del Sistema de Fabricación para Placas Bipolares
(Vista Frontal)

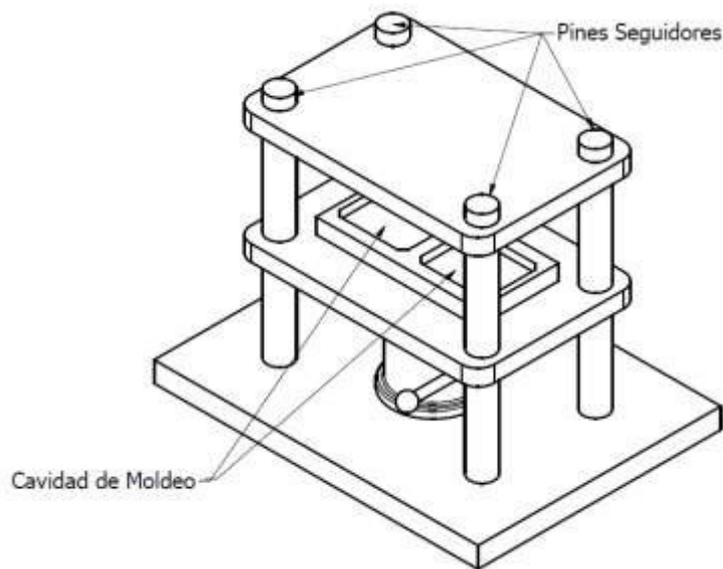


Figura 2.14 Diseño Conceptual del Sistema de Fabricación para Placas Bipolares
(Vista Isométrica)

Este diseño consiste en una base fija, en la cual estarán apoyados los 4 pines seguidores. También cuenta con dos zapatas a las que se ha llamado superior e inferior. La zapata superior permanecerá fija en los pines mediante elementos de sujeción roscados, mientras que la inferior estará sujeta en su parte baja por la gata hidráulica, y será móvil, es decir se moverá junto con el punzón de la gata, y

contará con 4 cojinetes, uno en cada orificio por donde la atraviesan los pines guía. Es importante mencionar que cada sección del dado tendrá una cavidad para alojar las resistencias eléctricas que serán las responsables de otorgar la temperatura adecuada al proceso. En cada zapata se encontrará una parte del dado, en la zapata superior se ubicará el dado macho, los cuales serán los encargados de darle forma a las placas, mientras que, en la zapata inferior, estarían las cavidades de moldeo.

2.4 Dimensionamiento y diseño de elementos del sistema

En esta sección se realizó el dimensionamiento de elementos fundamentales que integran el sistema, como por ejemplo el cálculo del espesor mínimo y máximo esfuerzo en el juego de zapatas, diámetro mínimo de los pines seguidores, uniones roscadas en general, etc. Además, se realizó la selección del material para cada una de las partes y el análisis estructural del sistema general.

2.4.1 Selección de material

A continuación, se detalla el proceso de selección de los materiales de cada uno de los elementos.

2.4.1.1 Selección de material para zapatas

Para determinar el material a usar para la fabricación de las zapatas, se tuvieron en cuenta dos alternativas, las cuales fueron hierro fundido con 7% de acero añadido y acero A36. Al existir una diferencia ampliamente marcada en las propiedades del material, se consideró que la mejor opción sería al acero A36 debido a su alta resistencia a la fluencia de aproximadamente 248 MPa.

2.4.1.2 Selección de material para pines guía

Dado a que los pines guías estarían sometidos a una carga a tensión que se repartiría uniformemente entre los mismos, se decidió emplear un acero de transmisión de bajo costo presente en el mercado local, como lo es el acero AISI 1020.

2.4.1.3 Selección de material para el dado

Según normativa ASTM D5224-12, el molde puede ser fabricado de cualquier tipo de acero que sea capaz de soportar las condiciones del proceso, es decir temperatura y presión. Razón por la cual se decidió usar

acero A36 para la fabricación del dado, dado que dicho material es capaz de soportar las condiciones, también se tomó en cuenta su facilidad de maquinado. Se decidió además realizar un cromado superficial al dado, para poder obtener el acabado superficial deseado.

2.4.2 Cálculo del espesor mínimo de las zapatas del dado

Para aproximar el tamaño de las zapatas del dado con base a la fuerza aplicada en el sistema, se hizo uso de la ecuación descrita a continuación:

$$d = \frac{P(L^3)}{48EI} \quad (2.2)$$

Donde d es la deflexión permitida igual a 0.5 mm, sugerida en el Manual de diseño de Dados, P es la fuerza aplicada [N], L es la distancia entre los soportes [m], E es el módulo de elasticidad del material [Pa] y I es el momento de inercia [m⁴] con el cual se determinó el espesor de la sección transversal de la zapata sujeta a deformación.

2.4.3 Cálculo del esfuerzo máximo en las zapatas del dado

Para calcular el esfuerzo máximo al que se ven sometidas las zapatas del sistema se empleó la ecuación descrita a continuación.

$$\sigma_y = \frac{PL}{4Z} \quad (2.3)$$

Donde σ_y es el esfuerzo que soporta la zapata [Pa], P es la fuerza que actúa sobre el dado [N], L es la distancia entre los soportes [m] y Z es el módulo de la sección transversal [m³]. Para determinar si el material del dado falla por aplastamiento se emplea la ecuación del factor de seguridad:

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_y} \quad (2.4)$$

Donde σ es el esfuerzo máximo de compresión permitido por el material.

2.4.4 Cálculo del diámetro de los pines guías

Para el dimensionamiento de los pines guías, se consideró realizar un análisis a tensión pura de los mismos, para determinar el diámetro mínimo capaz de soportar la fuerza ejercida por el sistema.

Para determinar en primer lugar el esfuerzo máximo permisible de actuación sobre los pines guías (σ_p), se empleó la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_p} \quad (2.5)$$

Donde S_y es la resistencia a la tensión propia de cada material [MPa], y η representa el factor de seguridad.

Mientras que, para la determinación del diámetro de los pines, se empleó la siguiente ecuación:

$$\sigma_p = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Donde F es la fuerza aplicada sobre el pin guía estudiado [N] y A es el área del pin [m^2], de donde será obtenido el diámetro.

2.4.5 Dimensionamiento de sección roscada en los pines

Los elementos roscados experimentan esfuerzos cortantes y de aplastamiento en sus hilos, a continuación, se detallan las ecuaciones usadas para el dimensionamiento de las secciones roscadas propuestas por Norton.

2.4.5.1 Esfuerzo cortante en los hilos de los pines

Para estimar el esfuerzo sufrido en los hilos de los pines seguidores se empleó la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{2P}{\pi d_r h} \quad (2.7)$$

Donde d_r es el diámetro nominal de la rosca [m] y h es la longitud total roscada [m].

Para determinar si los hilos sufrían falla se hizo uso de un factor de seguridad descrito mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \quad (2.8)$$

Donde S_{sy} es la resistencia al cortante del material [Pa].

2.4.5.2 Esfuerzo de aplastamiento en los hilos de los pines

Para calcular el esfuerzo de aplastamiento se empleó la ecuación 2.3, donde el área de aplastamiento proyectada A_p [m^2] fue calculada de la siguiente manera:

$$A_p = \frac{\pi(d_t^2 - d_r^2)h_t}{4p} \quad (2.9)$$

Donde p es el paso de la rosca. Para determinar si el material del dado falla por aplastamiento se emplea la ecuación 2.4.

2.4.6 Cálculo de esfuerzos en las tuercas

Las tuercas ubicadas en los extremos superiores de los pines seguidores son uno de los elementos más críticos del sistema por lo que soportarán la mayor parte de la carga. Los esfuerzos producidos en las tuercas son de compresión, cortante y aplastamiento.

2.4.6.1 Selección del grado del material de las tuercas

Para seleccionar el grado de material más adecuado para las tuercas, es necesario saber el esfuerzo de compresión que actuará sobre cada una de ellas. Para calcular dicho esfuerzo, se emplea la ecuación 2.1, escrita nuevamente a continuación:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_o} \quad (2.1)$$

Donde σ_c es el esfuerzo de compresión [Pa], F es la fuerza que actúa sobre cada tuerca [N], y A_o es el área de contacto entre la tuerca y la zapata superior. Calculado el esfuerzo de compresión que actúa sobre las tuercas, se procede a emplear la ecuación 2.4 del coeficiente de seguridad para calcular la resistencia que debe tener el material de las tuercas, haciendo uso de un coeficiente de seguridad alto debido a la importancia de este elemento.

2.4.6.2 Esfuerzo cortante en los hilos de las tuercas

Para determinar el esfuerzo cortante soportado por los hilos de la tuerca se empleó la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{2P}{\pi d_t h_t} \quad (2.10)$$

Donde d_t es el diámetro interior de la tuerca [m] y h_t es la altura de la tuerca [m]. Para determinar si los hilos de las tuercas fallaban, se calculó el factor de seguridad según la ecuación 2.8.

2.4.7 Selección de bocines

Como ya se mencionó anteriormente en la sección 2.2.1.4 los bocines escogidos para este sistema fueron cojinetes de superficie lisa, los cuales serán fabricados de acero AISI 4340 tomando como base el diseño de un cojinete comercial de SKF. Referirse a la sección de anexos para mayores detalles.

2.4.8 Cálculo de la potencia requerida en la resistencia eléctrica

La temperatura de operación sugerida por Leal & Medina para este proceso es de entre 95 y 105°C, sin embargo, por petición de Lab. FREE la temperatura que debe alcanzar el sistema debe ser de 150°C. Para realizar una primera estimación de la potencia necesaria, se empleó la ecuación 2.11 de difusión de calor en una dimensión, considerando que el calor se distribuye uniformemente en un solo sentido y despreciando las pérdidas por convección y radiación.

$$q = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (2.11)$$

Donde q es la transferencia de calor [W] necesaria para calentar la parte interna del dado a 150°C, k es el coeficiente de conducción propio de cada material [W/m-K], ΔT es la diferencia de temperaturas dadas en el problema [K], y L es la longitud de la pared [m], en este caso se tomó el ancho del dado. La potencia calculada con esta primera aproximación se la evaluó en ANSYS THERMAL, donde sí se tomaron en cuenta las pérdidas parciales por convección en el sistema y se determinó la distribución de temperatura en estado estable.

2.5 Simulación Computacional

Para comprobar la validez de los resultados teóricos se realizó un análisis de elementos finitos con INVENTOR 2018 (Versión Estudiantil) y ANSYS THERMAL 17 (Versión Académica) importando un archivo STEP con la geometría del sistema. El mallado, según lo recomendado en los foros de ANSYS, tiene una calidad superior a 0.8, lo que asegura que el error en los cálculos estará en un rango aceptable de 5 – 15%, y en INVENTOR tiene un tamaño promedio de elemento de 0.05 mm. El archivo STEP que contiene la geometría del sistema fue realizado en INVENTOR 2018 (Versión Estudiantil).

2.5.1 Análisis estructural

Para proceder con la simulación estructural en INVENTOR, se establecieron restricciones de movimientos en la geometría: i) La base es fijada y se restringen todo tipo de movimiento, de igual manera sucede con las tuercas y secciones roscadas de los pines seguidores del sistema, ii) La zapata inferior y los bocines son configurados de tal manera que solo

exista movimiento axial en dirección al eje de los pines seguidores, y iii) para el análisis no se consideraron los pernos ni la resistencia eléctrica en cada una de las zapatas debido a limitaciones del mallado. La fuerza que opera en el sistema fue aplicada en la cara inferior de la zapata inferior y en la cara superior de la base para simular las reacciones que aparecen al anular la gata hidráulica del sistema.

2.5.2 Análisis temperatura en estado estable.

Para proceder con la simulación de la distribución de temperatura en estado estable dentro de la cavidad de moldeo con la ayuda de ANSYS THERMAL, se establecieron las siguientes condiciones de frontera: i) Las resistencias eléctricas ubicadas en cada una de las mitades del dado generan una potencia uniforme de 500 W cada una, y ii) Las demás caras de las partes del sistema se encuentran en convección natural con el aire del ambiente a 27°C y un coeficiente de convección promedio de $h = 14.4 \text{ W/m}^2\text{-k}$.

2.6 Diseño del sistema de control de temperatura

Uno de los sensores de temperatura más utilizados en los procesos de compresión y moldeo en caliente son los termopares o termocuplas debido a las altas temperaturas que pueden ser medidas con su uso. La termocupla puede ser acoplada a transductores sofisticados como pirómetros digitales, que están capacitados para realizar un control de temperatura de un sistema. El costo de estos transductores es elevado en comparación con otros que pueden ser empleados para realizar un control de temperatura. Para realizar el control de temperatura del sistema en este proyecto se emplearán Termocuplas J conectadas a un módulo MAX6675 que se adapta a una tarjeta Arduino UNO y, mediante una programación hecha en lenguaje Arduino, controla un relé que enciende y apaga las resistencias eléctricas que generan el calor en el sistema.

2.7 Estimación de Costos

Para estimar los costos del presente proyecto, se tomaron en cuenta dos rubros principales, el primero de ellos consistió en todos los materiales a emplearse para la construcción del modelo diseñado, mientras que el otro se refirió concretamente a los costos asociados al mecanizado de las piezas. Para la obtención de los costos

exactos, se realizaron cotizaciones en empresas dedicadas a la comercialización de cada uno de los ítems. Los precios de los elementos se encuentran en la sección 3.11.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Cálculo de fuerza requerida por el sistema

La fuerza requerida por el sistema para el prensado de las placas bipolares está en función tanto de la presión ejercida por el accionamiento de la prensa hidráulica, como del área de prensado. Como lo indica la ecuación 2.1.

$$P_s = \frac{F_s}{A_{bp}}$$

Donde los valores usados se enlistan a continuación, seguido del desarrollo de la ecuación 1 y su valor calculado.

- Presión del sistema (F_s) = 20.68 MPa
- Área de prensado (A_{bp}) = 5961.28 mm²

$$F_s = P_s * A_{bp}$$

$$F_s = 20.68 * (2 * 5961.28)$$

$$F_s = 247 \text{ kN}$$

3.2 Cálculo del espesor mínimo de las zapatas

Para el cálculo del espesor mínimo de las zapatas, se usó el criterio de deflexión permitida, descrito en la ecuación 2.2, teniendo como única incógnita el valor de la inercia I , el cual será usado luego para obtener el valor mínimo de espesor.

$$d = \frac{P(L^3)}{48EI}$$

$$I = \frac{P(L^3)}{48Ed}$$

Se enlistan a continuación los valores usados en el desarrollo de la ecuación recién descrita.

- Fuerza aplicada (P) = 246609 N
- Distancia entre soportes (L) = 350 mm
- Módulo de elasticidad (E) = 200 GPa
- Deflexión permitida (d) = 0.5 mm

$$I = \frac{246609(0.35^3)}{48(200 * 10^9)(5 * 10^{-4})}$$

$$I = 2.2 * 10^{-6} m^4$$

Luego, de la fórmula de inercia se pudo obtener el valor del espesor mínimo de la zapata (e).

$$I = \frac{1}{12} b e^3$$

$$e = \sqrt[3]{\frac{12I}{b}}$$

Teniendo como datos los siguientes valores:

- Inercia de la zapata (I) = 2.2E-6 m⁴
- Ancho de la zapata (b) = 0.25 m

$$e = \sqrt[3]{\frac{12 * 2.2 * 10^{-6}}{0.25}}$$

$$e = 47 \text{ mm}$$

3.3 Cálculo del esfuerzo máximo en las zapatas

Se usó además el criterio del factor de seguridad por aplastamiento para comprobar que la zapata con el espesor calculado sea capaz de soportar la carga. Para el cálculo del esfuerzo máximo sobre las zapatas, se usó la ecuación 2.3.

$$\sigma_y = \frac{PL}{4Z}$$

$$\sigma_y = \frac{PL \left(\frac{e}{2}\right)}{4I}$$

Los valores usados para la determinación del esfuerzo que actúa sobre las zapatas son los siguientes:

- Fuerza aplicada (P) = 246609 N
- Distancia entre soportes (L) = 350 mm
- Espesor de la zapata (e) = 50.8 mm
- Inercia de la zapata (I) = 2.7E-6 m⁴

$$\sigma_y = \frac{246609 * 0.35 * 0.0255}{4 * 2.7 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_y = 204 \text{ MPa}$$

Luego, se usó la ecuación 2.4 para determinar si el material escogido en el capítulo anterior es capaz de soportar el esfuerzo calculado.

