

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

Implementación de un dispositivo de moldeo por compresión térmica para  
la fabricación de placas de flujo como celdas de combustible.

INGE-2759

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Carlos Luis Layedra De La Torre

Gabriel Patricio Vergara Alvarado

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, cuyo apoyo constante y ardua espera para llegar a este momento fueron de gran ayuda emocional para este importante reto profesional. A mi novia que estuvo durante toda mi carrera le dedico este logro que en parte se debe a fruto de su amor y apoyo incondicional.

**Carlos Luis Layedra De La Torre.**

El siguiente trabajo está dedicado a mis padres y hermanos, quienes han sido pilares fundamentales durante todo el proceso de realización. Sin sus consejos y palabras de aliento ante los obstáculos que se presentaron, no habría logrado culminarlo con éxito.

**Gabriel Patricio Vergara Alvarado**

## **AGRADECIMIENTOS**

“Con profunda gratitud, reconozco el apoyo fundamental de mis padres, cuyo amor y sacrificio han sido el cimiento de este logro. A mis hermanos, compañeros de vida, agradezco su aliento constante. Mi especial agradecimiento a mi novia, cuyo cariño y comprensión iluminaron el camino. A mis profesores, que ofrecieron sus conocimientos sin límites para convertir a profesionales de calidad. Finalmente, a mi compañero de tesis, valoro su colaboración y amistad incondicional en este arduo pero gratificante proceso.”

**Carlos Luis Layedra De La Torre**

“Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de aquellas personas que, de distintas maneras, me acompañaron en este camino: mis padres, hermanos, abuelos y amigos. A todos ellos les expreso mi más sincero agradecimiento por su ayuda y respaldo, los cuales fueron fundamentales para alcanzar el final de esta etapa tan importante en mi vida. Muchas gracias por estar siempre conmigo.”

**Gabriel Patricio Vergara Alvarado**

## Declaración Expresa

---

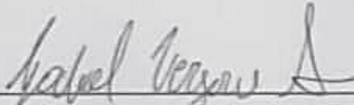
Nosotros Gabriel Patricio Vergara Alvarado y Carlos Luis Layedra De La Torre acordamos y reconocemos que:

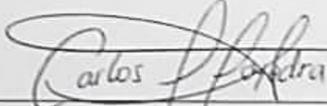
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 1 de octubre del 2024.

  
Gabriel Patricio Vergara Alvarado

  
Carlos Luis Layedra De La Torre

## **EVALUADORES**

---

**Francis Loayza Paredes, PhD.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Mayken Espinoza Andaluz, PhD.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Este proyecto se centra en el desarrollo de un sistema de fabricación rápido y preciso de las placas de flujo, para mejorar la eficiencia de las celdas de combustibles de hidrógeno que se está desarrollando en el laboratorio de energías renovables (Lab. FREE) de la ESPOL. En la siguiente etapa de investigación se propuso realizar un dispositivo de fabricación rápido y preciso que trabaje bajo estrictos parámetros de temperatura y presión, empleando materiales adecuados para su fabricación, tales como acero H-13, ASTM A36, Acero plata y bronce; así como también mejorar el sistema de control de temperatura que se encuentra en el laboratorio para ser adaptado a este nuevo método de fabricación. A continuación, se procedió a realizar los planos correspondientes siguiendo con las restricciones propuestas por el laboratorio, además de la simulación tanto de presión como de temperatura para comprobar la fiabilidad de los elementos empleados en la fabricación del molde. Por lo tanto, se obtuvo un molde de características aceptables que cumplen parámetros de diseño, requerimientos de la parte solicitante y además se logra cuantificar y distribuir uniformemente la temperatura para la fabricación de placas bipolares.

**Palabras Clave:** Celdas de combustible, placas de flujo, moldeo por compresión térmica, materiales compuestos.

## **ABSTRACT**

This project focuses on developing a fast and precise manufacturing system for flow plates, aimed at improving the efficiency of hydrogen fuel cells being developed in the Renewable Energy Laboratory (FREE) at ESPOL. The following research stage aimed to develop a fast and precise manufacturing device that operates under strict temperature and pressure conditions, using suitable materials such as H-13 steel, ASTM A36, silver steel, and bronze. It also aims to improve the laboratory's existing temperature control system for adaptation to this new manufacturing method. Subsequently, the corresponding drawings were made, adhering to the laboratory's proposed restrictions, as well as pressure and temperature simulations to verify the reliability of the elements used in mold fabrication. Therefore, a mold with acceptable characteristics was obtained. It meets the design parameters and the requirements of the requesting party. Furthermore, it achieves the quantification and uniform distribution of temperature for manufacturing bipolar plates.

**Keywords:** Fuel cells, flow plates, thermal compression molding, composite materials.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	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 .....	2
1.1.    Descripción del problema.....	3
1.2.    Justificación del problema.....	4
1.3.    Objetivos.....	4
1.3.1. <i>Objetivo General</i> .....	4
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.4.    Marco teórico .....	5
1.4.1. <i>Moldeo por compresión</i> .....	5
1.4.2. <i>Maquinado y herramientas de corte</i> .....	5
1.4.3. <i>Transferencia de calor</i> .....	6
1.4.4. <i>Convección libre para platos verticales</i> .....	7
1.4.5. <i>Deformación por compresión de la sección hembra y macho del molde</i> .....	9
CAPÍTULO 2 .....	10
2.    Metodología.....	11
2.1.    Consideraciones de diseño.....	12
2.2.    Alternativas de solución para la fabricación del molde.....	12
2.2.1. <i>Alternativa 1</i> .....	12

2.2.2.	<i>Alternativa 2</i> .....	13
2.2.3.	<i>Alternativa 3</i> .....	14
2.3.	Criterios de diseño .....	16
2.4.	Matriz de decisión .....	17
2.5.	Diseño del molde .....	17
2.5.1.	<i>Selección de la mejor alternativa</i> .....	17
2.5.2.	<i>Diseño de forma</i> .....	18
2.5.3.	<i>Resistencias para el calentamiento del molde</i> .....	20
2.5.4.	<i>Fabricación del molde</i> .....	21
2.5.5.	<i>Sistema de control de temperatura</i> .....	21
2.5.6.	<i>Método de análisis por elementos finitos</i> .....	23
CAPÍTULO 3	.....	25
3.	Resultados y análisis .....	26
3.1.	Especificaciones de materiales .....	26
3.2.	Espesor mínimo requerido .....	26
3.3.	Análisis de deformación del molde .....	28
3.4.	Simulación de deformación Fusion 360 .....	30
3.5.	Análisis térmico del molde. ....	30
3.6.	Cálculo de pérdidas por convección .....	31
3.7.	Cálculo de conducción de calor hacia la placa .....	36
3.8.	Simulación de temperatura del molde .....	37
3.8.1.	<i>Fusion 360</i> .....	37
3.8.2.	<i>Simulación MATLAB</i> .....	39
3.9.	Sistema de control de temperatura .....	42
3.10.	Costos de Fabricación .....	45
3.11.	Análisis de costos .....	46
3.12.	Análisis de resultados .....	47
3.13.	Análisis comparativo de resultados .....	49

CAPÍTULO 4 .....	51
4. Conclusiones Y Recomendaciones.....	52
4.1. Conclusiones .....	52
4.2. Recomendaciones .....	53
BIBLIOGRAFÍA	
APÉNDICE A	

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEM	Finite element method
PWM	Pulse Width Modulated
ISO	International Organization for Standardization
MATLAB	Matrix Laboratory

## SIMBOLOGÍA

m	Metro
V	Voltios
mm	Milímetro
N	Newton
in	Pulgada
°C	Grados Celsius
W	Watts
psi	Libras por pulgada cuadrada
Pa	Pascal
A	Amperios

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de flujo del proyecto .....	11
Figura 2.2 Alternativa de solución 1.....	13
Figura 2.3 Alternativa de solución 2.....	14
Figura 2.4 Alternativa de solución 3.....	15
Figura 2.5 Diseño de forma de la alterativa 3 .....	18
Figura 2.6 Estructura de las resistencias de cartucho .....	20
Figura 3.1 Dibujos con medidas finales y estructura del molde .....	28
Figura 3.2 Simulación de deformación en Fusion 360 .....	30
Figura 3.3 Variación de coeficiente de convección vs temperatura- 50 mm x 120 mm .....	32
Figura 3.4 Variación de coeficiente de convección vs temperatura- 50 mm x 200 mm .....	34
Figura 3.5 Relaciones de la simulación-Fusion 360.....	38
Figura 3.6 Simulación de distribución de temperatura de Fusion 360 - Sección hembra .....	38
Figura 3.7 Simulación de distribución de temperatura de MATLAB - Sección hembra .....	39
Figura 3.8 Foto Cámara termográfica (sección hembra – vista superior) tiempo transcurrido 16 min .....	40
Figura 3.9 Simulación de distribución de temperatura de Fusion 360 - Sección macho.....	41
Figura 3.10 Foto cámara termográfica (molde ensamblado – vista lateral) tiempo transcurrido 30 min .....	42
Figura 3.11 Circuito del sistema de calentamiento .....	43
Figura 3.12 Gráfico del comportamiento térmico del sistema .....	44
Figura 3.13 Sujeción del sistema sobre la bancada.....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matriz con un solo canal de extracción y cuatro columnas guías .....	13
Tabla 2.2 Matriz sin canales de extracción y dos columnas guías .....	14
Tabla 2.3 Matriz con dos canales de extracción y cuatro columnas guías .....	15
Tabla 2.4 Descripción de las alternativas de solución .....	16
Tabla 2.5 Criterios y valor de importancia.....	16
Tabla 2.6 Matriz de decisión.....	17
Tabla 2.7 Análisis comparativo de ventajas y desventajas de las resistencias de cartucho. ....	20
Tabla 3.1 Simulaciones con diferentes tamaños de elementos en Fusion 360 .....	38
Tabla 3.2 Simulaciones con diferentes tamaños de elementos en MATLAB .....	39
Tabla 3.3 Costos de materia prima.....	45
Tabla 3.4 Costos de mecanizado. ....	45
Tabla 3.5 Costos de logística. ....	45
Tabla 3.6 Resumen de costos.....	46
Tabla 3.7 Análisis de costos.....	47

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Molde de compresión térmica Sección Hembra
PLANO 2	Molde de compresión térmica Macho-Base
PLANO 3	Molde de compresión térmica Macho-Calce
PLANO 4	Molde de compresión térmica cuña
PLANO 5	Molde de compresión columnas y bocín

## Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Fuentes Renovables de Energías de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) se está desarrollando materiales compuestos innovadores para mejorar la eficiencia de las celdas combustible de hidrogeno. Las celdas de combustible tienen una gran variedad de aplicaciones para proporcionar energía a múltiples sectores, desde el transporte y la industria, hasta los edificios residenciales y comerciales (U.S. Department of energy, n.d.).