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_y}$$

Donde los valores usados para la determinación del factor de seguridad fueron los siguientes:

- Esfuerzo máximo de compresión del acero A36 (σ) = 248 MPa
- Esfuerzo máximo en las zapatas (σ_y) = 204 MPa

$$\eta = \frac{248}{204}$$

$$\eta = 1.2$$

3.4 Cálculo del diámetro de los pines guía

Para el cálculo del diámetro de los pines, se hizo uso de las ecuaciones 2.5 y 2.6, tal como se muestra a continuación.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_p}$$

$$\sigma_p = \frac{S_y}{\eta}$$

Donde los valores usados para la determinación del máximo esfuerzo permisible fueron los siguientes:

- Factor de seguridad (η) = 1.5
- Resistencia a la tensión acero 1020 = 207 MPa

$$\sigma_p = \frac{207}{1.5}$$

$$\sigma_p = 138 \text{ MPa}$$

Luego para determinar el diámetro mínimo de los pines se usó la ecuación 2.6, dejando expresada el área del pin en función de su diámetro.

$$\sigma_p = \frac{F}{A}$$

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma_p}}$$

Los valores usados en esta ecuación fueron los siguientes:

- Fuerza aplicada sobre el pin (F) = 61652 N
- Máximo esfuerzo permisible (σ_p) = 138 MPa

$$d = \sqrt{\frac{4 * 61652}{\pi * 138 \times 10^6}}$$

$$d = 24 \text{ mm}$$

3.5 Dimensionamiento de elementos roscados

3.5.1 Cálculo del esfuerzo cortante en los hilos de los pines

Para este cálculo del esfuerzo cortante que actúa sobre los hilos de cada uno de los pines, se empleó la ecuación 2.7.

$$\tau = \frac{2P}{\pi d_r h}$$

Los valores usados para el desarrollo de la ecuación se enlistan a continuación:

- Carga aplicada en el pin (P) = 61652 N
- Diámetro nominal de la rosca (d_r) = 24 mm
- Longitud roscada (h) = 25 mm

$$\tau = \frac{2 * 61652}{\pi * 0.024 * 0.025}$$

$$\tau = 65 \text{ MPa}$$

Luego para determinar si el material escogido será capaz de soportar el esfuerzo calculado, se usó la ecuación 2.8.

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau}$$

Usando para el desarrollo de esta los siguientes valores:

- Resistencia al cortante (S_{sy}) = 124 MPa
- Esfuerzo cortante sobre los hilos del pin (τ) = 65 MPa

$$\eta = \frac{124}{65}$$

$$\eta = 1.9$$

Obteniendo un coeficiente de seguridad mayor a 1, los hilos de la rosca en los pines seguidores no fallarán por esfuerzos cortantes.

3.5.2 Cálculo de esfuerzo de aplastamiento en los hilos de los pines seguidores

Previo al cálculo del esfuerzo de aplastamiento, se calculó el área de aplastamiento proyectada, la cual para este caso estuvo dada por la ecuación 2.9.

$$A_p = \frac{\pi(d_r^2 - d_t^2)h_t}{4p}$$

Se enlistan todos los valores usados para el desarrollo de la ecuación a continuación:

- Diámetro interior de la tuerca (d_t) = 20.725 mm
- Diámetro nominal de la rosca (d_r) = 24 mm
- Altura de la tuerca (h_t) = 19 mm
- Paso de la rosca (p) = 3 mm

$$A_p = \frac{\pi(0.024^2 - 0.020725^2)0.019}{4 * 0.003}$$
$$A_p = 0.0007 \text{ m}^2$$

Una vez obtenido el valor del área de aplastamiento proyectada, se relacionó este valor con la carga soportada para obtener el valor del esfuerzo de aplastamiento soportado por los hilos.

$$\sigma_{ap} = \frac{P}{A_p}$$

Se usaron los siguientes valores para obtener el resultado deseado:

- Carga aplicada (P) = 61652 N
- Área proyectada de aplastamiento (A_p) = 0.0007 m²

$$\sigma_{ap} = \frac{61652}{0.0007}$$
$$\sigma_{ap} = 85 \text{ MPa}$$

Luego, para determinar si el material escogido soportará el esfuerzo de aplastamiento, se usará la ecuación 2.4, con los siguientes valores.

- Esfuerzo máximo de compresión del acero A36 (σ) = 248 MPa
- Esfuerzo de aplastamiento (σ_{ap}) = 85 MPa

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_{ap}}$$
$$\eta = \frac{248}{85}$$
$$\eta = 2.9$$

Con el coeficiente de seguridad mayor a 1, los hilos de la rosca en los pines seguidores no fallarán. Los hilos de la rosca en las tuercas no fallarán por aplastamiento porque el material de la tuerca es más resistente que el de los pines seguidores.

3.6 Cálculo de esfuerzos en las tuercas

Las tuercas seleccionadas son M24 x 3, de acuerdo a la sección roscada calculada en la sección 3.4.

3.6.1 Selección del grado de material de las tuercas

Para la selección del grado de material de las tuercas, es necesario conocer primero el esfuerzo de compresión que actúa sobre cada tuerca, por lo que se hizo uso de la ecuación 2.10.

$$\sigma_c = \frac{F}{A_o}$$

Donde, los valores usados para determinar el valor requerido fueron los siguientes:

- Fuerza sobre cada tuerca (F) = 61750 N
- Área de contacto (A_o) = 566E-6 m²

$$\sigma_c = \frac{61750 \text{ N}}{566 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$
$$\sigma_c = 109 \text{ MPa}$$

Luego, usando la ecuación de factor de seguridad y asumiendo un valor alto del mismo, se calculó la resistencia del material para determinar su grado de la siguiente manera:

$$S_y = \eta \cdot \sigma_c$$

Donde los valores usados en la ecuación previamente descrita fueron los siguientes:

- Factor de seguridad (η) = 6
- Esfuerzo de compresión (σ_c) = 109 MPa

$$S_y = 6 \cdot 109$$
$$S_y = 654 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, se escoge un grado de material de 8.8 con una resistencia igual a 660 MPa.

3.6.2 Cálculo del esfuerzo cortante en los hilos de la tuerca

El cálculo del esfuerzo cortante soportado por los hilos de la tuerca fue dado mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{2P}{\pi d_t h_t}$$

Tomando los siguientes datos:

- Carga aplicada (P) = 61652 N
- Diámetro interior de la tuerca (d_t) = 20.725 mm
- Altura de la tuerca (h_t) = 19 mm

$$\tau = \frac{2 * 61652}{\pi * 0.019 * 0.020725}$$
$$\tau = 100 \text{ MPa}$$

Haciendo uso de la ecuación 2.8 de factor de seguridad para esfuerzos cortantes, se obtuvo el mismo, para determinar si las tuercas serían capaces de soportar el esfuerzo aplicado sin fallar.

$$\eta = \frac{654}{100}$$
$$\eta = 7$$

3.7 Cálculo de la potencia requerida por la resistencia

Para obtener una primera aproximación de la potencia necesaria que debe disipar la resistencia eléctrica para llegar a la temperatura de operación, se empleó la ecuación 2.11:

$$q = kA \frac{\Delta T}{L}$$

Usando los siguientes valores para obtener el valor de la potencia requerida:

- Coeficiente de conducción (k) = 37.7 W/m-K
- Área de contacto (A) = 2400 mm²
- Diferencial de temperatura (ΔT) = 150 °C – 27 °C = 123 °C
- Longitud de la pared (L) = 20 mm

$$q = 37.7 * 0.0024 * \frac{(150 - 27)}{0.02}$$
$$q = 557 \text{ W}$$

Se escogió un valor de potencia comercial de 500 W y se procedió a realizar una simulación de la distribución de temperatura del dado mediante un software de elementos finitos. Para más información, referirse a la sección 3.10.2.

3.8 Diseño final

A continuación, en la Figura 3.1 se muestra el diseño final del sistema hecho en INVENTOR 2018. Este diseño sigue la base del diseño conceptual mencionado en

la sección 2.3, un sistema con zapatas tipo pilar, 4 seguidores y un accionamiento hidráulico controlado de forma manual.

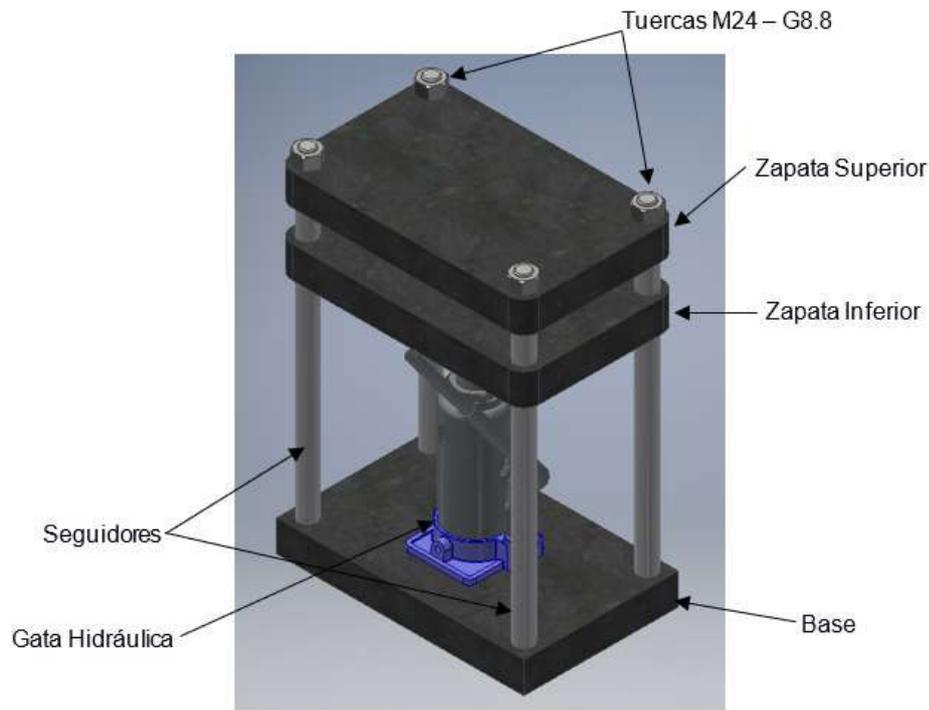


Figura 3.1 Diseño final del sistema

Las roscas M24 de grado 8.8, son las encargadas de mantener fijo el sistema cuando el accionamiento hidráulico es activado. De igual manera, los pines seguidores son acoplados mediante una sección roscada M24 con la placa base del sistema y los cojinetes de superficie lisa serán fabricados con acero AISI 1045, basados en un diseño de la empresa SKF. Para más información del sistema, referirse a la sección de anexos.

3.8.1 Modelo CAD del Dado de Compresión

El dado de compresión está conformado por dos secciones, mitad superior y mitad inferior, ambas formadas por distintos elementos acoplados entre ellos mediante pernos M5.

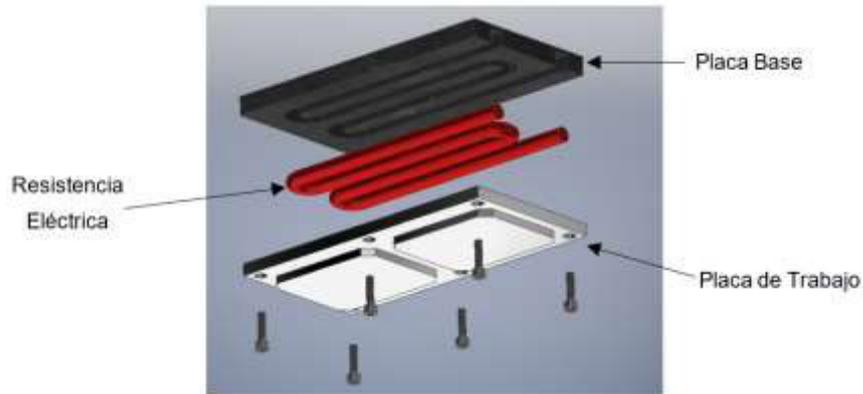


Figura 3.2 Vista en explosión de la mitad superior del dado

La Figura 3.2 muestra una vista explosionada de la mitad superior del dado de compresión; la misma que está formada por una placa base que aloja a una resistencia eléctrica en forma de serpentín y una placa de trabajo cromada que entra en contacto con el material que se va a moldear. En la Figura 3.3 se muestra la vista en explosión de la mitad inferior del dado de compresión, esta está formada de igual manera por una placa base que aloja una resistencia en forma de serpentín y, a diferencia de la mitad superior, cuenta con dos placas de trabajo que forman la cavidad de moldeo del dado de compresión.

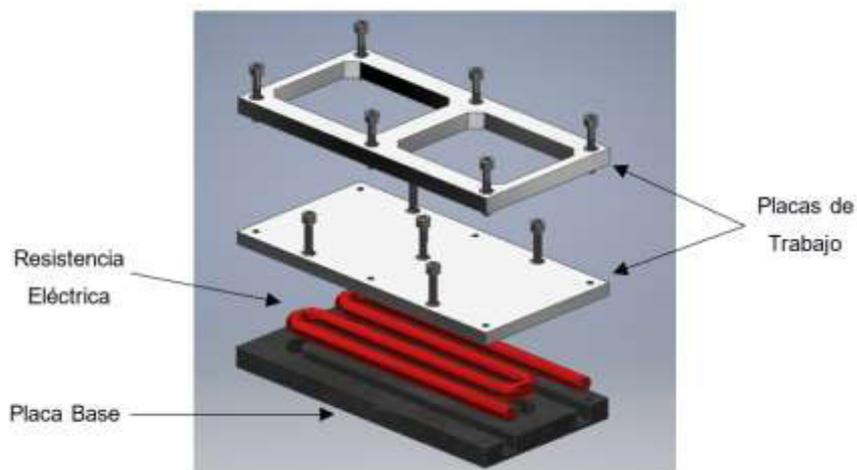


Figura 3.3 Vista en explosión de la mitad inferior del dado

El dado de compresión completo es mostrado en la Figura 3.4, donde las mitades superior e inferior se encuentran en contacto, representando de esta manera una operación de prensado en caliente.

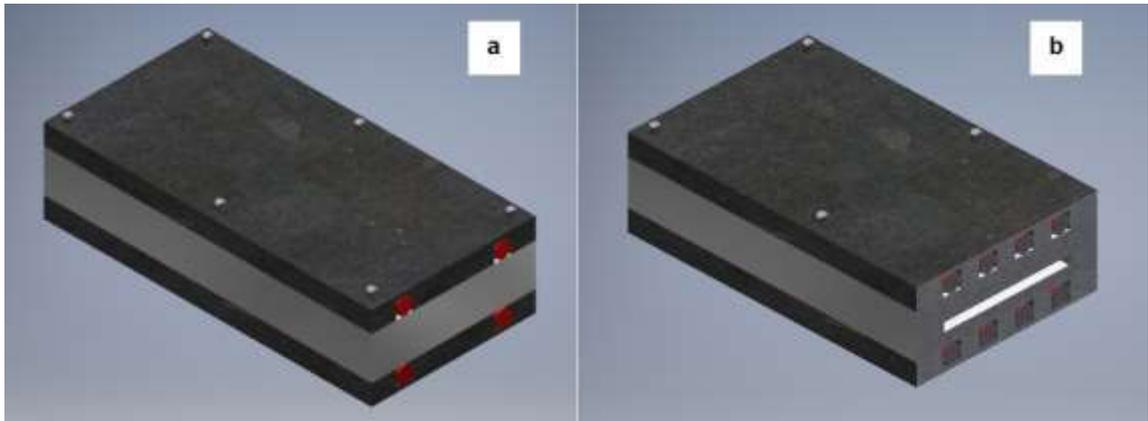


Figura 3.4 Modelo 3D completo del dado de compresión y b) Corte en un plano transversal del dado de compresión

El ángulo de desmoldeo usado en el dado de compresión es de 3° y las placas fabricadas a partir de este necesitarán de un proceso secundario de mecanizado para la formación de los canales de flujo de combustible y oxidante. para mayores detalles sobre la geometría y medidas del dado y las placas resultantes, referirse a la sección de anexos.

3.9 Simulación Computacional

A continuación, se muestran los resultados de los análisis hechos a partir de elementos finitos (FEA) en las herramientas computacionales detalladas en el capítulo 2. Se mostrarán los resultados de los análisis en los elementos críticos del sistema analizados de forma teórica e idealizada en las secciones del 3.2 al 3.6 y la sección 3.8, que corresponden a las zapatas, pines seguidores, tuercas y dado. Los resultados mostrados se centran en la deformación máxima experimentada en los elementos y el factor de seguridad basado en el criterio del esfuerzo de fluencia de cada material.

3.9.1 Simulación Estructural

La Figura 3.5 se muestra el mallado del sistema con un total de 1E06 nodos y 6.8E05 elementos, en el mismo se ha omitido la presencia de la gata hidráulica para ser reemplazada por las reacciones que genera en el sistema.



Figura 3.5 Mallado de la geometría del sistema

En la figura 3.6 se observa la presencia de las reacciones que se originan al omitir la presencia de la gata hidráulica, las cuales son fuerzas verticales de igual magnitud de 247 kN , pero una dirección diferente.

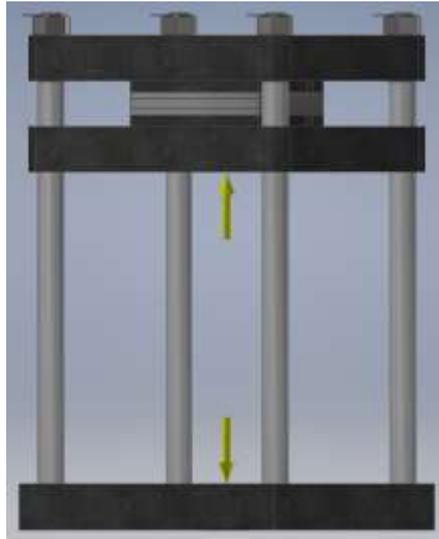


Figura 3.6 Reacciones que actúan en el sistema

El coeficiente de seguridad y la deformación que ocurre en las zapatas durante la operación del sistema se encuentran representadas en las Figuras 3.7 y 3.8 respectivamente.

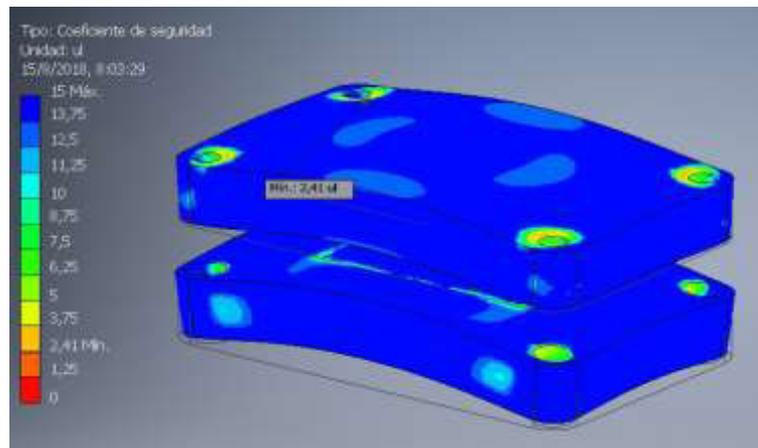


Figura 3.7 Coeficiente de seguridad global de las zapatas

La Figura 3.7 indica que el factor de seguridad mínimo presente en el conjunto de zapatas es de 2.41, número mayor a la unidad que indica que los elementos no fallarán. El menor valor del coeficiente de seguridad se encuentra justo en los agujeros pasantes donde irán acoplados los pines seguidores y esto es debido a

la presencia de concentradores de esfuerzos provocados por estos. La deformación máxima indicada en la Figura 3.8 es de 0.07 mm y ocurre en la zapata inferior en la región sombreada de color rojo. Este valor es aproximadamente 10 veces menor a la deformación utilizada para los cálculos teóricos en la sección 3.2 y esto se debe a que en los cálculos teóricos se considera solo el espesor de una zapata como si estuviese operando sola. Esto durante la operación no se cumple, ya que también está presente el espesor del dado y el de la segunda zapata, aumentando la inercia de esta manera.

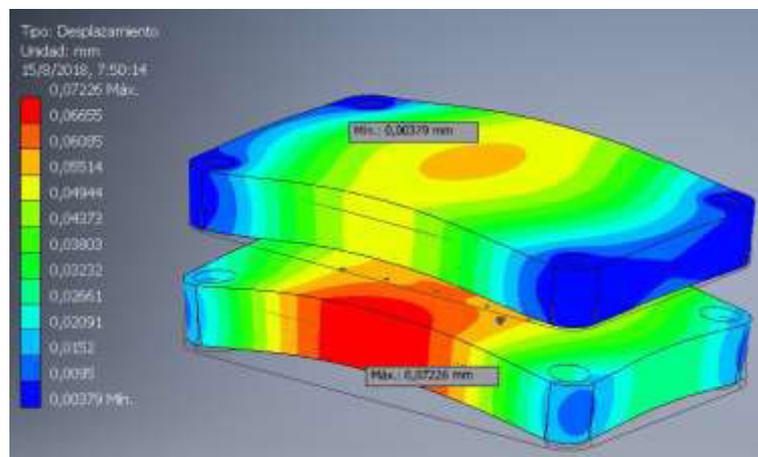


Figura 3.8 Deformación presente en las zapatas

Los resultados del coeficiente de seguridad y deformación presentes en los pines seguidores se encuentran representados en las Figuras 3.9 y 3.10.

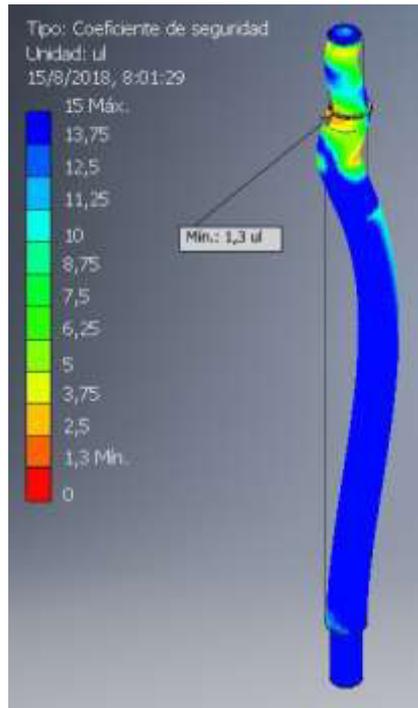


Figura 3.9 Coeficiente de seguridad global de los pines seguidores

El mínimo valor del coeficiente de seguridad presente en los pines seguidores es de 1.3, tal como se indica en la Figura 3.9. Este valor es mayor a la unidad, lo que indica que los elementos no fallaran. La figura antes mencionada nos permite ver que las secciones de los pines seguidores que poseen hilos de rosca tienen un coeficiente de seguridad alto lo que asegura que los hilos no fallaran por cortante. El valor mínimo es provocado posiblemente por la deformación presente en las zapatas que hacen que ocurran esfuerzos adicionales por el contacto entre las superficies que se deforman.

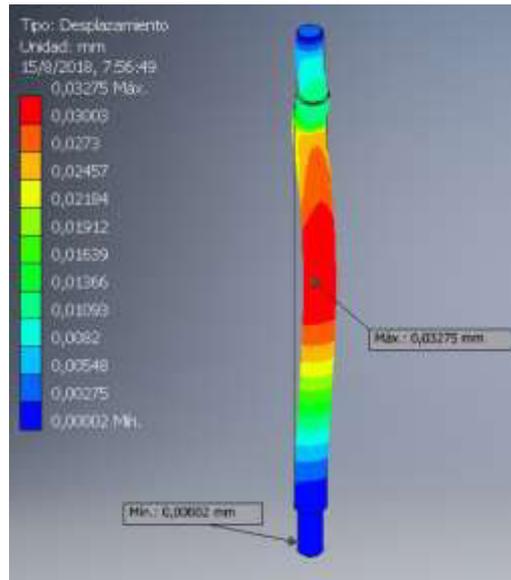


Figura 3.10 Deformación presente en los pines seguidores

La deformación máxima presente en los pines seguidores e indicada en la figura 3.10 es de 0.03 mm aproximadamente y ocurre en la región sombreada de color rojo (región media en sentido longitudinal), mientras que las secciones roscadas tienen una deformación promedio de 0.01 mm; deformación aceptable teniendo en cuenta que el ajuste entre las partes deslizante de este tipo de sistemas es de 0.1 mm.

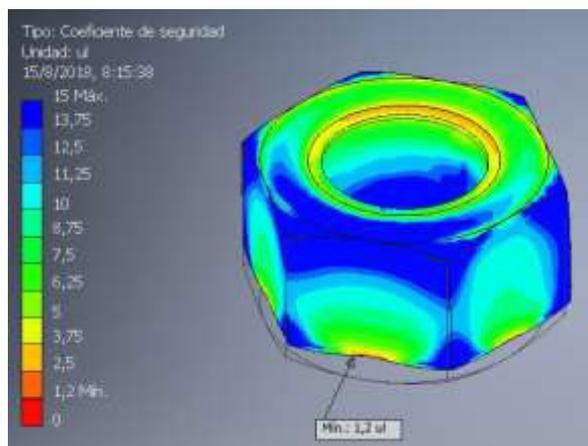


Figura 3.11 Coeficiente de seguridad global de las tuercas

El coeficiente de seguridad asociado con las tuercas que formarán parte del sistema se encuentra detallado en la figura 3.11 y su valor mínimo es de 1.2, lo cual indica que el elemento no fallará durante la operación del sistema. El coeficiente de seguridad mínimo hallado mediante la simulación, es mucho menor al coeficiente de seguridad hallado de forma teórica. Esta diferencia puede deberse a que en el análisis teórico no se consideran los esfuerzos provocados por la deformación de las superficies de contacto ni los concentradores de esfuerzo propios de la geometría de las tuercas. La Figura 3.12 muestra la deformación presente en las tuercas, cuyo valor máximo es de 0.1 mm en la cara que está en contacto con la zapata, también se aprecian deformaciones en promedio de 0.005 mm a lo largo de los hilos de la tuerca.

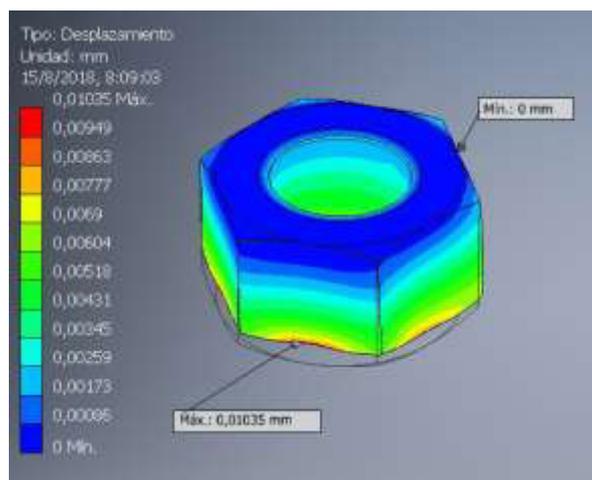


Figura 3.12 Deformación presente en las tuercas

La deformación y el coeficiente de seguridad global del dado de compresión fueron calculados solo de forma computacional debido a su geometría compleja. Para información sobre estos, referirse a la sección de anexos.

3.9.2 Simulación térmica en estado estable

A continuación, se muestran los resultados de la distribución de temperatura del dado de compresión en estado estable.

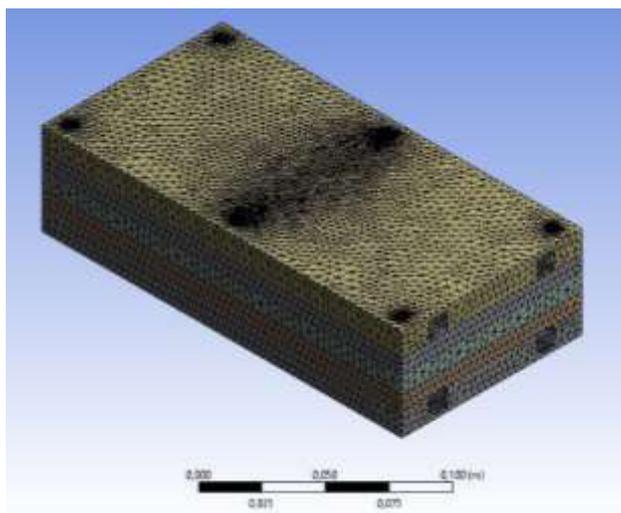


Figura 3.13 Mallado de la geometría del Dado de Compresión

En la figura 3.13 se puede observar el mallado generado para la geometría que representa el Dado de Compresión cuando sus mitades se encuentran en contacto. La calidad del mallado es de 0.8012, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para poder obtener resultados confiables en la simulación.

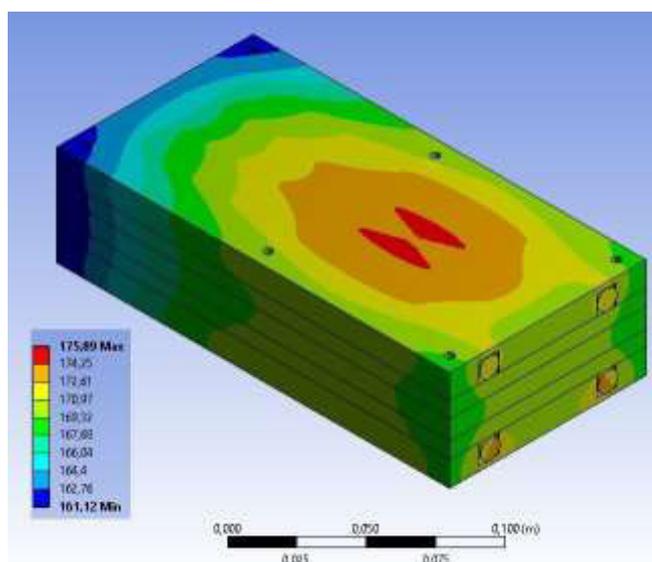


Figura 3.14 Distribución de temperatura en estado estable

La figura 3.14 muestra la distribución de temperaturas que tendrá el Dado en estado estable. La temperatura promedio en el molde es de aproximadamente de 168°C, lo cual cumple con el requerimiento del sistema.

3.10 Diseño del sistema de control de temperatura

La figura 3.15 muestra un esquema de los componentes encargados de realizar el control de temperatura del sistema. La señal de salida de la termocupla está en el rango de los milivoltios [mV] y no presenta un comportamiento lineal, pero es acondicionada por el módulo MAX6675 para que pueda ser interpretada por la tarjeta Arduino UNO. El microcontrolador de la tarjeta ejecuta la programación hecha en lenguaje Arduino, presente en la sección de anexos, para cerrar o abrir el circuito de la resistencia eléctrica mediante un relé. La temperatura del sistema es mostrada en una pantalla LCD de 16 x 2 caracteres.

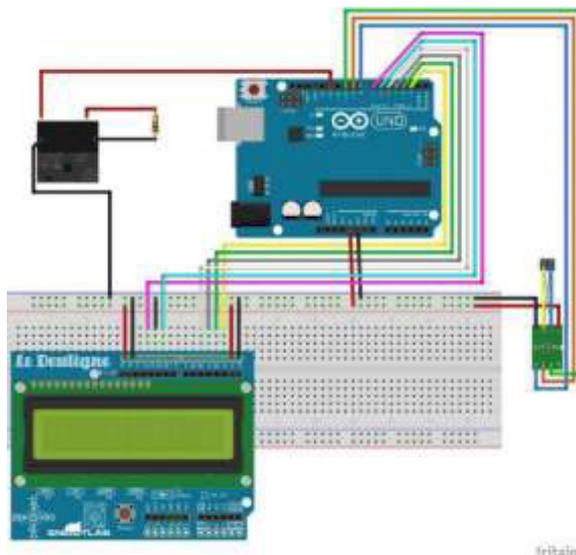


Figura 3.15 Conexiones del sistema de control de temperatura [Fritzing]

La figura 3.16 muestra el diagrama de esquemático de conexión de los elementos, donde se detallan los canales utilizados de la tarjeta Arduino.