Las celdas combustibles de hidrogeno son un sistema electroquímico que por medio de una reacción entre el hidrógeno  $H_2$  y oxígeno  $O_2$  produce electricidad, calor y agua (Tibaquirá G. & Posner, 2009). Lo que podemos decir con esto es que su funcionamiento es similar a las baterías, las cuales producen energía eléctrica a medida que se les suministra combustible. Las celdas combustibles de hidrogeno tienen varias ventajas en comparación a las tecnologías empleadas actualmente; las cuales se basan en la combustión, llegando a superar una eficiencia mayor al 60% (U.S. Department of energy, n.d.).

Un componente clave de estas celdas son las placas de flujo que juegan un papel fundamental en la conducción de electrones y a su vez la distribución de los reactivos. Actualmente se está estudiando un método eficiente y sin disolventes en la fabricación de compuestos conductores y adecuados para ser empleados como material para la fabricación de placas de flujo (Santana-Villamar et al., 2024).

En el laboratorio se desarrollan probetas con el compuesto, cuya composición es una mezcla de resina epoxi basada en diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) y grafito expandido, a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y presión de  $4500\text{ [psi]}$  (Santana-Villamar et al., 2024).

### 1.1. Descripción del problema

Actualmente en el Laboratorio de Fuentes Renovables de Energías existe un método de fabricación de probetas donde se emplea la mezcla del material estudiado. Este proceso de fabricación utiliza un sistema de control de temperatura y una herramienta para comprimir o moldear materiales aplicando presión. El proceso empleado es la compresión térmica, la cual, se maneja con estrictos parámetros de temperatura y presión, de acuerdo con el material que se vaya a emplear. Por lo que, al existir algún error en uno de estos procesos que trabajan en conjunto, puede ocasionar afectaciones en la estructura y resultados del material final (Díez Barcenilla, 2023).

Uno de los principales inconvenientes en la fabricación de las probetas en el laboratorio es el sistema de control de temperatura, el cual, actualmente tiene variaciones de temperatura fuera de los parámetros requeridos dentro del proceso de moldeo por compresión térmica. Por otra parte, los estudios de las probetas fabricadas con el material investigado llegaron a un punto donde se tiene los suficientes datos como para avanzar con las pruebas de rendimiento (Santana-Villamar et al., 2024).

El próximo desafío tecnológico es escalar de la fabricación de probetas de estudio a placas bipolares completas. Este avance requiere del diseño e implementación de un sistema de producción rápida y precisa, para garantizar la consolidación del material compuesto y evitar defectos que puedan comprometer el funcionamiento de las celdas combustibles de hidrógeno (Santana-Villamar et al., 2024).

Este proyecto no solo busca resolver la dificultad actual que se tiene en la obtención de las placas de flujo, sino que también contribuye a la investigación en curso enfocada en el desarrollo de un nuevo material compuesto que permita reemplazar al grafito utilizado actualmente en las celdas combustibles de hidrógeno para poder comparar ambos materiales y avanzar en la identificación de alternativas más eficientes para su aplicación en celdas de combustibles.

## **1.2. Justificación del problema**

Ante la creciente demanda de energía limpia y sostenible, y la necesidad de abordar la crisis energética global, el desarrollo de tecnologías como las celdas combustibles de hidrogeno se vuelve cada vez más relevante. Las placas de flujo son componentes fundamentales de estas celdas, del mismo modo requieren de una fabricación precisa, tanto en parámetros de temperatura como de presión para garantizar su correcto funcionamiento y efectividad durante su uso; contribuyendo así al avance tecnológico en el campo de las energías renovables.

Por ese motivo, surge la necesidad de implementar un molde optimizado para la fabricación de estas placas de flujo empleando procesos de mecanizado siguiendo con estándares internacionales de tolerancia de los planos que se deben realizar, como de los parámetros requeridos en las simulaciones para así garantizar la homogeneidad tanto de la temperatura y presión que se van a aplicar durante todo el proceso de elaboración de estas placas de flujo.

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo General***

Implementar un molde por compresión térmica, utilizando máquinas herramientas adecuadas para su fabricación, con el propósito de manufacturar placas de flujo de material compuesto en celdas de combustible.

### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

1. Elaboración de planos CAD para el mecanizado del molde y post producción del material compuesto.
2. Simulación de la distribución de temperatura y presión.
3. Optimización del sistema de control de temperatura.
4. Fabricación de placas de flujo para celdas de combustibles.

## **1.4. Marco teórico**

### ***1.4.1. Moldeo por compresión***

Básicamente el proceso inicia con la obtención del molde con las características necesarias según el producto final, una vez montado y conectado el sistema térmico se procede a calentar el molde a la temperatura necesaria, se coloca el material a emplear en la sección cóncava, después procedemos a cerrar el molde tomando en cuenta la presión necesaria. El plástico y los materiales compuestos poseen una estructura que dificulta su compresión. Por lo tanto, se debe calentar el molde hasta la temperatura establecida por los diseñadores del material y así poder cumplir con la condición de moldeo. Una vez que el molde este caliente, y se produzca la compresión, se debe mantener el molde cerrado de acuerdo con el tiempo de curado, que se puede interpretar como el tiempo necesario para que el material compuesto o plástico alcance las propiedades mecánicas y térmicas requeridas.

Por esta razón, los conocimientos que se darán a conocer estarán relacionados estrictamente con:

- Mecanización del molde
- Transferencia de calor (convección libre)
- Sistema de control (termostato)
- Esfuerzos

### ***1.4.2. Maquinado y herramientas de corte.***

Para llevar a cabo la realización de un proyecto metalmecánico se debe tener claro que los procesos de mecanización son una de las partes más fundamentales, debido a que son parte del producto final. La correcta ejecución de esta actividad dependerá de las condiciones de elaboración.

El concepto principal bajo el que se desarrolla la mecanización se puede resumir de la siguiente forma: un material puede ser modificado a través de una herramienta de corte, la cual, tiene que cumplir con la característica de ser más difícil su deformación, que el material a

mecanizar para así garantizar el correcto desprendimiento de material que se lleva a cabo para darle la forma final.

Para el mecanizado la herramienta de corte debe ejercer una fuerza sobre el material base, por eso, de las diversas maneras que existen para mecanizar un material se aplicarán solo dos variantes, el fresado, en el cual la herramienta de corte posee un movimiento rotatorio sobre su mismo eje, facilitando el arranque de material sobre el objeto a trabajar, como contrapuesto tenemos el torneado, que a diferencia del anterior este se caracteriza por el movimiento rotacional del material de trabajo y el movimiento lineal de la herramienta de corte, se dará a conocer aspectos importantes de estas variantes, al igual que las ecuaciones que rigen su comportamiento durante el proceso de corte.

### **1.4.3. Transferencia de calor**

Existen diferentes formas de transferir calor, y que la energía siempre va desde el cuerpo o sistema que tenga más energía hacia el de menor energía.

De acuerdo con (Theodore L.Bergman, 2011), los siguientes principios y ecuaciones describen parte del comportamiento del sistema de moldeo.

La conducción es una de las formas por las que se transfiere calor a través de un cuerpo, la cual está definida por la ley de Fourier, la que describe la conducción de calor a través de un material, esta ley se visualiza de la siguiente forma: "El flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura de un material".

$$q = -K * A * \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Donde  $K$  representa a la constante que está ligada a las propiedades intrínsecas del material, se puede interpretar esta constante como la propiedad del material para conducir el calor a lo largo de su estructura.

Otra forma en la que el calor puede ser transferido es a través de lo que se conoce como convección, es una interacción en donde participa, un sólido y un fluido ya sea que el calor sea direccionado desde el fluido al material o viceversa. La convección puede darse ya sea “forzada” o “libre”, el fluido puede tener cierta velocidad impresa por un dispositivo capaz de proporcionarle una energía cinética al mismo, a diferencia del otro método el cual se da la libertad de que el material intercambie calor con el fluido sin que este tenga algún tipo de velocidad derivada de algún elemento externo.

La ecuación que describe estas afectaciones está dada de la siguiente forma:

$$q = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad (1.2)$$

La variable  $h$  se designa como el coeficiente de convección del fluido, que se obtiene de distintas formas dependiendo si es forzado o libre.

#### **1.4.4. Convección libre para platos verticales**

Cuando se trabaja bajo esta condición se debe introducir un nuevo concepto y ecuación, la cual se denomina “Número de Grashof” que nos indica la relación existente entre las fuerzas viscosas y fuerza de flotación del fluido, entendiéndose así que si el Número de Grashof es muy alto hay una dominancia de las fuerzas de flotación y a su vez esto se traduce en mayor transferencia de calor hacia el fluido.

Número de Grashof:

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty})L^3}{\nu^2} \quad (1.3)$$

Se introduce también el Número de Rayleigh, este valor adimensional se puede interpretar como el fujo de la convección libre en el fluido y está definida de la siguiente forma:

$$Ra = Gr * Pr \quad (1.4)$$

Se obtiene el Número de Nusselt dependiendo si el fluido es laminar o turbulento, en esta ocasión se empleará la relación de Churchill y Chu:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (1.5)$$

Esta ecuación es general para todo tipo de condiciones o número de  $Ra$  y  $Pr$ , sin embargo, existe otra variante para flujos laminares:

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 * Ra^{\frac{1}{4}}}{[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}}]^{\frac{4}{9}}} ; Ra \leq 10^9 \quad (1.6)$$

De igual manera en platos horizontales existen relaciones dependiendo las características del sólido, ya sea que una de las caras esté caliente y la otra se encuentre aislada o que tengan menor temperatura que su contrapuesto.

Superficie superior de la placa caliente y superficie inferior fría:

$$Nu = 0,54 * Ra^{\frac{1}{4}} ; (10^4 \leq Ra \leq 10^7, Pr \geq 0,7) \quad (1.7)$$

$$Nu = 0,15 * Ra^{\frac{1}{3}} ; (10^7 \leq Ra \leq 10^{11}, \forall Pr) \quad (1.8)$$

Superficie inferior de la placa caliente y superficie superior fría:

$$Nu = 0,52 * Ra^{\frac{1}{5}} ; (10^4 \leq Ra \leq 10^9, Pr \geq 0,7) \quad (1.9)$$

#### **1.4.5. Deformación por compresión de la sección hembra y macho del molde**

Conforme a (Ferdinand P. Beer, 2010) el siguiente concepto y ecuaciones presentan la deformación del molde debido a la presión.

El molde cumple su función de dar forma al material debido a la compresión que este ejerce sobre el material base y la temperatura aplicada, siendo así indispensable el comprender como interacciona la presión de trabajo sobre el material de la matriz.

La presión se define como la fuerza ejercida sobre un área definida, también se puede conocer a esta definición como esfuerzo normal, los materiales cuentan con una propiedad intrínseca conocida como coeficiente de elasticidad que se puede definir como el rango de trabajo donde se cumple la Ley de Hooke, el cuerpo puede experimentar una compresión o tensión cuando se aplica una presión pero que al momento de que esta deja de influir en el cuerpo de estudio este vuelve a su condición inicial sin que se genere alguna deformación permanente, por lo que las ecuaciones que están relacionadas a este concepto son:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1.10)$$

$\sigma$  = tensión en la zona elástica.

$E$  = módulo de Young.

$\varepsilon$  = deformación unitaria.

También se conoce que la deformación unitaria describe la relación entre le  $\Delta L$  y el  $L$  normal:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.11)$$

$\Delta L$  = variación de longitud

$L$  = longitud normal

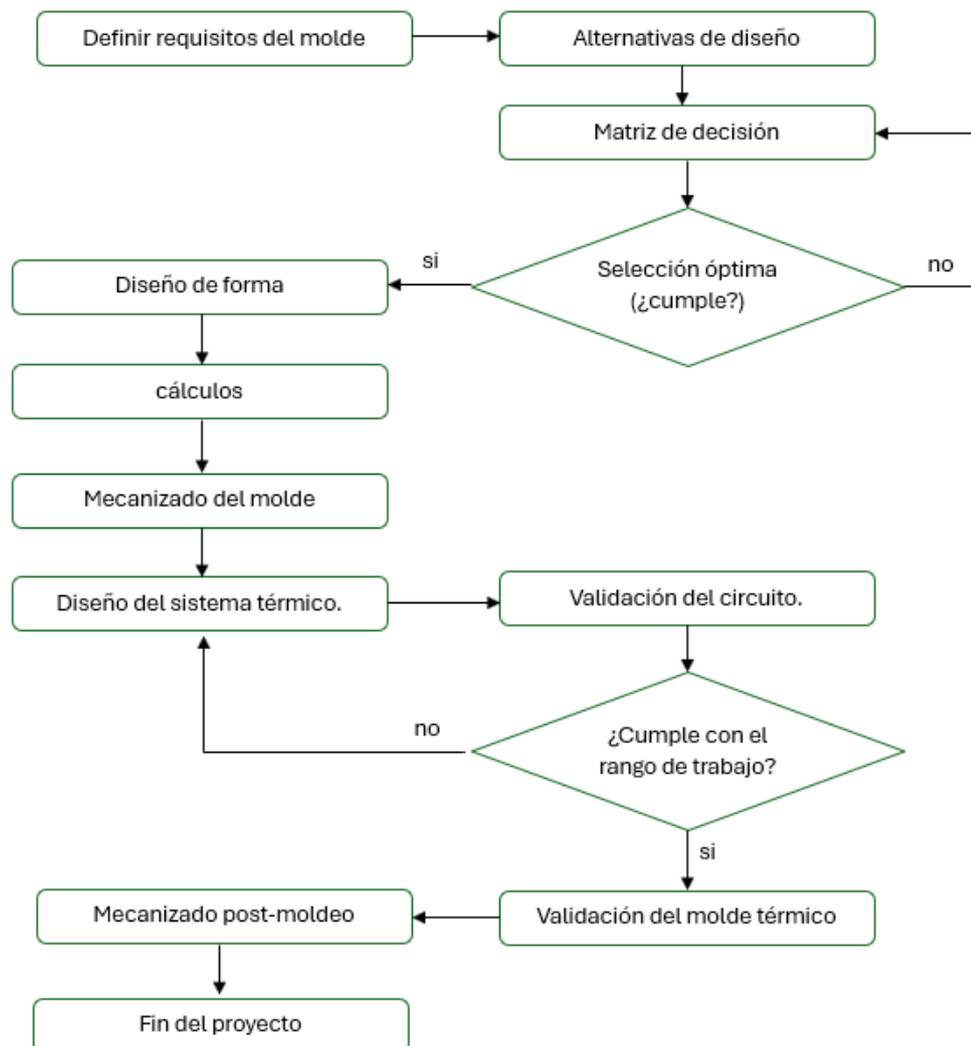
## Capítulo 2

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología utilizada para el diseño y fabricación de un molde, cumpliendo un orden para obtener los mejores resultados. Se muestran las acciones que se van a realizar en este proyecto a través del siguiente diagrama de flujo:

**Figura 2.1**

*Diagrama de flujo del proyecto*



*Nota.* Se muestran los pasos a seguir para lograr los objetivos del proyecto.

## 2.1. Consideraciones de diseño

- Dimensión de cavidad 78,3 x 78,3 x 15 [mm].
- Presión de trabajo 4500 [psi].
- Temperatura de trabajo  $100 \pm 2$  [°C].
- Sistema de control de temperatura.
- Calentamiento por conducción.
- El lugar de operación está a condiciones normales.

Una vez establecidas las condiciones de trabajo, se procede a definir el acero a emplear en las distintas alternativas. Dado que el molde trabaja en caliente, se seleccionó el acero H13, también conocido como W302, ya que es un material ampliamente utilizado en la industria para la fabricación de moldes que se encuentran sometidos a calentamiento. De acuerdo con su ficha técnica, puede mantener sus propiedades mecánicas hasta un rango de 600 a 650 °C; puede resistir choques térmicos sin generar grietas ni deformaciones; tiene una alta conductividad térmica; y soporta trabajos bajo presiones elevadas.

## 2.2. Alternativas de solución para la fabricación del molde.

Las alternativas de solución tienen como referencia las consideraciones de diseño mostradas anteriormente, bajo esas restricciones tenemos las siguientes alternativas:

### 2.2.1. Alternativa 1

Matriz de cuatro columnas para mejorar la estabilidad del molde, además de una sección extraíble para limpiar la cavidad del molde una vez se cumplan las condiciones del producto final, las columnas son roscadas las cuales dan guía a los agujeros de la sección convexa del molde.

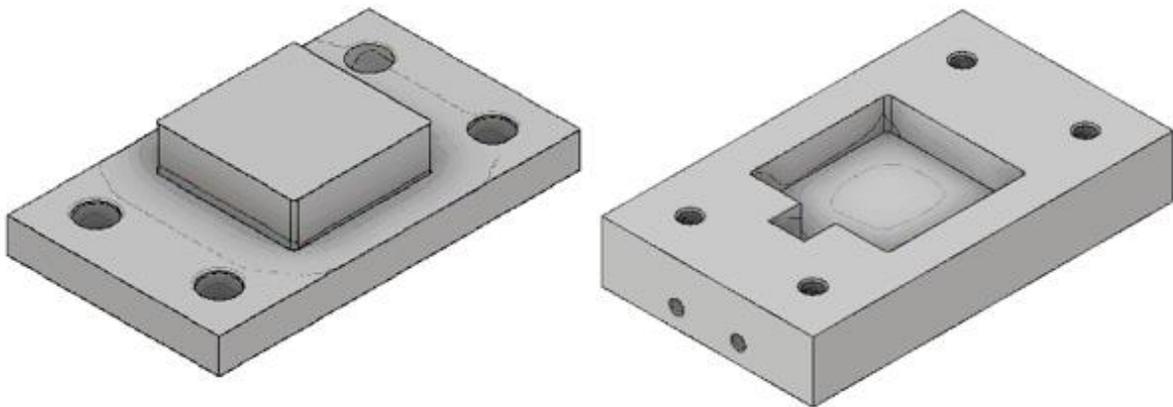
**Tabla 2.1**

*Alternativa 1: Matriz con un solo canal de extracción y cuatro columnas guías*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mayor estabilidad.	Se compromete la geometría final debido a los calces en el molde.
Fácil extracción.	Desgaste por fricción en los agujeros guía.
Mejor concentración de calor en el área de trabajo.	Mantenimiento complejo.