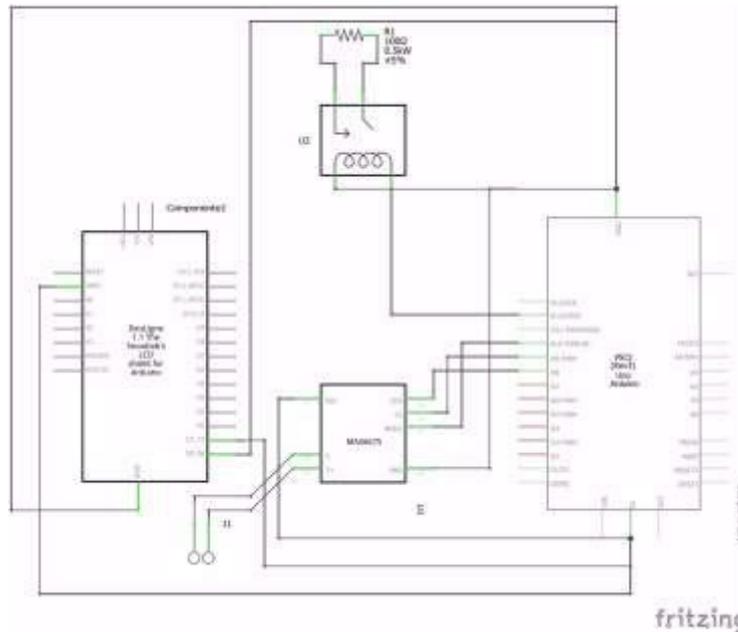


Figura 3.16 Esquema del sistema de control de temperatura [Fritzing]

Se sugiere ubicar el sensor de temperatura en una de las caras laterales de la “Placa Lisa” de la sección inferior del Dado. Para mayor información sobre la ubicación exacta referirse a la sección de anexos.

3.11 Estimación de Costos

Una vez culminado el diseño detallado y analizadas las respectivas simulaciones, se procedieron a realizar las correspondientes cotizaciones para los listados en la sección 2.7, con el objetivo de estimar el costo total de fabricación del sistema.

En la sección de Anexos se muestra el análisis de costos detallado, incluido el valor total de los materiales y mecanizado del sistema completo.

3.11.1 Costos de Materiales

Dado el diseño detallado del sistema, se consideró que los materiales necesarios para la construcción de este serían los mencionados en la tabla 3.1, con sus respectivas cantidades y precios unitarios.

Tabla 3.1 Materiales considerados para la construcción del sistema

Material	Unidad	Cantidad	Precio Unit	Total
Acero A36 e=65mm	Kg	194.40	\$ 1.23	\$ 239.11
Acero A36 e=15mm	Kg	15.54	\$ 1.39	\$ 21.60
Acero 1020 $\phi=1\ 1/2"$	Kg	27.74	\$ 1.54	\$ 42.72
Acero 4340 $\phi=1\ 1/2"$	Kg	9.79	\$ 3.48	\$ 34.07
Tuerca M24x3	Unidad	4.00	\$ 0.59	\$ 2.34
Perno M5x0.5	Unidad	11.00	\$ 0.80	\$ 8.77
Resistencia eléctrica 500W	Unidad	2.00	\$ 89.00	\$ 178.00
Tarjeta Arduino uno	Unidad	2.00	\$ 16.99	\$ 33.98
Modulo MAX6675	Unidad	2.00	\$ 6.00	\$ 12.00
Módulo Relé Arduino 10A	Unidad	2.00	\$ 4.75	\$ 9.50
Pantalla LCD 16x2	Unidad	2.00	\$ 4.75	\$ 9.50
Termocupla	Unidad	2.00	\$ 3.50	\$ 7.00

3.11.2 Costos de Mecanizado

Por otro lado, se consideraron también los costos de fabricación o mecanizado de cada una de las piezas que formarían parte del sistema. Se muestra a continuación la tabla 3.2 en la que se resumen las piezas y la cantidad de estas.

Tabla 3.2 Mecanizado de piezas del sistema

Material	Unidad	Cantidad	Precio Unit	Total
Pin seguidor	Unidad	4.00	\$ 17.00	\$ 68.00
Zapata	Unidad	2.00	\$ 45.00	\$ 90.00
Base	Unidad	1.00	\$ 30.00	\$ 30.00
Bocín	Unidad	4.00	\$ 12.00	\$ 48.00
Dado superior/inferior	Unidad	2.00	\$ 130.00	\$ 260.00
Dado centro	Unidad	1.00	\$ 110.00	\$ 110.00
Placa serpentín	Unidad	2.00	\$ 155.00	\$ 310.00
Cromado Dados	Unidad	2.00	\$ 100.00	\$ 200.00

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El sistema diseñado en este proyecto ocupa una superficie de $400 \times 250 \text{ mm}^2$ y posee una altura de 600 mm, lo que le permite ser ubicado fácilmente en cualquier lugar de trabajo, ya que no requiere de una base rígida para sustentarse. Las dimensiones mencionadas son las adecuadas para que una sola persona, sin problema, pueda operar el sistema desde la colocación del material en el dado inferior hasta la extracción de la pieza formada. El diseño no cuenta con uniones permanentes, lo que asegura que cada uno de sus elementos pueda ser reemplazado sin comprometer la integridad de otro, cumpliendo así con las especificaciones de diseño solicitadas por el cliente.
- La literatura especializada en diseño de dados para diferentes operaciones propone una amplia gama de materiales que podrían ser utilizados en estos sistemas, sin embargo, en este proyecto se empleó acero ASTM A36 en todos los sólidos que no son de revolución debido al bajo costo de este. Con el uso de otros materiales más resistentes que el acero estructural antes mencionado sería posible una disminución en el espesor de varios elementos como la base del sistema, sin embargo, este ahorro económico en material debido a la disminución de las dimensiones no compensaría el incremento sustancial en los costos del mecanizado de las piezas a partir de un material más duro.
- Los resultados teóricos y los obtenidos mediante simulación computacional son consistentes al determinar que el sistema no sufrirá falla mecánica durante la operación. Los valores de los coeficientes de seguridad calculados teóricamente, de determinados elementos como los pines seguidores o tuercas, guardan una diferencia considerable con los resultados arrojados por la simulación computacional. Esto se debe a que los cálculos teóricos idealizan los efectos de los esfuerzos presentes en los elementos como si actuaran exclusivamente en ellos, lo que no ocurre en un análisis mediante elementos finitos (simulación computacional) en donde se analiza el efecto de los esfuerzos sobre todo el sistema. De esta manera, deformaciones producidas en algún elemento pueden

ejercer esfuerzos adicionales sobre otro, lo cual genera esfuerzos combinados que no son analizados teóricamente y que disminuyen el valor del coeficiente de seguridad. Esto también se evidencia en los resultados de la deformación en las zapatas, las cuales fueron teóricamente calculadas para que experimenten una deformación máxima de 0.5 mm, sin embargo, la deformación máxima experimentada por estas según la simulación computacional es de 0.07 mm, aproximadamente 7 veces menor que la estimada teóricamente. Esta diferencia considerable ocurre nuevamente debido a que en los cálculos teóricos no se considera la presencia del resto de elementos como el dado y la segunda zapata, cuyos espesores sumarían una mayor inercia logrando una menor deformación, situación que si es considerada en la simulación computacional. La simulación de la distribución de temperatura en estado estable no considera la presencia del resto de elementos del sistema para ser consistente con el análisis teórico y por limitaciones de la licencia del software. La temperatura relativamente baja no producirá efectos adversos como esfuerzos térmicos elevados, deformaciones o ablandamiento en ninguno de los componentes del sistema.

- Los dispositivos que forman parte del sistema de control de temperatura son sensibles a ambientes hostiles como temperaturas superiores a 80°C y abundante presencia de polvo, sin embargo, el ambiente de laboratorio donde se espera opere el sistema asegurará el buen funcionamiento del sistema.
- El costo total de fabricación del sistema es de \$1,714.59, teniendo en cuenta todos los materiales necesarios para su construcción, así como también el costo de mecanizado de cada una de sus piezas y el sistema de control de temperatura.

4.2 Recomendaciones

- El sistema de guías, formado por los pines seguidores y los bocines, necesita de lubricación regularmente según su uso, para evitar desgastes y ralladuras.
- El uso de guantes es recomendado durante la operación del sistema.
- El sistema de control de temperatura está pensado para operar en un ambiente limpio de laboratorio, pero se aconseja la colocación de un pequeño tablero donde poder alojar el microprocesador y los demás componentes electrónicos para brindar una protección extra, que serviría incluso si se cambia el ambiente donde opera el sistema.

- Se recomienda que emplear pintura anticorrosiva en las superficies que no tengan contacto con el material a ser moldeado. Esta temperatura debe ser para altas temperaturas.
- Las capas de cromado presentes en algunas superficies del dado sufrirán de desgaste proporcional al uso que se le dé al sistema, es recomendable realizar cromados adicionales para recuperar las micras de cromo perdidas.
- Se recomienda el uso de resistencias eléctricas de tipo serpentín debido a la relación potencia/tamaño que poseen. Las medidas del canal presentes en las placas base de cada una de las secciones de los dados son solo referenciales, se deberá hacer canales con base a las dimensiones reales de la resistencia eléctrica a emplearse.
- El sistema está calculado para llegar a temperaturas de operación de aproximadamente 168°C. En caso de que se requiera una mayor temperatura, rehacer el cálculo empleando la ecuación 2.11 y usando como dato la nueva temperatura máxima a la que se quiere llegar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rayment, C., & Sherwin, S. (2003). Introduction to fuel cell technology. Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, IN, 46556, 11-12.
2. Paul S. Greenwood (2010). Polymeric bipolar plates for PEM fuel cells: experimental and modeling approach to assess factors influencing performance. Loughborough University.
3. Beth A. Johnson (2009). Thermally and Electrically Conductive Polypropylene Based Resins for Fuel Cell Bipolar Plates. Michigan Technological University.
4. James Larminie, & Andrew Dicks (2003). Fuel Cells Systems Explained, 2da edición.
5. Karol Leal & Jorge Medina (2018), Desarrollo de compuesto de Epóxico y Grafito Expandido para Placa Bipolar de Celda de Combustible, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
6. Hermann, A., Chaudhuri, T., & Spagnol, P. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. International journal of hydrogen Energy, 30(12), 1297-1302.
7. Planes, E., Flandin, L., & Alberola, N. (2012). Polymer composites bipolar plates for PEMFCs. Energy Procedia, 20, 311-323.
8. Groover M., (2007). Fundamentos de Manufactura Moderna. Lehigh: McGraw-Hill.
9. Suchy Ivana (1994). Handbook of Die Design, 2da edición.
10. American Society for Testing and Materials (2012). Standard Practice for Compression Molding Test Specimen of Thermosetting Molding Compounds. D5224 – 12.
11. Pytel Andrew & Singer L. Ferdinand (2008). Resistencia de Materiales. Oxford, 4ta edición.
12. Beer P. Ferdinand, Johnston E. Russell, DeWolf T. John (2009). Mecánica de Materiales. McGraw-Hill. 5ta edición.
13. Incropera Frank & DeWitt David (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. Prentice Hall. 4ta edición.
14. Norton L. Robert (2012). Diseño de Máquinas, un enfoque integrado. Pearson. 4ta edición.

ANEXOS

ANEXO A

**ELEMENTOS COMPUESTOS,
DESCRIPCIÓN DE MATERIALES**

EPON™ Resin 828

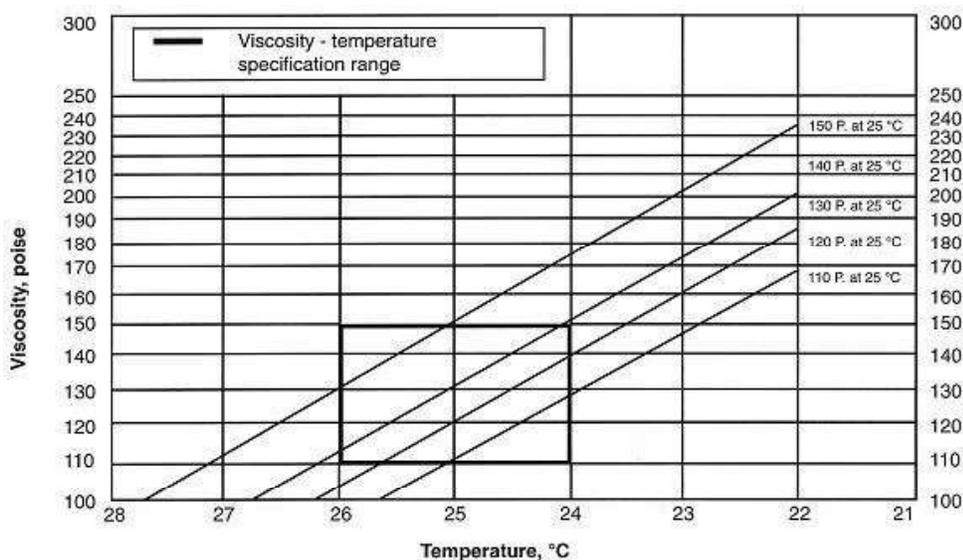
Product Description

EPON™ Resin 828 is an undiluted clear difunctional bisphenol A/epichlorohydrin derived liquid epoxy resin. When cross-linked or hardened with appropriate curing agents, very good mechanical, adhesive, dielectric and chemical resistance properties are obtained. Because of this versatility, EPON Resin 828 has become a standard epoxy resin used in formulation, fabrication and fusion technology.

Formulation and Application Information

For additional performance characteristics information covering adhesives, laminating, casting and molding applications, consult bulletin SC:67, entitled "EPON Resin Structural Reference Manual." For epoxy resin amine-cured coatings, consult bulletin SC:193, entitled "Formulating Amine-Cured Coatings with EPON Resin."

Figure 4 / Viscosity - temperature profile (for 5 samples of EPON™ Resin 828 ranging in viscosity from 110-150 poise)



Benefits

- Fiber reinforced pipes, tanks and composites
- Tooling, casting and molding compounds
- Construction, electrical and aerospace adhesives
- High solids/low VOC maintenance and marine coatings
- Electrical encapsulations and laminates
- Chemical resistant tank linings, flooring and grouts
- Base resin for epoxy fusion technology

Sales Specifications

Property	Standard	Value	Unit	Test Method
Color		1 max.	Gardner	ASTM D1544
Viscosity at 25°C		110 - 150	P	ASTM D445
Weight per Epoxide		185 - 192	g/eq	ASTM D-1625

Typical Properties

Property	Standard	Value	Unit	Test Method
Density at 25°C		9.7	lb/gal	ASTM D1475
Density		1.16	g/mL	
Refractive Index @ 25°C (77°F)		1.573		
Specific Heat		0.5	BTU/lb/°F	
Vapour Pressure @ 25°C (77°F)		0.03	mm Hg	

EPON Resin 828
<http://www.hexion.com/en-US/product/epon-resin-828>

Generated: March 11, 2018
Issue Date:
Revision: September 01, 2005

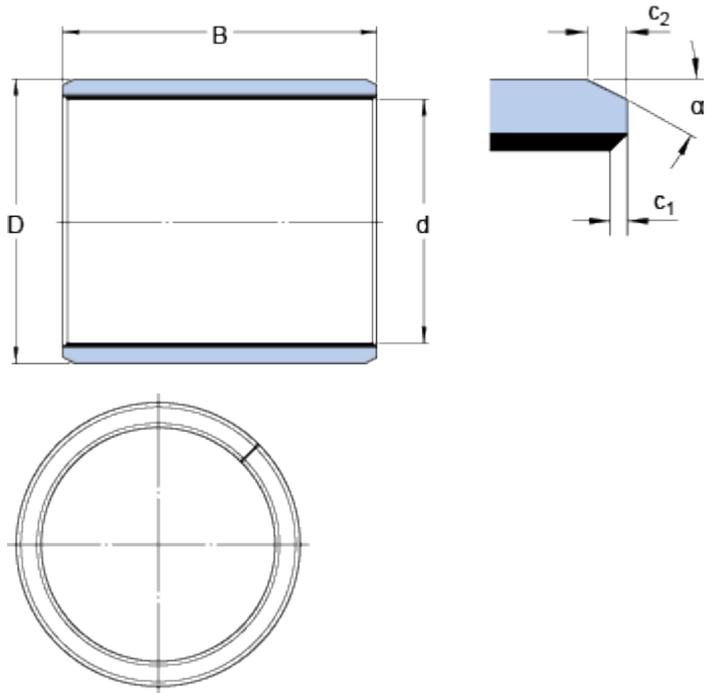
® and ™ Licensed trademarks of Hexion Inc.