**Figura 2.2**

*Alternativa de solución 1*



*Nota.* Se muestra la Alternativa 1 la cual muestra la cavidad de extracción y los agujeros para las cuatro columnas.

### **2.2.2. Alternativa 2**

Matriz con columnas en diagonal, la cavidad se centra en la estructura del producto final. La extracción se da a través de la fuerza aplicada mediante el movimiento de tornillos en la sección de la base del molde, las columnas son soldadas directamente en la base y la sección superior no cuenta con bocines.

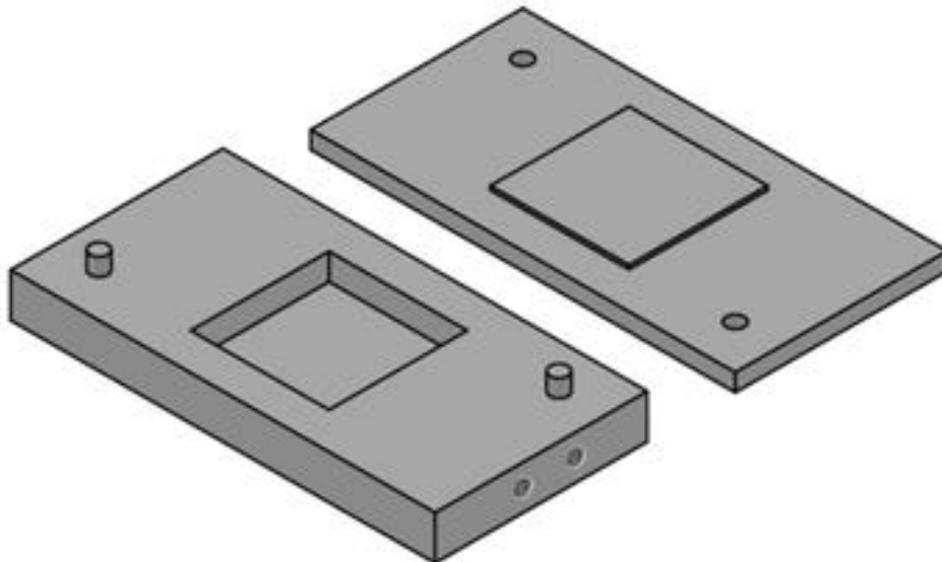
**Tabla 2.2**

*Alternativa 2: Matriz sin canales de extracción y dos columnas guías*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se garantiza el moldeo homogéneo del producto final.	<p>Tiene menor estabilidad por el número de columnas.</p> <p>El mantenimiento ante el desgaste de las columnas y cavidades es más complejo.</p> <p>La extracción del producto final compromete la geometría de este.</p> <p>Al tener menos longitud de la sección convexa dificulta la separación de los moldes después de la compresión.</p>

**Figura 2.3**

*Alternativa de solución 2*



*Nota.* Se muestra la Alternativa 2, la cual se caracteriza por sus dos columnas en diagonal y cavidad completamente rectangular.

### **2.2.3. Alternativa 3**

Matriz de cuatro columnas para mejorar la estabilidad del molde, con un par de secciones extraíbles para poder extraer el material final. Estas columnas tienen una parte

roscada para poder ajustarla en la sección cóncava; además en la sección convexa se tienen bocines de bronce para poder realizar cambios si fuera necesario debido al desgaste por la fricción que produce las columnas al momento de deslizarse durante el proceso de moldeo.

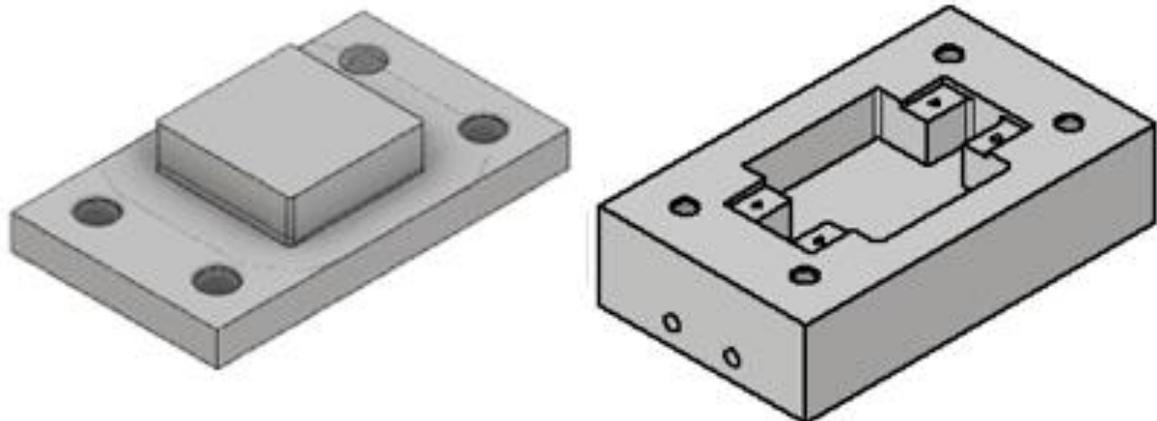
**Tabla 2.3**

*Alternativa 3: Matriz con dos canales de extracción y cuatro columnas guías*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mayor estabilidad.	Se compromete la geometría final debido a
Fácil extracción.	los calces en el molde.
Mejor concentración de calor en el área de trabajo.	Requiere tolerancia en los bocines.
Fácil mantenimiento.	
Desgaste por fricción en los bocines.	

**Figura 2.4**

*Alternativa de solución 3*



*Nota.* Se muestra la Alternativa 3, la cual cuenta con un mejor agarre para la extracción así como las cavidades para las 4 columnas.

**Tabla 2.4***Descripción de las alternativas de solución*

<b>Alternativas de solución</b>			
Características	Alternativa 1: Matriz con un solo canal de extracción y cuatro columnas guías	Alternativa 2: Matriz sin canales de extracción y dos columnas guías	Alternativa 3: Matriz con dos canales de extracción y cuatro columnas guías
Forma - cavidad	Cúbica sin canales	Cúbica sin canales	Cúbica sin canales
Dimensión	205x120x33 [mm]	205x120x33 [mm]	205x120x50 [mm]
Extracción	Manual	Manual	Manual
Materiales	A36– AISI 4140	A36	H13
Elemento de calentamiento	Resistencias de cartucho	Resistencias de cartucho	Resistencias de cartucho
Material de moldeo	Material Compuesto	Material Compuesto	Material compuesto
Costo	Medio	Bajo	Medio-Alto
Tratamiento térmico	NO	NO	NO

**2.3. Criterios de diseño****Tabla 2.5***Criterios y valor de importancia*

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje</b>
Costos	Engloba los costos generales del producto final del molde, tanto la geometría como el material a emplear.	50%
Geometría del producto final	Forma de la cavidad para moldear las placas de flujo.	25%
Facilidad de fabricación	Debido a las diferencias geometrías en las alternativas, se presenta dificultad tanto en el diseño como en la fabricación del molde.	15%
Extracción del material del molde.	Actividad que se realiza posterior al proceso de moldeo.	10%

## 2.4. Matriz de decisión

**Tabla 2.6**

*Matriz de decisión*

		Criterios				
		Costos	Geometría	Fabricación	Extracción	Promedio
		Pesos de los criterios				
Alternativa		50%	25%	15%	10%	100%
1	Nota	4	7	7	6	
	Puntaje	2,00	1,75	1,05	0,10	4,90
2	Nota	5	4	9	4	
	Puntaje	2,50	1,00	1,35	0,40	5,25
3	Nota	7	7	6	9	
	Puntaje	3,50	1,75	0,95	0,90	7,10

## 2.5. Diseño del molde

### 2.5.1. Selección de la mejor alternativa

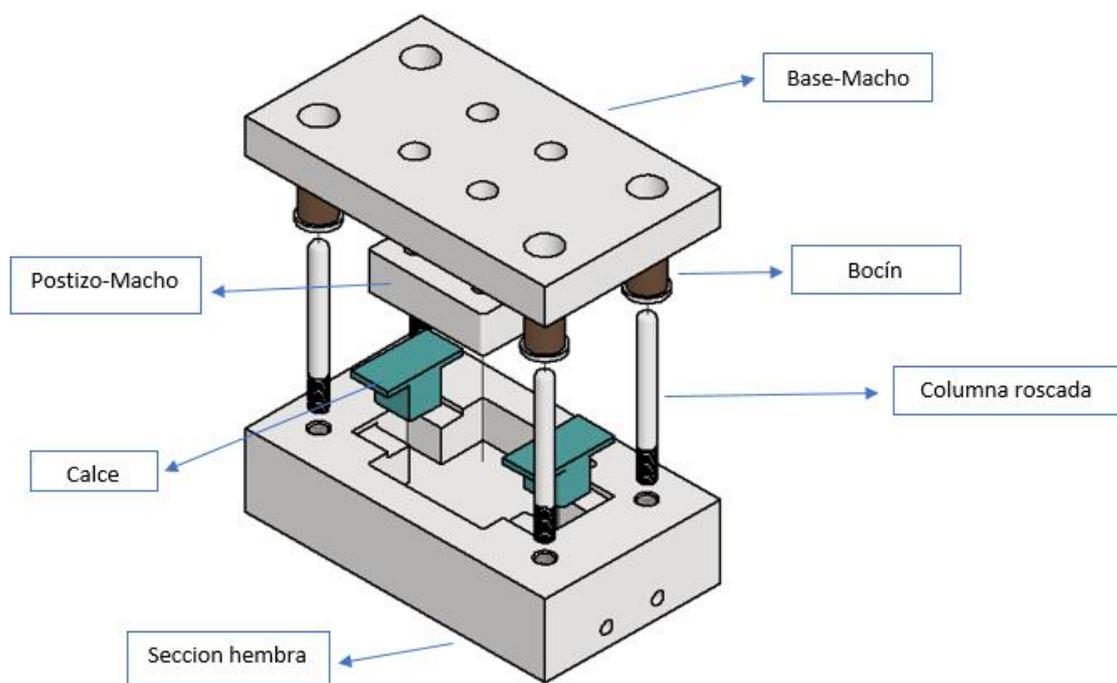
Después de un análisis exhaustivo de las tres alternativas propuestas para la fabricación del molde, se determinó que la Alternativa 3 es la más adecuada para cumplir con los requerimientos del proyecto. Esta opción combina las ventajas de mayor estabilidad y facilidad de extracción, características presentes en la Alternativa 1, con la facilidad de mantenimiento y menor desgaste de la Alternativa 2. La inclusión de bocines de bronce en la sección convexa permite realizar ajustes y reemplazos sencillos en caso de desgaste por fricción, lo que prolonga la vida útil del molde. Además, al no contar con canales en ambas caras, se minimiza el riesgo de comprometer la geometría final del producto. En resumen, la Alternativa 3 ofrece un equilibrio óptimo entre estabilidad, facilidad de uso, mantenimiento y precisión en la fabricación de las placas de flujo.

### 2.5.2. Diseño de forma

En base al análisis previo realizado para la selección de la alternativa más óptima, se presenta el diseño del molde a emplear. En la Figura 2.5 se detallan los componentes principales que conforman el molde.

**Figura 2.5**

*Diseño de forma de la Alternativa 3*



*Nota.* Se muestran las partes que componen el molde referente a la Alternativa 3.

Partiendo de la alternativa adecuada para abaratar costos en la fabricación y adquisición de material. En el caso de las columnas roscadas se escogió el acero plata, debido a su alta conductividad térmica, pero más que todo por las tolerancias estrechas que posee debido a su rectificación. En la sección superior se empleará dos materiales diferentes, en el primer caso el acero H13 que ya se describió anteriormente y acero A36, el cual tiene un bajo costo tanto de compra como de maquinabilidad, se puede emplear para moldes de baja producción o prototipos, como en este caso en particular. Por último, el bronce fosfórico se emplea como bocines por su buena resistencia al desgaste y a la corrosión (Bohler, 2024). La

selección de los materiales se da a partir de una limitante importante, el presupuesto que se tiene para la fabricación del molde.

Es necesario estudiar la dilatación térmica una vez alcanzada la temperatura de trabajo, Se puede obtener el valor de dilatación con la expresión:

$$\Delta V = V_0 * \beta * \Delta T \quad (2.1)$$

Donde:

$\Delta V$  = cambio de volumen del molde.

$V_0$  = volumen inicial.

$\beta$  = coeficiente de expansión volumétrica.

$\Delta T$  = cambio de temperatura.

En cuanto al dimensionamiento del sistema, una vez establecido el material base, se obtendrá el espesor de pared mínimo capaz de absorber la presión sin que exista deformación, la importancia de la tolerancia radica en su influencia directa sobre la calidad del producto final. Una tolerancia adecuada garantiza que las piezas puedan ensamblarse correctamente, funcionen de manera fiable y tengan una apariencia estéticamente agradable.

Un control preciso de la tolerancia contribuye a reducir los costos de producción al minimizar el número de piezas defectuosas y la necesidad de realizar operaciones de acabado adicionales. En el contexto de nuestra investigación, la optimización de la tolerancia ha sido un objetivo clave, porque permite obtener piezas de alta calidad y garantizar la repetibilidad del proceso de fabricación.

Luego de establecer las dimensiones y contactos existentes el siguiente parámetro a obtener es la potencia requerida para calentar el molde a la temperatura de trabajo y a su vez compensar las pérdidas existentes por radiación y convección, se procede a determinar la potencia requerida por parte de las resistencias de cartucho mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.2)$$

Siendo  $t$  el tiempo mínimo requerido para que el molde llegue a la temperatura de 100 [°C], el valor de  $Q$  se define como el calor total necesario para cambiar la temperatura del molde, tenemos la siguiente expresión:

$$Q = m * c * \Delta T \quad (2.3)$$

### **2.5.3. Resistencias para el calentamiento del molde.**

El tipo de resistencia a emplear en el molde garantiza la uniformidad y eficiencia en el proceso de calentamiento.

#### **2.5.3.1. Resistencias de Cartucho.**

Resistencia de forma cilíndrica y metálica que se inserta en orificios mecanizados en el molde, se usa usualmente cuando se requiere un calentamiento localizado. Son más efectivas cuando se requiere calentar áreas específicas de forma rápida.

**Tabla 2.7**

*Análisis comparativo de ventajas y desventajas de las resistencias de cartucho.*

<b>Resistencias de cartucho</b>	
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Calentamiento localizado.	Limitación en la distribución de calor.
Fácil instalación y reemplazo	Mayor desgaste en el área de instalación.
Optimización de espacio	
Respuesta rápida en cambios de temperatura.	

**Figura 2.6**

*Estructura de las resistencias de cartucho*



*Nota.* Se muestra la forma de las resistencias a emplear para el molde.

- Forma: cartucho
- Distribución de calor: uniforme, ajustable desacuerdo a las condiciones.
- Instalación: sencilla.
- Durabilidad: alta
- Espacio requerido: mínimo, según su diámetro.
- Costo: moderado.

#### ***2.5.4. Fabricación del molde***

Para la implementación de la matriz es necesario tener los materiales y el diseño del molde de la alternativa seleccionada. En este caso debido a factores externos, se procedió a contactar con un taller especializado para la fabricación del molde.

#### ***2.5.5. Sistema de control de temperatura***

El sistema de control actual consiste en mantener la temperatura en un punto deseado, este proceso se logra transformando la energía eléctrica en calor empleando una resistencia. Al suministrar energía eléctrica y ajustar la temperatura, de forma inmediata las placas bimetálicas detectan que la temperatura actual no es la requerida y por ende permite la conducción de corriente eléctrica por la resistencia hasta que las placas detecten que los parámetros requeridos son los adecuados. En este punto se bloquea el paso de corriente para

que la temperatura disminuya, el proceso sigue un comportamiento cíclico hasta que el sistema es apagado. Sin embargo, este sistema tiene variaciones de temperaturas muy altas llegando hasta los 130 [°C] al momento de colocar los parámetros iniciales y posterior a esto en la temperatura de estabilidad llega a tener una variación entre 99 y 110 [°C].

El sistema corresponde a un control de temperatura encendido/apagado, empleado comúnmente para mantener la estabilidad térmica en diversos procesos industriales. Este sistema se compone de la siguiente manera:

- Sensor de temperatura (Termocupla tipo K): este dispositivo mide la temperatura del molde y envía una señal proporcional a la temperatura medida (de 4 a 20 [mA]), el cual tiene una temperatura mínima que corresponde a 4 [mA] y una máxima, 20 [mA]
- Controlador (SDC15): es el encargado de controlar todo, recibe la señal del sensor de temperatura y la compara con un valor preestablecido llamado setpoint, el cual es la temperatura deseada que se quiere mantener.
- Contactor (Relé): actúa como un interruptor controlado eléctricamente, el cual recibe la señal PWM del controlador y abre o cierra el circuito de alimentación de la resistencia.
- Resistencia calefactora (Resistencia de cartucho): se encargan de generar calor dentro del molde.
- Disyuntor (Breaker): se encarga de controlar el paso de corriente, manteniendo la seguridad en el caso de que ocurra un fallo en el sistema.

El funcionamiento del dispositivo el cual inicia desde la lectura del sensor que monitorea de forma constante la temperatura del molde, enviando señales al controlador y es el encargado de enviar una señal cuando este detecta una desviación entre la temperatura medida y el setpoint establecido (Jiménez Arias, 2024).

Los datos para modificar en la configuración del controlador SDC15 se identifican con un código que se encuentra en el Apéndice A, en este caso se detallan los códigos modificados a continuación:

- Ctrl: método de control (encendido/apagado, PID, ST).
- C 21: selección de la función de inicialización de la operación PID.
- C 01: rango de entrada sensor de temperatura.

### **2.5.6. Método de análisis por elementos finitos**

Posterior al diseño del molde, tomando en cuenta la presión de trabajo y la dilatación de los materiales ocasionada por los cambios de temperatura, se requiere conocer, como el sistema interactuará en condiciones reales de operación. Para lograr una simulación precisa del comportamiento del molde, se emplearán restricciones o condiciones de frontera para asemejar el comportamiento dentro del programa con la realidad, para esto, se aplicará un método denominado análisis por elementos finitos (FEM).

El análisis por elementos finitos es empleado para resolver ecuaciones diferenciales parciales, el método consiste en dividir la geometría de trabajo en elementos más pequeños (rectangulares, cuadrangulares, tetraédrico, entre otros.). Cada elemento está ligado a otro mediante nodos y este tiene asignado una ecuación, la cual nos da a conocer como interacciona ese nodo con sus adyacentes, estas ecuaciones dependerán del tipo de análisis a realizar, en este caso se empleó para la deformación y temperatura del molde.