The information provided herein was believed by Hexion Inc. ("Hexion") to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. All products supplied by Hexion are subject to Hexion's terms and conditions of sale. **HEXION MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION**, except that the product shall conform to Hexion's specifications. Nothing contained herein constitutes an offer for the sale of any product.

ANEXO B
AJUSTE EN BOCINES

PCM 303425 E

Dimensiones



d		30	mm
D		34	mm
B		25	mm
c ₁	min.	0.1	mm
c ₁	max.	0.7	mm
c ₂	min.	0.8	mm
c ₂	max.	1.6	mm
α	±8	20	°

Ajustes recomendados

Tolerancia de eje	f7
Tolerancia del soporte	H7

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica, sentido radial	C	58.5	kN
Capacidad de carga estática básica, sentido radial	C ₀	180	kN
Factor de carga dinámica específica	K	80	N/mm ²
Factor de carga estática específica	K ₀	250	N/mm ²
Factor según el tipo de material y rodamiento	K _M	480	
Velocidad admisible de deslizamiento	v	min. 0	m/s
Velocidad admisible de deslizamiento	v	max. 2	m/s
Coeficiente de fricción	μ	min. 0.03	
Coeficiente de fricción	μ	max. 0.25	

Masa

Cojinete de fricción de masa	0.037	kg
------------------------------	-------	----

ANEXO C
PROGRAMACIÓN TARJETA
ARDUINO UNO

```

// SE INCLUYEN LIBRERIAS UTILIZADAS
#include "LiquidCrystal.h"
#include "max6675.h"

// CONFIGURACION DE LOS PINES PARA LA COMUNICACIÓN CON EL MAX6675 Y SSR
#define GND_PIN      4    // ALIMENTACION GND
#define VCC_PIN      1    // ALIMENTACION VCC
#define SCK_PIN      8    // SPI SCK
#define CS_PIN       9    // SPI CS
#define MISO_PIN     10   // SPI MISO
#define SSR_PIN      12   // RELAY

// CONFIGURACION DE LOS PINES PARA LA COMUNICACIÓN CON LA PANTALLA
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);

// OBJETO UTILIZADO PARA LA COMUNICACION CON EL MAX6675
MAX6675 thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, MISO_PIN);

void setup() {
// PREPARAR LA INTERFAZ SERIAL
  Serial.begin(9600);

// USAR PINES DE ARDUINO PARA ALIMENTAR EL MODULO MAX6675
  pinMode(VCC_PIN, OUTPUT); digitalWrite(VCC_PIN, HIGH);
  pinMode(GND_PIN, OUTPUT); digitalWrite(GND_PIN, LOW);

// SE INDICA QUE TENEMOS CONECTADA UNA PANTALLA DE 16X2
// IMPRIMIR MENSAJE INICIAL EN PANTALLA
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
  lcd.print(F("INDICADOR TEMPERATURA"));
  lcd.setCursor( 0, 1 );
  lcd.print(F(" LISTO  "));
// ESPERAR UN SEGUNDO
  delay(1000);
}

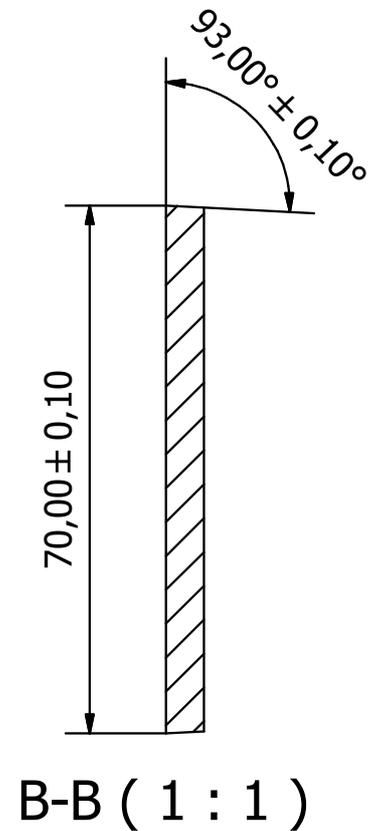
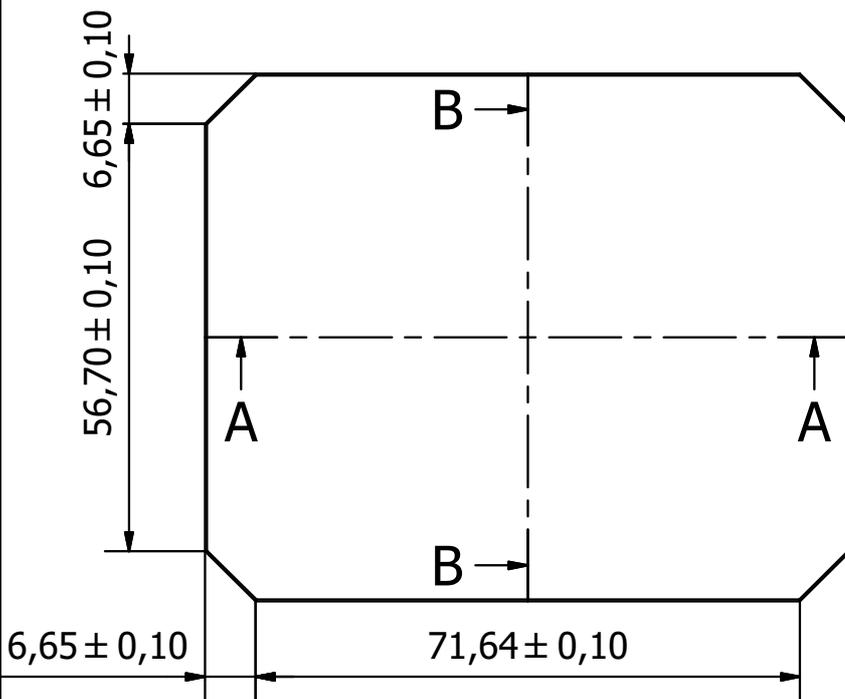
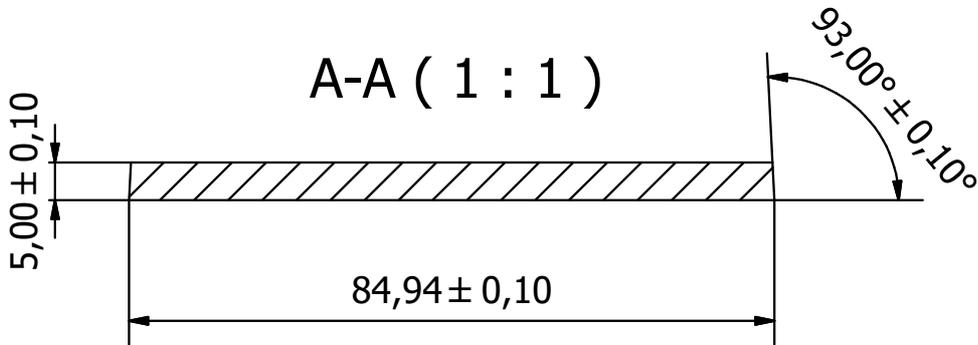
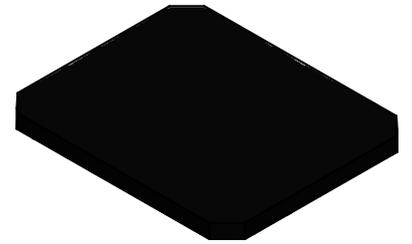
void loop() {
// LEER EL TERMOPAR Y ALMACENAR EL VALOR EN UNA VARIABLE
  double t = thermocouple.readCelsius();
// PRIMERO SE LIMPIA LA PANTALLA Y LUEGO SE MUESTRA LA TEMPERATURA
  lcd.clear();
  lcd.print(F("->TEMPERATURA<-"));
  lcd.setCursor( 3, 1 );
  lcd.print(t);
}

```

```
// ESPERAR UN SEGUNDO
    delay(1000);
}

//SE EJECUTA EL CONTROL POR MEDIO DEL SSR
void control() {
    double t = thermocouple.readCelsius();
    if (t<95)
    digitalWrite(SSR_PIN, HIGH);
    else if (t>105)
    digitalWrite(SSR_PIN, LOW);
}
```

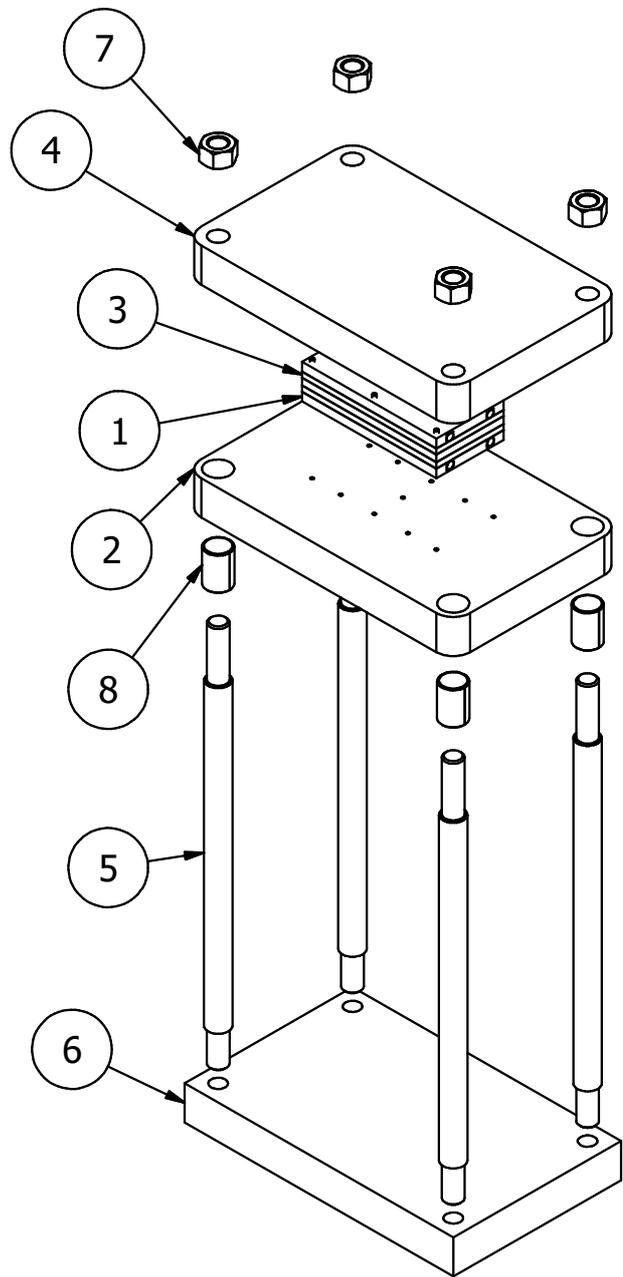
ANEXO D
GEOMETRÍA DE PLACA BIPOLAR



Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha	Fecha 27/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Placa Bipolar Lisa		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 1 / 1

ANEXO E

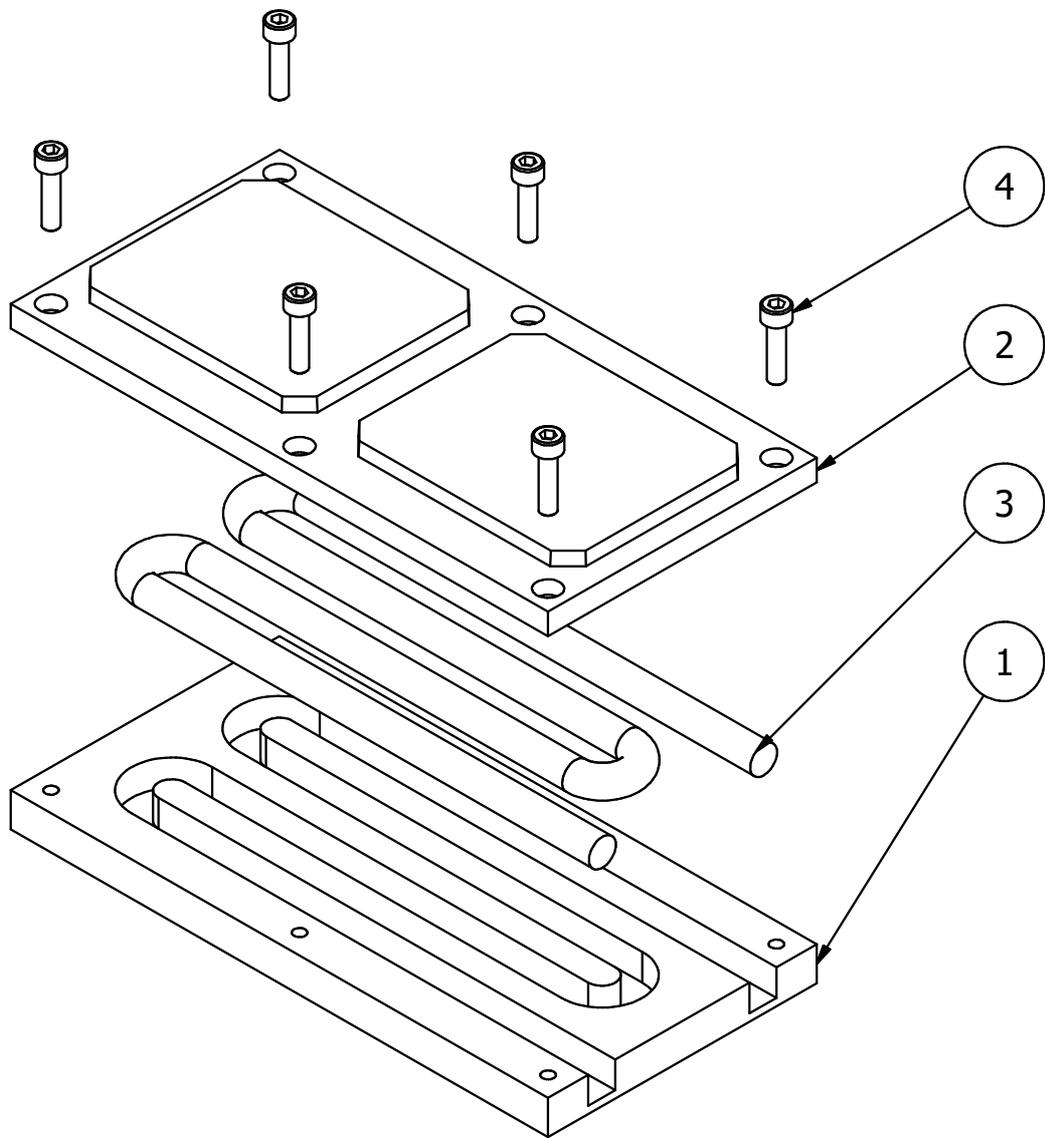
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Dado Inferior	Ver detalles siguiente página
2	1	Zapata Inferior	ASTM A36
3	1	Dado Superior	Ver detalles siguiente página
4	1	Zapata Superior	ASTM A36
5	4	Seguidor	AISI 1020
6	1	Base	ASTM A36
7	4	Tuerca M24X3	G8.8
8	4	Cojinete	AISI 4340

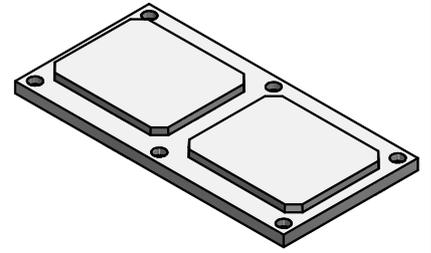
Diseño de L. Saavedra	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 25/8/2018	Fecha 23/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura		Sistema de Compresión bajo Temperatura			
		Laboratorio FREE		Edición A	Hoja 1/13