Una vez establecida la relación entre las matrices se deben concretar las condiciones de frontera las cuales podemos definir como las condiciones que se conocen en el estudio. Si lo relacionamos al análisis térmico tenemos: la temperatura ambiente 30 [°C], coeficiente de convección  $11,36 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$  y la temperatura final de 100 [°C].

Una vez completada la matriz con las condiciones de frontera debe ser resulta para obtener los valores de cada nodo y así calcular la temperatura en el punto de estudio, se conoce que mientras más pequeño los elementos mejor será la convergencia del valor ligado al punto de estudio, así como también la homogeneidad de la malla empleada, es decir, mientras mejor sean las conexiones entre los elementos, mejor será el resultado calculado.

La validación de los datos es un paso de importancia dado que se busca comparar con valores teóricos, y a través de la comparación entre estos tomando en cuenta un porcentaje de variación pertinente  $< 2\%$  permitiendo así corroborar que la simulación fue ejecutada correctamente. Un método alternativo para validar la simulación consiste en comparar los resultados obtenidos por medio de una cámara termográfica, la cual, nos da a conocer la temperatura del molde en las condiciones de trabajo.

## Capítulo 3

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que se presentan a continuación se dan a partir de una validación mediante los análisis realizados en los capítulos anteriores. Se asegura que los datos que se revisaron previamente son fundamentales para el desarrollo y avance del proyecto.

#### 3.1. Especificaciones de materiales

Con la selección de la Alternativa 3 y guardando relación con la metodología empleada, se procedió a especificar los materiales con los que se fabricaron las distintas secciones del molde:

- Sección hembra: acero H13
- Calce macho: acero H13
- Base macho: acero A36
- Columnas: acero plata
- Bocines: bronce fosfórico
- Cuñas: acero H13

#### 3.2. Espesor mínimo requerido

Ya definido los materiales para cada sección se procedió a calcular el espesor mínimo requerido para no comprometer la integridad del sistema, como guía se empleó la ecuación para esfuerzos en cilindros presurizados.

Tal como explica (Nisbett, 2008) los recipientes sometidos a presión interna presentan la siguiente característica:

$$th = \frac{P * D}{2 * \sigma} \quad (3.1)$$

La presión de trabajo es de 4500 [psi] lo que nos da un equivalente a 31 [MPa]

$$th = \frac{31 [MPa] * 25[mm]}{2 * 600 [MPa]}$$

$$th = 1,312 [mm]$$

Para el diseño se empleó un factor de seguridad de 7 por lo que el espesor mínimo que debe ser  $> 10,00 [mm]$ .

La presión ejercida en las paredes de la cavidad la podemos aproximar empleando la ecuación definida por la Ley de Rankine, sin embargo, este concepto no se aleja de lo que acontece dentro de la cavidad al momento de ejercer la presión perpendicular de  $4500 [psi]$  sobre los gránulos de grafito y resina.

$$P_{Lateral} = K_r * \sigma_{compresión} \quad (3.2)$$

$K_r$  se define como el coeficiente de presión lateral el cual depende del tipo de material y la densidad del grafito siendo así su intervalo  $0,6 \leq K_r \leq 0,75$ .

$$P_{Lateral} = 0,75 * 4500[psi]$$

$$P_{Lateral} = 3375 [psi] = 23,27 [MPa]$$

La presión lateral es menor que la perpendicular pero el radio de trabajo es mayor por lo que hay que calcular el espesor mínimo requerido para esta presión.

$$t = \frac{23,27 [MPa] * 79[mm]}{2 * 600 [MPa]}$$

$$t = 1,5319 [mm]$$

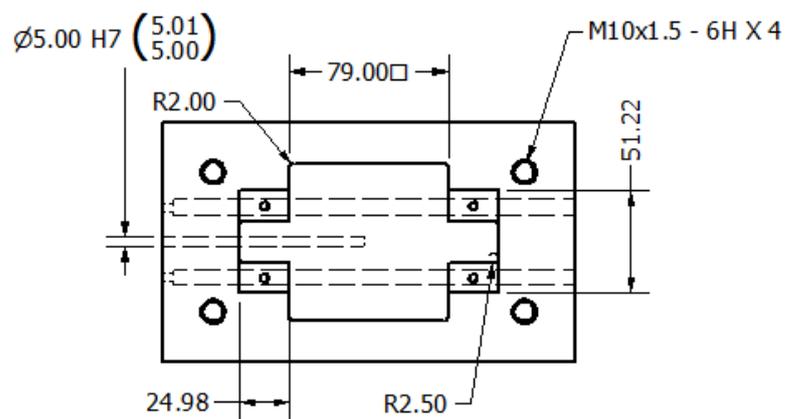
El molde posteriormente podrá estar sujeto a diferentes temperaturas y presiones según lo requiera, por lo que el factor de seguridad empleado es de 7, se opta por un diseño robusto tomando en cuenta las restricciones expuestas anteriormente, obteniendo así espesores  $> 20$  [mm] para las paredes laterales y  $> 10$  [mm] para la sección vertical.

El uso de tolerancias se encuentra relacionadas a las normas ISO-286 siendo así para las partes móviles tolerancias que varían  $\pm 0,02$  [mm] asegurando un desplazamiento de baja fricción, cabe recalcar que estas secciones son lubricadas, mientras que el ajuste entre los bocines y la base macho será de  $\pm 0,01$  [mm].

La dilatación térmica existente entre la sección hembra y el calce del macho se denomina equivalente ya que el contacto se da entre materiales con iguales propiedades, mientras que la expansión del acero A36 y los bocines no sufren variaciones significativas, Los resultados de este análisis se pueden ver en el Apéndice A.

**Figura 3.1**

*Dibujos con medidas finales y estructura del molde*



*Nota.* Se muestra parte del plano relacionado con la sección hembra del sistema.

### 3.3. Análisis de deformación del molde.

La fuerza se imprime sobre la superficie de la base perteneciente a la sección macho, el diámetro del eje de la prensa es  $50$  [mm], el módulo de elasticidad del acero A36 es  $200000$

[MPa], con estos datos podemos calcular la deformación producida sobre el área efectiva de trabajo.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\frac{F}{A}}{E}$$

$$\epsilon = \frac{31 \text{ [MPa]}}{200000 \text{ [MPa]}} = 0,000155$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\epsilon * L_0 = \Delta L$$

$$\Delta L = 0,000155 * 24 \text{ [mm]} = 0,00372 \text{ [mm]}$$

Empleando las fichas técnicas del material podemos aseverar que el acero H13 es más duro que el acero A36 por lo que con el análisis de la deformación sobre el elemento de menor módulo de elasticidad podemos asegurar la integridad del molde, obteniendo así una deformación de 0,00372 [mm] con la presión de trabajo.

$$\epsilon = \frac{31 \text{ [MPa]}}{213000 \text{ [MPa]}} = 0,00014$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\epsilon * L_0 = \Delta L$$

$$\Delta L = 0,00014 * 24,6 \text{ [mm]} = 0,00354 \text{ [mm]}$$

El porcentaje de error es el siguiente:

$$\%error = \frac{|V_{experimental} - V_{teorico}|}{V_{teorico}} * 100\%$$

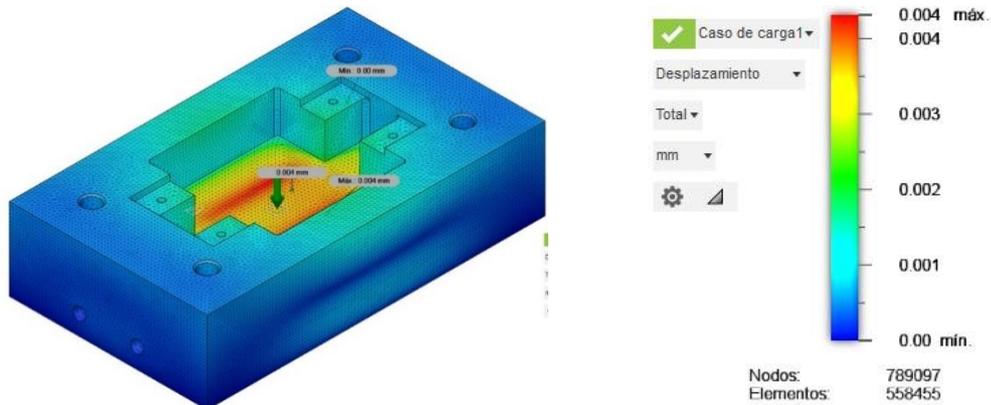
$$\%error = \frac{|0,00388 - 0,0035|}{0,0035} * 100\%$$

$$\%error = 10\%$$

### 3.4. Simulación de deformación Fusion 360

**Figura 3.2**

*Simulación de deformación en Fusion 360*



*Nota.* Se muestra la deformación máxima producida por la presión de 31 MPa por parte de la prensa.

### 3.5. Análisis térmico del molde.

Debido a la disponibilidad limitada de la resistencia de cartucho por parte del proveedor, se optó por un enfoque práctico para determinar el tiempo de calentamiento del molde. Por lo que se tomó como una variable fija la potencia de la resistencia la cual es de 400 W.