LISTA DE PIEZAS

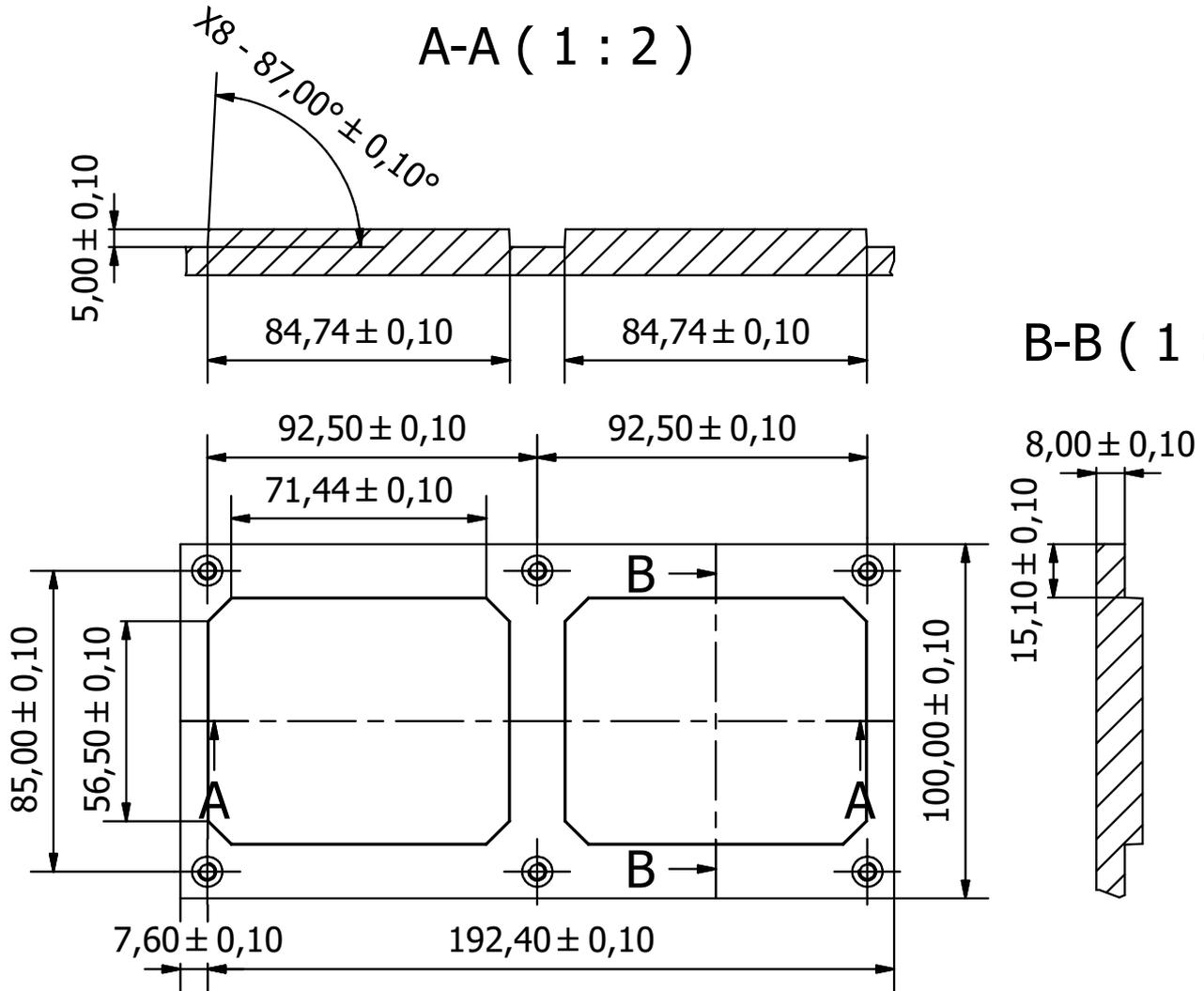
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base de Dado S.	ASTM A36
2	1	Placa Positiva	ASTM A36 / CROMADO
3	1	Resistencia Eléctrica	500 W
4	6	M5x0.8 x 20mm	Allen G5.8

Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 25/8/2018	Fecha 24/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Dado Superior		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 2/13



A-A (1 : 2)

B-B (1 : 2)

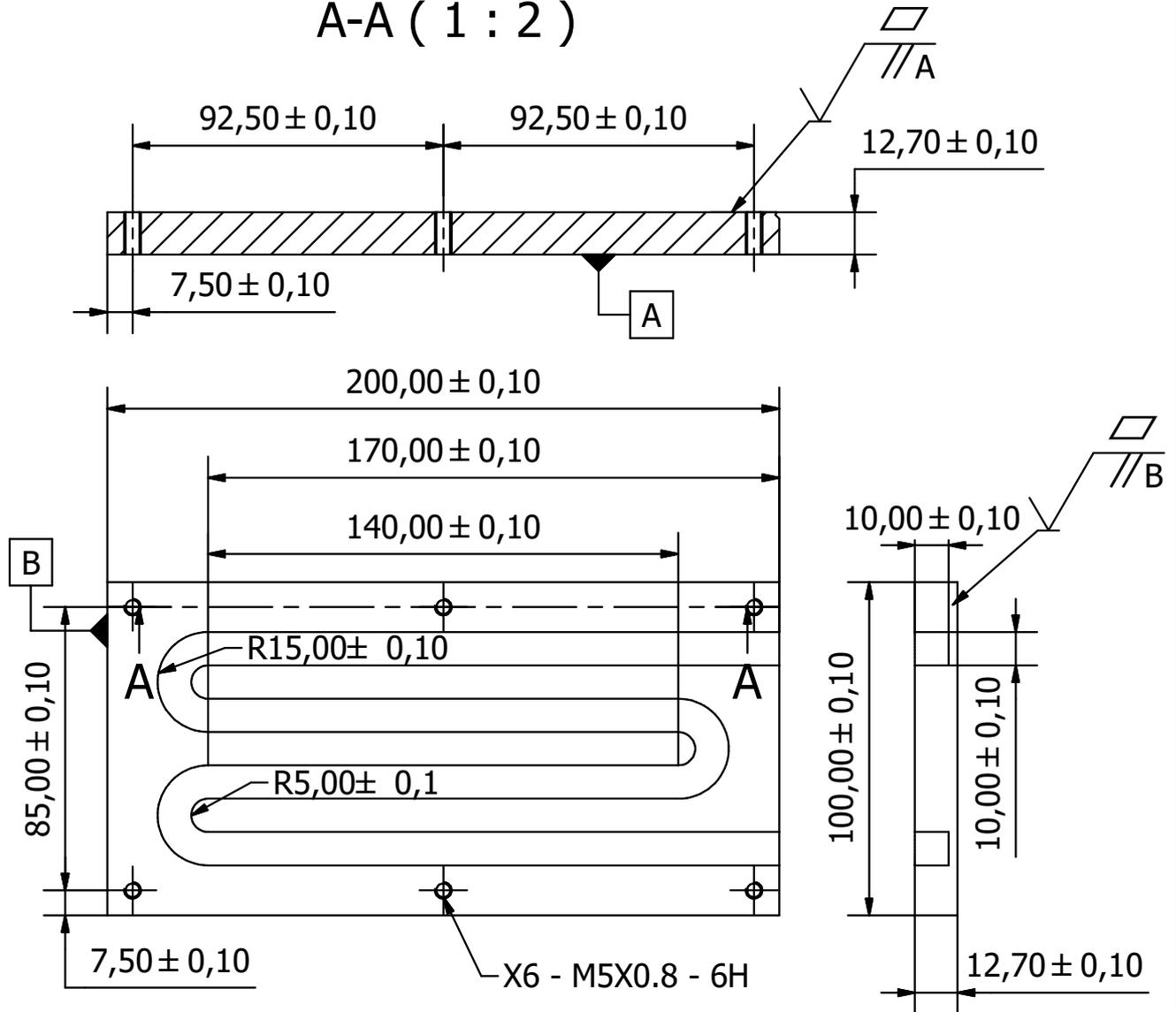


RECTIFICADO &
CROMADO 0.03 mm

Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 21/8/2018	Fecha 20/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Placa Positiva		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 3/13

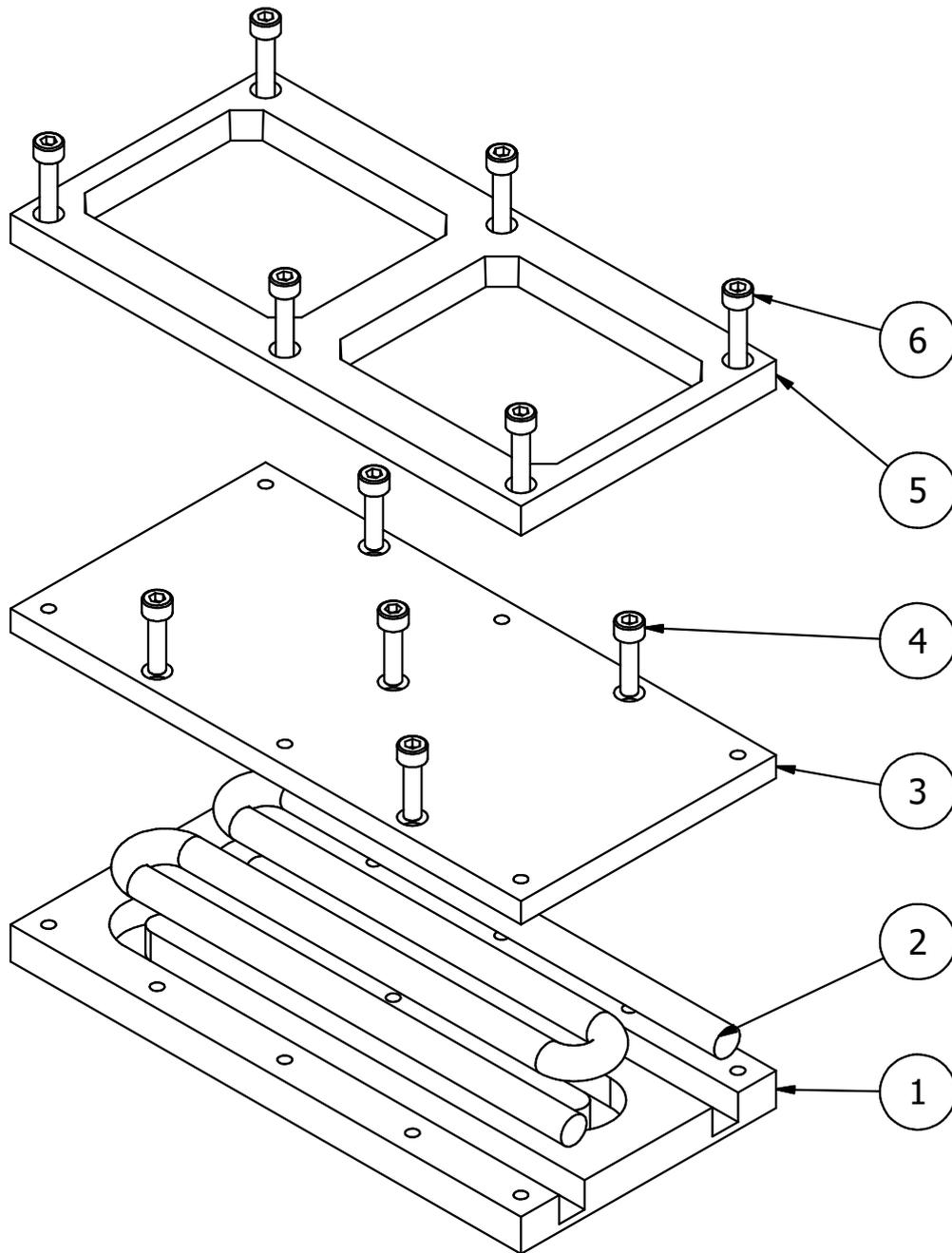


A-A (1 : 2)



Las medidas del canal para la resistencia eléctrica son solo referenciales, consultar las dimensiones de la resistencia empleada

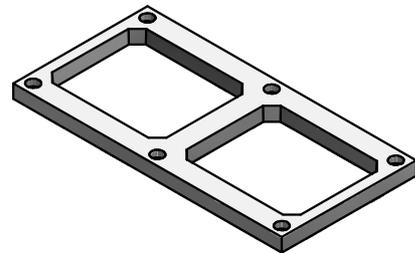
Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 21/8/2018	Fecha 20/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Base de Dado Superior		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 4/13



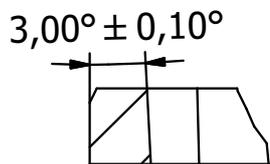
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base de Dado I.	ASTM A36
2	1	Resistencia Eléctrica	500 W
3	1	Placa Lisa	ASTM A36 / CROMADO
4	5	M5x0.8 x 20mm	Allen G5.8
5	1	Placa Negativa	ASTM A36 / CROMADO
6	6	M5x0.8 x 30mm	Allen G5.8

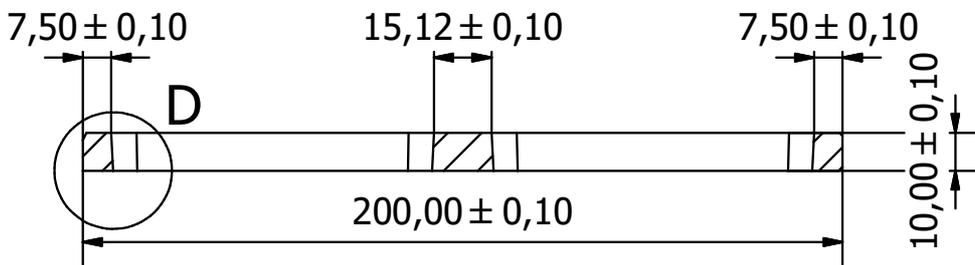
Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 25/8/2018	Fecha 24/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Dado Inferior		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 5/13



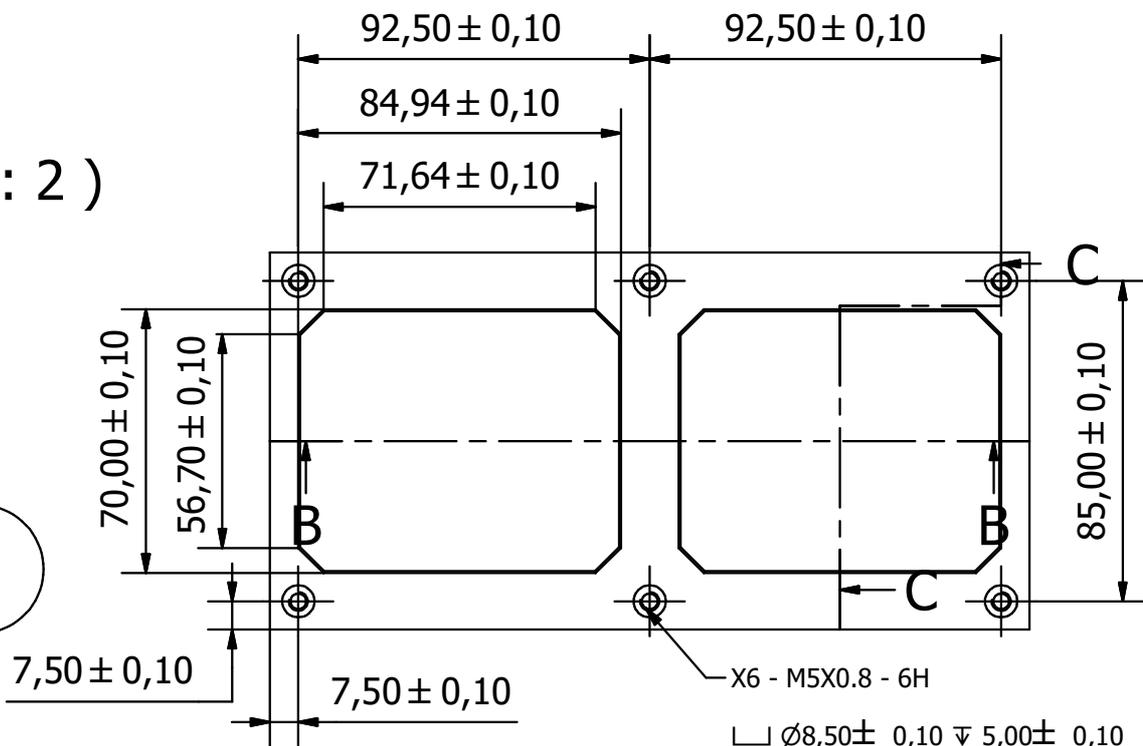
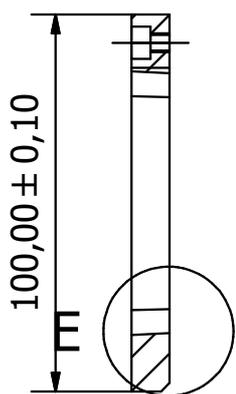
D (1 : 1)



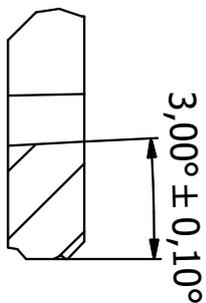
B-B (1 : 2)



C-C (1 : 2)

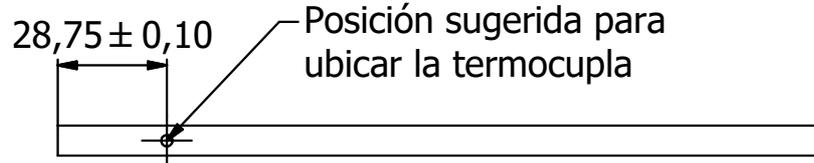
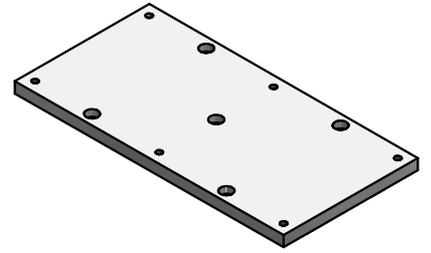


E (1 : 1)

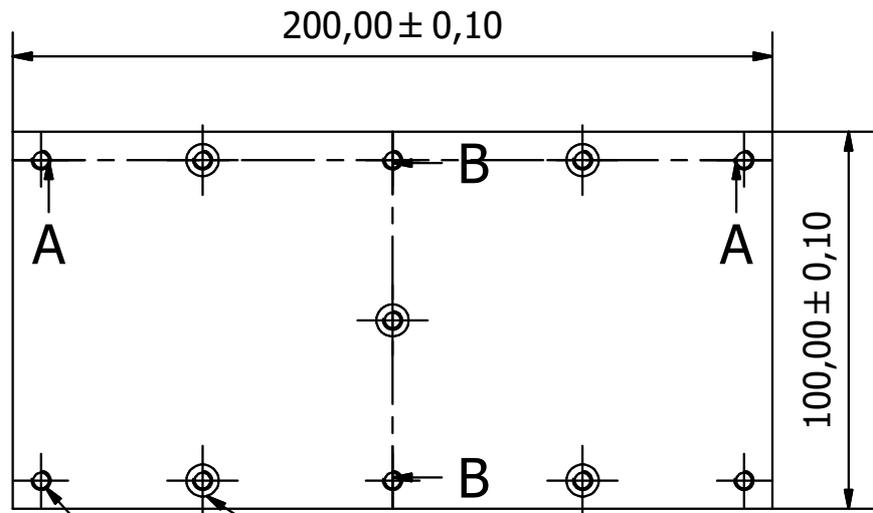
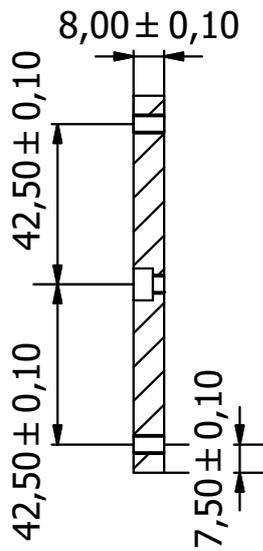


RECTIFICADO &
CROMADO 0.03 mm

Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 19/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Placa Negativa		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 6/13

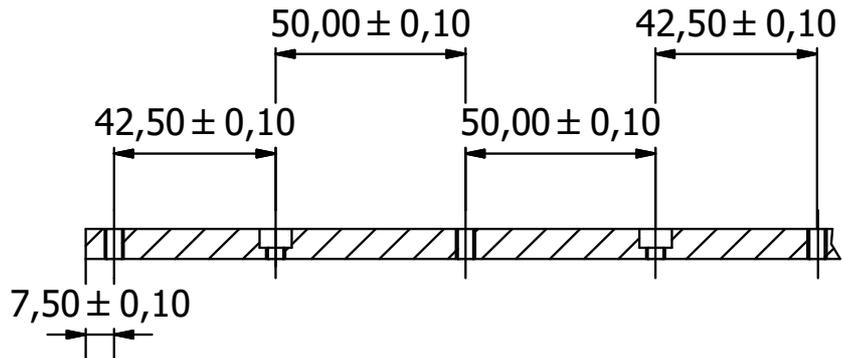


B-B (1 : 2)



X5 - M5X0.8 - 6H
 L $\varnothing 8.50 \pm 0,10$ $\nabla 5,00 \pm 0,10$

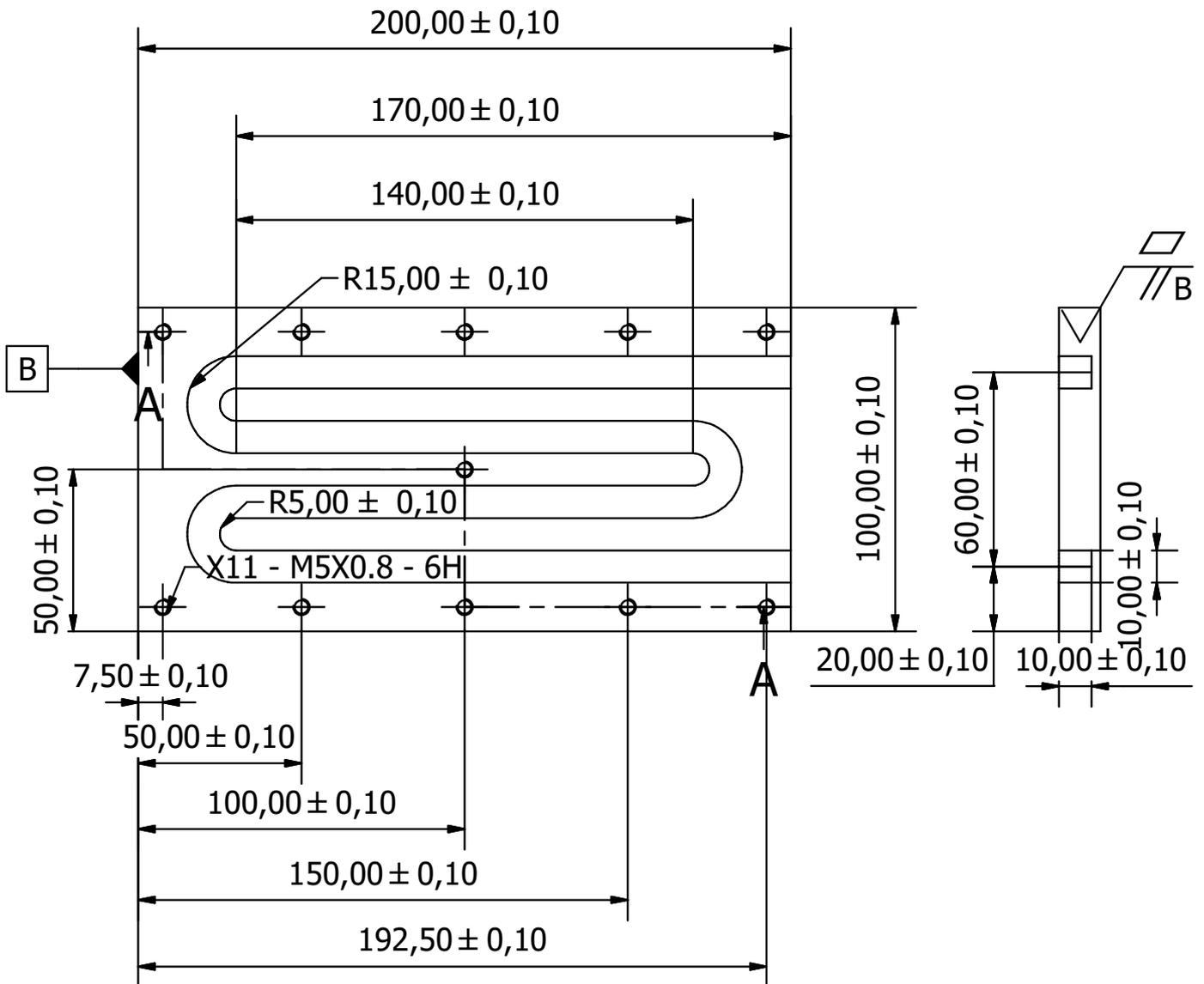
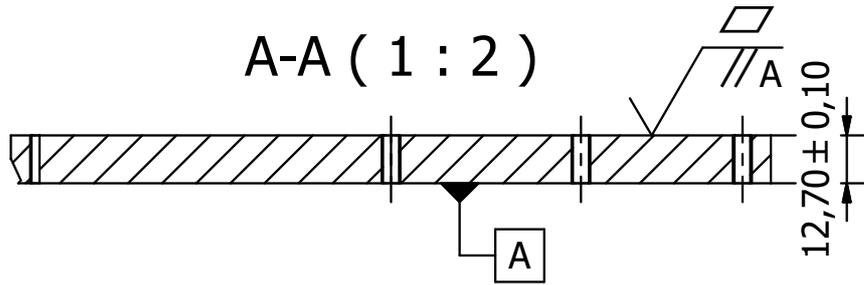
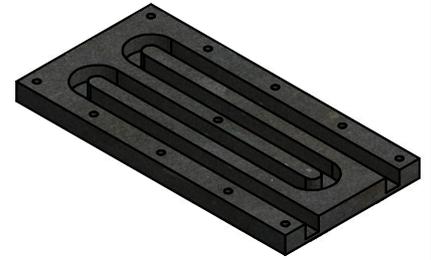
X6 - M5X0.8 - 6H



A-A (1 : 2)

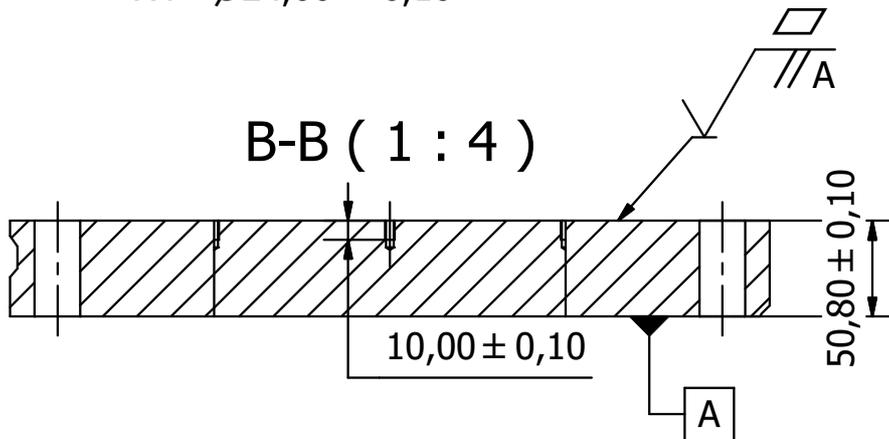
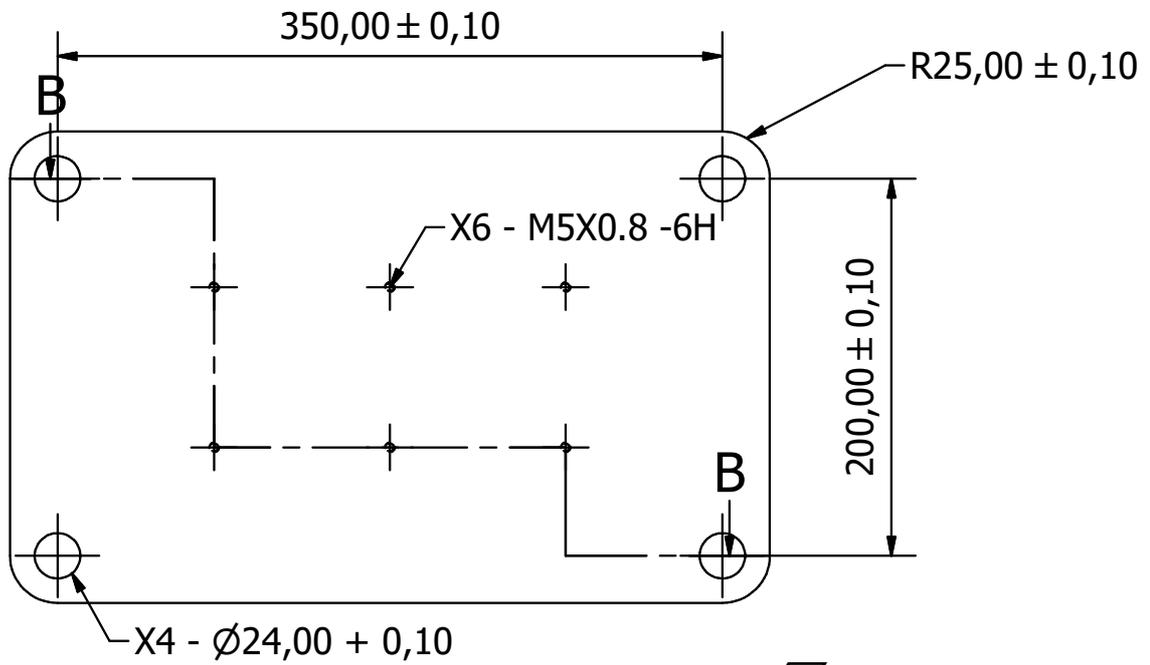
RECTIFICADO &
 CROMADO 0.03 mm

Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 19/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Placa Lisa		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 7/13

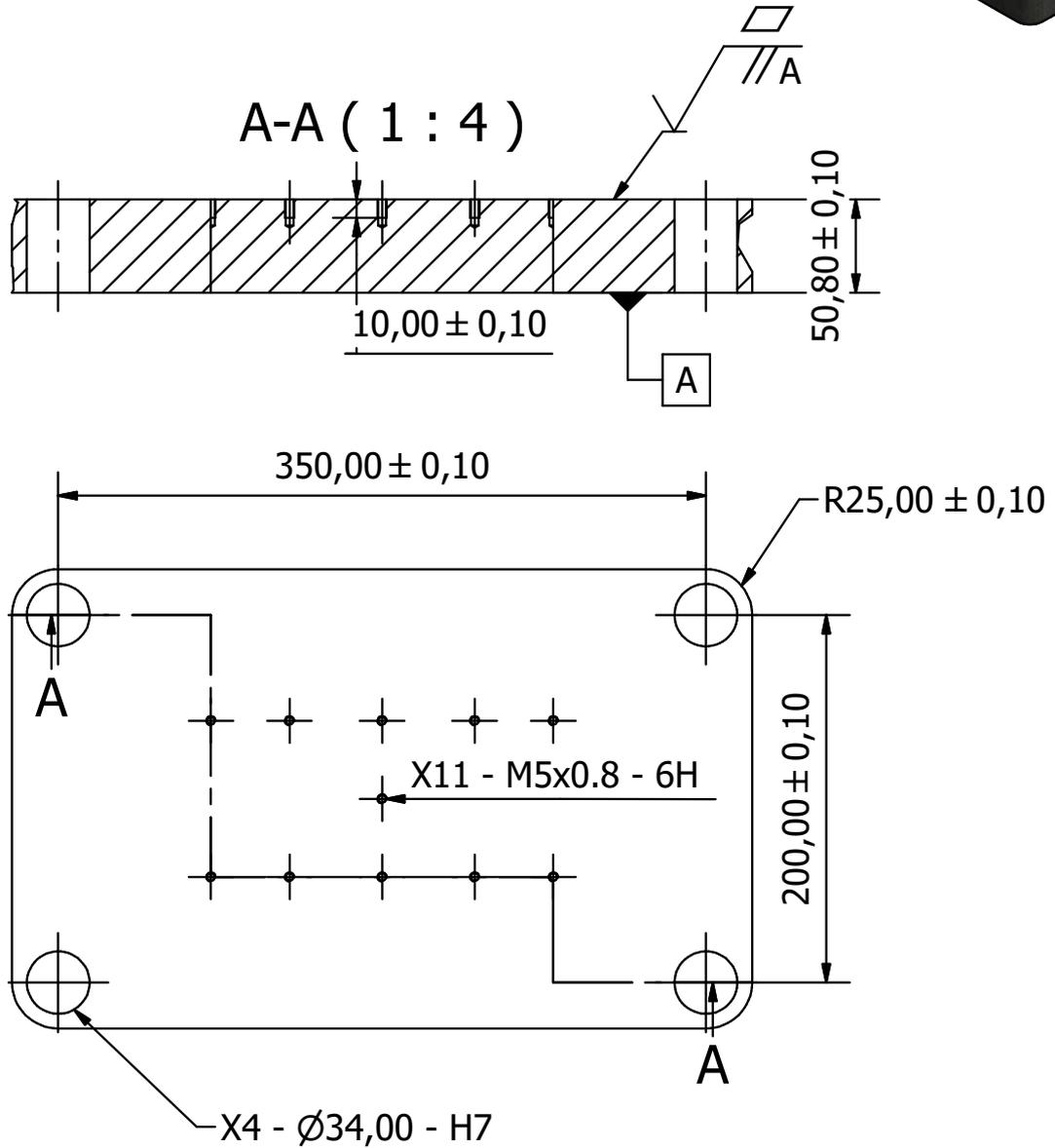


Las medidas del canal para la resistencia eléctrica son solo referenciales, consultar las dimensiones de la resistencia empleada