Los datos empleados están relacionados con la energía que se necesita para subir la temperatura del material.

$$m = \rho * V \tag{3.3}$$

$$m = 7850 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 1,032 \times 10^{-3} [m^3] = 8,10 [kg]$$

$$Q = 8,10 [kg] * 470 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * (100 - 30)[K] = 266490 [J]$$

$$q_{calentamiento} = \frac{Q}{t} \quad (3.4)$$

La resistencia debe tener la capacidad de mantener la sección de trabajo a la temperatura deseada, pero así mismo debe de contrarrestar las pérdidas por convección y las de contacto que se producen tanto con el grafito como con la sección macho de este.

$$P = q_{calentamiento} + q_{pérdidas\ convección,hembra} + q_{conducción,macho} + q_{conducción,grafito} \quad (3.5)$$

Dada la naturaleza de la aplicación, primero el molde debe calentarse a 100 [°C] sin que exista la presencia del grafito o su contacto con la sección convexa.

$$P = q_{calentamiento} + q_{pérdidas\ convección,hembra} + q_{pérdidas\ por\ radiación,hembra} \quad (3.6)$$

### 3.6. Cálculo de pérdidas por convección.

Dado que la geometría del molde es rectangular, se llevó a cabo el análisis de dos formas diferentes:

Convección pared vertical para las caras laterales de 50 [mm] x 120 [mm].

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

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{(100 + 30)}{2} + 273 = 338 [K]$$

$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{338 [K]} = 2,95 \times 10^{-3} [K^{-1}]$$

$$L = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{6 \times 10^{-3} [m^2]}{0,34 [m]} = 0,0176 [m]$$

$$Ra = \frac{9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 2,95 \times 10^{-3} [K^{-1}] * (100 - 30) [K] * (0,0176 [m])^3}{19,71 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right] * 28,12 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}$$

$$Ra = 20991,23 ; \text{ fluido laminar}$$

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67 * Ra^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} ; Ra \leq 10^9$$

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67 * 20991,23^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,707} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} = 6,86$$

$$\bar{h} = \overline{Nu} * \frac{K}{L}$$

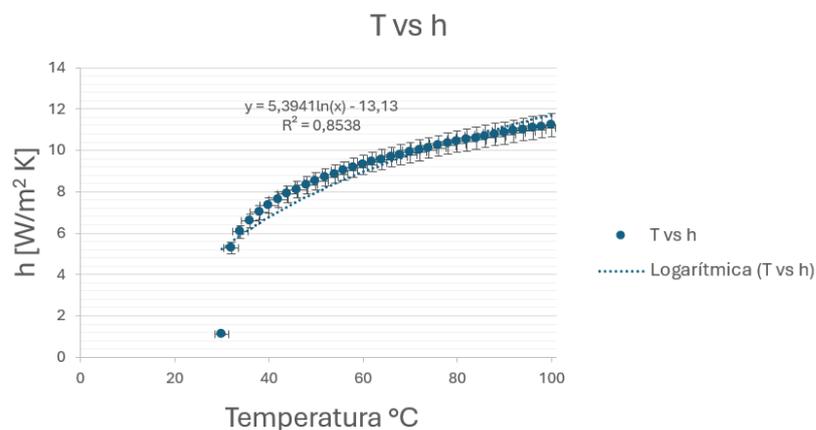
$$\bar{h} = 6,86 * \frac{29,11 \times 10^{-3} \left[ \frac{W}{m * K} \right]}{0,0176 [m]} = 11,34 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$q = 2 * \bar{h} * A * (T_s - T_\infty)$$

$$q = 2 * 11,34 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * 6 \times 10^{-3} [m^2] * (100 - 30) [K] = 9,52 [W]$$

**Figura 3.3**

Variación de coeficiente de convección vs temperatura - 50 [mm] x 120 [mm]



*Nota.* Se observa el cambio del coeficiente de convección a medida que la temperatura aumenta.

Convección pared vertical para las caras laterales de 50 [mm] x 200 [mm]

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

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{(100 + 30)}{2} + 273 = 338 \text{ [K]}$$

$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{338 \text{ [K]}} = 2,95 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$$

$$L = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{0,01 \text{ [m}^2\text{]}}{0,5 \text{ [m]}} = 0,02 \text{ [m]}$$

$$Ra = \frac{9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 2,95 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]} * (100 - 30) \text{ [K]} * (0,02 \text{ [m]})^3}{19,71 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] * 28,12 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]}$$

$$Ra = 29239 ; \text{ fluido laminar}$$

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67 * Ra^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} ; Ra \leq 10^9$$

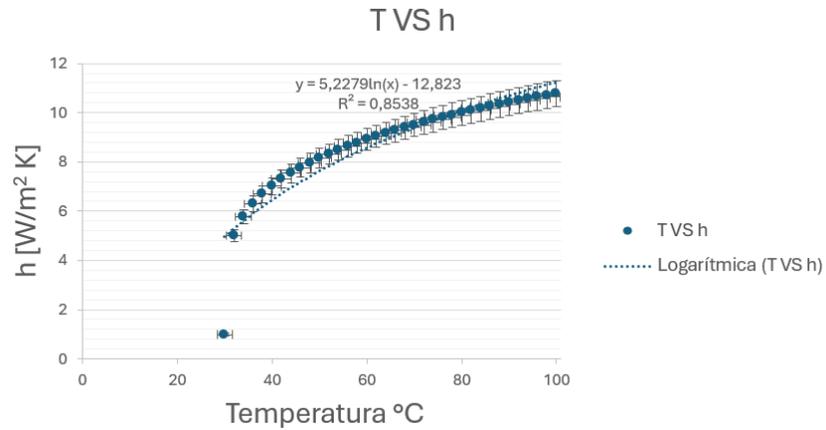
$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67 * 29239^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,707} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} = 7,40$$

$$\bar{h} = \overline{Nu} * \frac{K}{L}$$

$$\bar{h} = 7,40 * \frac{29,11 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}} \right]}{0,02 \text{ [m]}} = 10,77 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} \right]$$

**Figura 3.4**

Variación de coeficiente de convección vs temperatura - 50 [mm] x 200 [mm]



Nota. Se observa el cambio del coeficiente de convección a medida que la temperatura aumenta.

$$q = 2 * \bar{h} * A * (T_s - T_\infty)$$

$$q = 2 * 10,77 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * 0,01 [m^2] * (100 - 30)[K]$$

$$q = 15,07 [W]$$

Convección cara superior (plato horizontal caliente)

$$L = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{0,024 [m^2]}{0,64 [m]} = 0,0375 [m]$$

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

$$Ra = \frac{9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 2,95 \times 10^{-3} [K^{-1}] * (100 - 30)[K] * (0,0375 [m])^3}{19,71 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right] * 28,2 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}$$

$$Ra = 1,93 \times 10^5$$

$$\overline{Nu} = 0,54 * Ra^{\frac{1}{3}}; 10^4 \leq Ra \leq 10^7, \text{ para todo } Pr$$

$$\overline{Nu} = 0,54 * 1,93 \times 10^5^{\frac{1}{3}} = 11,31$$

$$\bar{h} = 11,31 * \frac{29,11 \times 10^{-3} \left[ \frac{W}{m * K} \right]}{0,0375 [m]} = 8,78 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$q = 2 * \bar{h} * A * ((T_s - T_{\infty}))$$

$$q = 2 * 8,78 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * 0,024 [m^2] * (100 - 30)[K] = 29,5 [W]$$

Radiación de toda el área superficial

$$q = \varepsilon * 5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right] * A_{total} * (T_{cuerpo}^4 - T_{ambiente}^4)$$

$$q = 0,5 * 5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right] * 0,103 [m^2] * (373^4 - 303^4)[K^4]$$

$$q = 9,57 [W]$$

Con los valores de pérdidas por convección natural, y con la energía necesaria para calentar el molde a 100 [°C] podemos obtener el tiempo de calentamiento para alcanzar la condición de trabajo, en este caso se optó por emplear dos resistencias de cartucho para reducir el tiempo de calentamiento.

$$P = q_{calentamiento} + q_{pérdidas \text{ conveccion,hembra}} + q_{pérdidas \text{ por radiación,hembra}}$$

$$800 [W] = \frac{190350 [J]}{t [s]} + 29,5 [W] + 15,07 [W] + 9,52 [W] + 9,57 [W]$$

$$t = 4,3 [min]$$

$$P = q_{\text{calentamiento}} + q_{\text{pérdidas conveccion,hembra}} + q_{\text{pérdidas por radiación,hembra}}$$

$$100 [W] = \frac{76140 [J]}{t [s]} + 29,5 [W] + 15,07 [W] + 9,52 [W] + 9,57 [W]$$

$$t = 12,3 [min]$$

Estos dos tiempos corresponde a la forma de calentamiento del molde, ya que al inicio el sistema de control trabaja con toda la potencia de la resistencia, sin embargo, al llegar al 80% de la temperatura deseada la potencia varía. Esto se debe ya que el sistema empleado para calentar el molde trabaja con PID.

### 3.7. Cálculo de conducción de calor hacia la placa

Sabemos que el grafito también debe alcanzar esta temperatura mientras esté sometido a compresión, por lo que las resistencias deben suplir esta necesidad también.