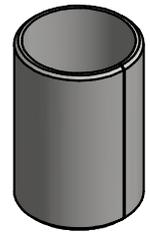
Diseño de J. Díaz	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 19/8/2018
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Base de Dado Inferior	
Laboratorio FREE			Edición A	Hoja 8/13



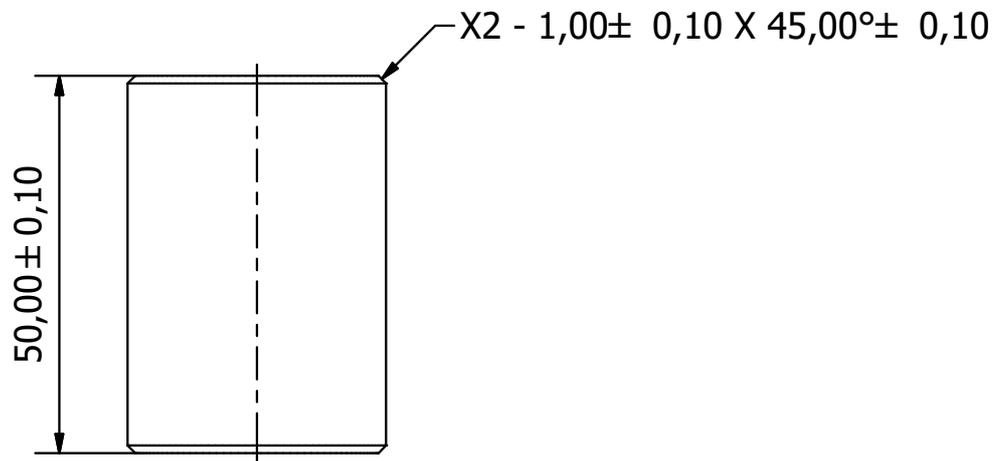
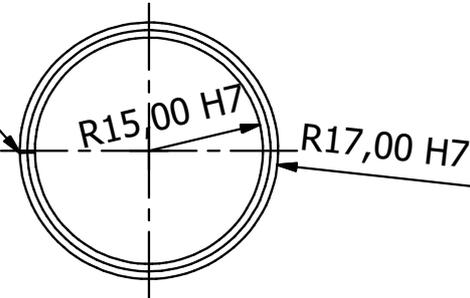
Diseño de L. Saavedra	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 18/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Zapata Superior		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 9/13



Diseño de L. Saavedra	Revisado por D: Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 18/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Zapata Inferior		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 10/13



Corte con hoja de sierra



Diseño de L. Saavedra	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 18/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Cojinete		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 11/13

$\varnothing 20,00 \pm 0,10$

$\varnothing 28,00 \pm 0,10$

$2,00 \pm 0,10 \times 45,00^\circ \pm 0,10^\circ$

M24x3 - 6g

$75,80 \pm 0,10$

$1,00 \pm 0,10 \times 45,00^\circ \pm 0,10^\circ$

$576,60 \pm 0,10$

30,00 h7

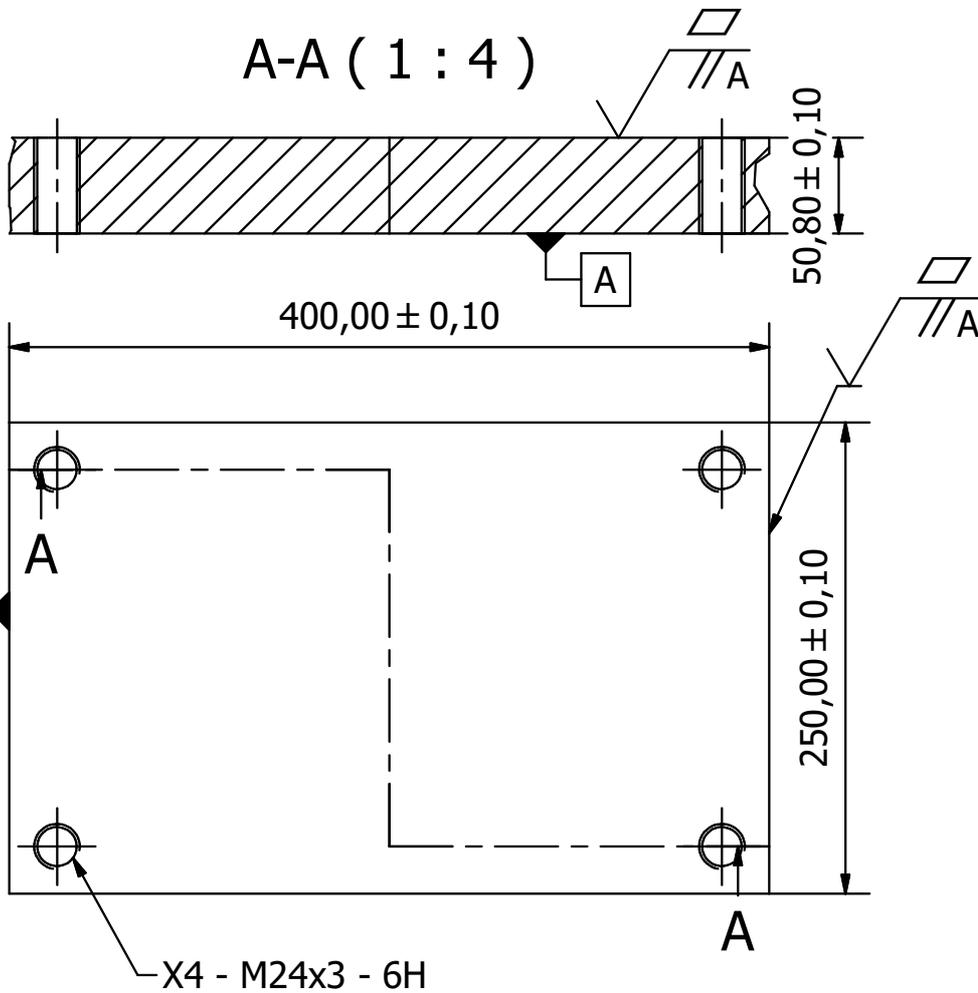
$50,80 \pm 0,10$

M24x3 - 6g

Diseño de L. Saavedra	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 18/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Pin-Seguidor		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 12/13



A-A (1 : 4)



Diseño de L. Saavedra	Revisado por D. Soriano	Aprobado por A. Rigail	Fecha 20/8/2018	Fecha 18/8/2018	
Proyecto: Sistema de Compresión bajo Temperatura			Base		
			Laboratorio FREE	Edición A	Hoja 13/13

ANEXO F
COTIZACIONES Y RESUMEN
DE COSTOS

JONNY CASTRO O. (MECANICO INDUSTRIAL)

DIR: BEATA MERCEDES MOLINA

EMAIL: jevaco22@gmail.com

TELF: 0994179100 / 0994181044 / 04- 2842379

RUC: 0911617504001

Guayaquil, 17 de agosto del 2018

SEÑOR

Atte:

JOSÉ IGNACIO DÍAZ PILPE

Mediante el presente pongo a usted (s) en consideración y estudio la oferta de lo siguiente:

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTALES
4	Pines seguidores	\$ 17,00	\$ 68,00
2	Zapatas	\$ 45,00	\$ 90,00
1	Base	\$ 30,00	\$ 30,00
4	Bocines	\$ 12,00	\$ 48,00
2	Dado superior inferior	\$ 130,00	\$ 260,00
1	Dado centro	\$ 110,00	\$ 110,00
2	Placa serpentín resistencia	\$ 155,00	\$ 310,00
SUBTOTAL			\$ 916,00
IVA (12%)			\$ 109,92
TOTAL			\$ 1.025,92

SON: UN MIL VEINTE Y CINCO 92/100 DOLARES AMERICANOS

ESTOS PRECIOS YA INCLUYEN IVA

FORMA DE PAGO:

ANTICIPO DEL TRABAJO: 50%

CONTRAENTREGA DE LA MISMA: 50%

TIEMPO DE ENTREGA: 10 DIAS LABORALES UNA VEZ RECIBIDO LOS MATERIALES

GUSTOSO DE BRINDARLE UN BUEN SERVICIO

MUY ATENTAMENTE,

Ing. Daniel Soriano

Coordinador I +D

MATRIZ MANTA: Av. 24 de Mayo y Calle 4ta., esquina Telf: (05) 2620839-2624952-097633993
QUITO Norte: Gualaquiza Oe4-177 y Av. de la Prensa Telf: (02) 3960900
QUITO Sur: Taura y Panamericana Sur Km 5 - 1/2 Telf: (02) 2671310

ESTABLECIMIENTOS:

AMBATO: Av. Atahualpa y Juan Jaramillo, Esquina Telf: (03) 2585682 - 2585601

CUENCA: Av. 12 de Abril entre Imbabura y El Oro Telf: (07) 2810042 - 2884788

EL COCA: Av. 9 de Octubre y Cuyabeno, esquina Telf: (06) 2860031 - 2860047

GUAYAQUIL: Planta: Vía Daule Km 10-1/2 Telf: (04) 2111319 - 2111411

(Alfa): Vía Daule Km 10-1/2 Telf: (04) 2111319 - 2111411

(Planta2): Vía Daule Km 10-1/2 Telf: (04) 2111319 - 2111411

Local 2 Norte: Vía Daule Km 8-1/2 Telf: (04) 6026653 - 6026654

Local 3 Sur: Eloy Alfaro y Calcuchima, Esquina Telf: (04) 2415371

IBARRA: Av. Cristobal de Troya y Mejía Telf: (06) 2604596 - 2604597

LAGO AGRIJO: Vía a Quito Km 2-1/2 Barrio los Ceibos (Frente a la Nueva Clínica Gorzález) Telf: (06) 2363116

LOJA: Calle Ambato, entre Ibarra y Tulcán Telf: (07) 2550609

MACHALA: Guayas y El Guabo, esquina Telf: (07) 2921763 - 2921577

MILAGRO: Av. 17 de Septiembre y Colón Telf: (04) 2973671 - 2971356

PORTOMIEJO: Av. Universitaria y César Chávez Caharte Telf: (05) 2633105 - 2634569

QUEVEDO: Vía a Valencia Km. 1 Telf: (05) 2781618 - 2781229

RIOBAMBA: Av. Lizarzaburo y Monseñor Leonidas Proaño Telf: (03) 2600137 - 2605383

STO. DOMINGO: Vía Quevedo Km 3-1/2, frente al Bypass Vía Chone y vía Esmeraldas

Telf: (02) 3703144 - 3703145

DIPAC MANTA S.A.
R.U.C. 1390060757001

CONTRIBUYENTE ESPECIAL
RESOLUCIÓN 5388 DEL 2 DE JUNIO 1995 DIPAC MANTA S.A.



WWW.DIPACMANTA.COM

- La mercancía viaja por cuenta y riesgo del comprador.
- Salida la mercancía de nuestros almacenes no se aceptan reclamos.
- Los pagos deben realizarse con cheque cruzado a nombre de DIPAC MANTA S.A.

- Somos contribuyentes especiales favor no retener el IVA
- Emitir los comprobantes de retención a nombre de DIPAC MANTA S.A.

Num. Pedido

82800220

22/08/2018

NOMBRE/RAZON SOCIAL: 009999999 LUIS SAAVEDRA

Ruc / Cédula: 0930315205

Dirección: .

Telf: 999999

fe-dipac@dipacmanta.com

Forma/Pago: 01 CONTADO

ESTA COTIZACION ES VALIDA SOLO POR 1 DIA

Ord.	Artículo	Descripción	Und.	Cantidad	Precio	Total USD.
1	EF18112	E.AC.FRIO 1 1/2(8.9497 KG/MT)"	Kg	27,74	1,54	42,72
2	OXILC0150	OXICORTES 15mm	Kg	15,54	1,39	21,60
3	OXILC0650	OXICORTES 65mm	Kg	194,40	1,23	239,11
		NO DISPONEMOS UNICAMENTE EN 0,50 Y 0,75				
4	E434038	EJE 4340 L/C38MM (8,9028 KG/MT	Kg	9,79	3,48	34,07

ESTE DOCUMENTO NO CONSTITUYE VENTA Y LOS PRECIOS PUEDEN CAMBIAR SIN PREVIO AVISO

VENDEDOR: GILCES GILCES MARIA JOSE

Celular:

Subtotal 337,50

IVA 40,50

Total USD. 378,00

FIMCP



Proyecto	Sistema para Elaboración de Placas Bipolares
Fecha	20/08/2018

LISTA DE CANTIDAD Y PRECIO

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PROVEEDOR	P. UNITARIO	COSTOS	
					CANTIDAD	SUB-TOTAL
1. MATERIALES						
1	ACERO A36 e=65mm	KG	DIPAC	\$ 1.23	194.40	239.11
2	ACERO A36 e=15mm	KG	DIPAC	\$ 1.39	15.54	21.60
3	ACERO 1020 ϕ =1 1/2"	KG	DIPAC	\$ 1.54	27.74	42.72
4	ACERO 4340 ϕ =1 1/2"	KG	DIPAC	\$ 3.48	9.79	34.07
5	TUERCA M24x3 G8.8	UNIDAD	TORNIPERNO	\$ 0.59	4.00	2.34
6	PERNO ALLEN M5x0.8 x 20mm G5.8	UNIDAD	TORNIPERNO	\$ 0.80	11.00	8.77
7	RESISTENCIA ELÉCTRICA 500W	UNIDAD	KGV	\$ 89.00	2.00	178.00
8	TARJETA ARDUINO UNO	UNIDAD	ADVANCE	\$ 16.99	2.00	33.98
9	MÓDULO MAX6675	UNIDAD	ADVANCE	\$ 6.00	2.00	12.00
10	MÓDULO RELÉ ARDUINO 10A	UNIDAD	ADVANCE	\$ 4.75	2.00	9.50
11	PANTALLA LCD 16x2	UNIDAD	ADVANCE	\$ 4.75	2.00	9.50
12	TERMOCUPLA	UNIDAD	KGV	\$ 3.50	2.00	7.00
2. MECANIZADO						
1	PIN SEGUIDOR	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 17.00	4.00	68.00
2	ZAPATA	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 45.00	2.00	90.00
3	BASE	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 30.00	1.00	30.00
4	BOCÍN	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 12.00	4.00	48.00
5	DADO SUPERIOR/INFERIOR	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 130.00	2.00	260.00
6	DADO CENTRO	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 110.00	1.00	110.00
7	PLACA SERPENTÍN	UNIDAD	J.CASTRO	\$ 155.00	2.00	310.00
8	CROMADO DADOS	UNIDAD	CROBET	\$ 100.00	2.00	200.00
TOTAL SIN IVA						USD 1,714.59