Se requiere cuantificar la energía necesaria para que el grafito alcance la temperatura de trabajo de 100 [°C].

$$Q = m * c * \Delta T$$

$$m = \rho * V$$

$$m = 3500 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 7,93 \times 10^{-5} [m^3] = 0,278 [kg]$$

$$Q = 0,278 [kg] * 709 \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * (100 - 30) [K] = 13787 [J]$$

Flujo de calor desde el molde hacia el grafito teniendo en cuenta el área de contacto en la compresión, se asumirá temperatura constante en la superficie de contacto, se reducirá el análisis al cálculo de transferencia de calor por parte del área más grande dado que es la que más calor aporta, por lo que se procede a calcular la potencia que se da entre la base caliente y su contraparte:

$$q = \frac{K * A}{L} * \Delta T$$

$$q = \frac{27 \left[ \frac{W}{m * K} \right] * 0,0102 [m^2]}{0,012 [m]} * (100 - 30)[K]$$

$$q = 1606,5 [W]$$

Una vez obtenida la potencia que recorre en la placa de grafito, podemos calcular el tiempo que le toma a este llegar a 100 [°C].

$$1606,5 [W] = \frac{13787 [J]}{t [s]}$$

$$t = 8,56 [s]$$

En el siguiente punto se procede a simular la geometría principal del sistema “sección hembra” observar la distribución de la temperatura en base a las condiciones ya estipuladas, el proceder del contraste tendrá como base el análisis de elementos finitos en Fusion 360 y la herramienta MATLAB para posteriormente compararlas con la distribución real de la temperatura.

### **3.8. Simulación de temperatura del molde**

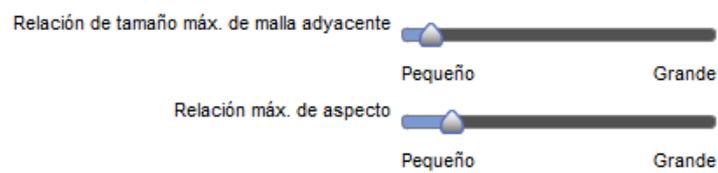
#### **3.8.1. Fusion 360**

Dado que las diferentes secciones del sistema fueron distribuidas en distintos archivos, se inicia realizando el montaje de este dentro del software Fusion 360 (Autodesk Inc., 2024). Para disminuir los inconvenientes que trae el exportar un dibujo de un programa a otro. Una vez exportado restringimos la sección hembra ante los parámetros de la temperatura y perdidas respectivas, debido a las limitaciones el análisis de elementos finitos se dará en estado estable.

El mallado es de suma importancia para el análisis, la generación por defecto depende del software, pero de igual existen ciertas características sobre las que si se tiene control como lo es el tamaño medio de los elementos creados, el orden de estos y la relación de aspecto. Para las distintas simulaciones la única variante será el tamaño de los elementos.

**Figura 3.5**

*Relaciones de la simulación-Fusion 360*



*Nota.* Se muestran las relaciones de aspecto del mallado realizado.

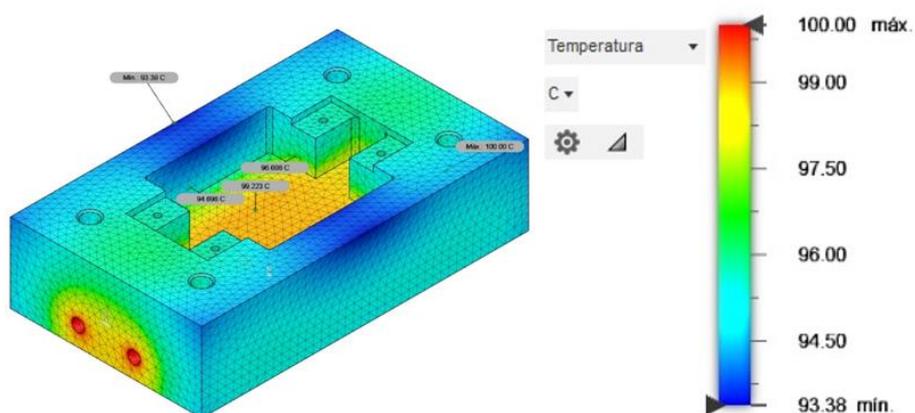
**Tabla 3.1**

*Simulaciones con diferentes tamaños de elementos en Fusion 360*

#	Elemento	Tamaño	Cantidad	nodos
1	Tetraédrico	15 [mm]	20108	4490
2	Tetraédrico	10 [mm]	26219	5729
3	Tetraédrico	5 [mm]	60878	12582

**Figura 3.6**

*Simulación de distribución de temperatura de Fusion 360 - Sección hembra*



*Nota.* Se muestra la distribución de temperatura en el molde, así como la paleta donde se visualiza la temperatura máxima y mínima.

### 3.8.2. Simulación MATLAB

El programa ofrece una variante de simulación de un sólido, sin embargo, es importante tener en cuenta que este software no es un programa direccionado a la simulación, pero dado que la complejidad es baja podemos observar la distribución de temperatura a través del uso de FEM, de igual forma lo primero que se realizó fue exportar el documento para poder ejecutarlo en el software, seguido de la generación del mallado y las condiciones de frontera, obteniendo los siguientes resultados:

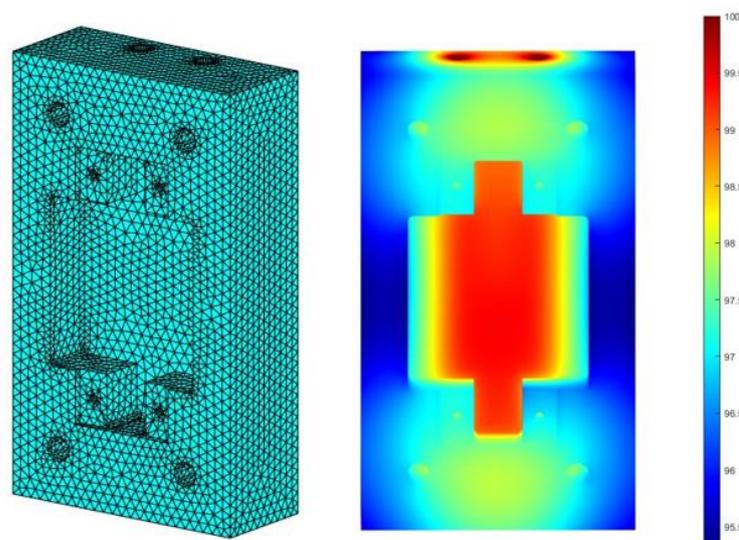
**Tabla 3.2**

*Simulaciones con diferentes tamaños de elementos en MATLAB*

#	Elemento	Tamaño	Cantidad	nodos
1	Tetraédrico	10 [mm]	14025	22778
2	Tetraédrico	5 [mm]	78807	117975

**Figura 3.7**

*Simulación de distribución de temperatura de MATLAB - Sección hembra*



*Nota.* Se muestra la distribución de temperatura en el molde, así como la paleta donde se visualiza la temperatura máxima y mínima.

El enfoque de los cálculos para la validación tiene como dirección la zona de trabajo, por esta razón se requiere un cálculo teórico para validar los datos de las simulaciones.

$$q = \frac{k}{L} * A * (T_R - T_t)$$

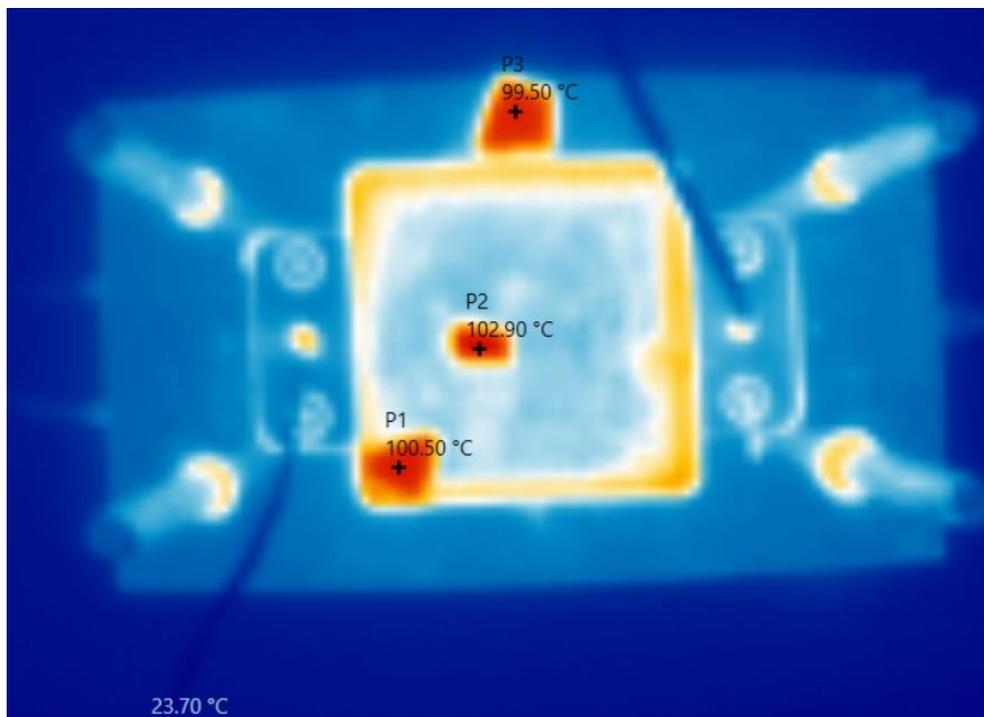
$$100 [W] = \frac{22,8 \left[ \frac{W}{m * K} \right]}{0,014 [m]} * (110 - T_t)$$

$$T_t = 100,16 [^{\circ}C]$$

Paralelamente, se tomaron valores experimentales de la temperatura en la sección de trabajo obteniendo los siguientes resultados:

**Figura 3.8**

*Foto cámara termográfica (sección hembra – vista superior) tiempo transcurrido 16 [min]*



*Nota.* Se observa los puntos de estudio, como lo son las superficies del centro y las esquinas de la cavidad.

Porcentaje de error de la cavidad con respecto a la simulación:

$$\%error = \frac{|V_{experimental} - V_{teorico}|}{V_{teorico}} * 100\%$$

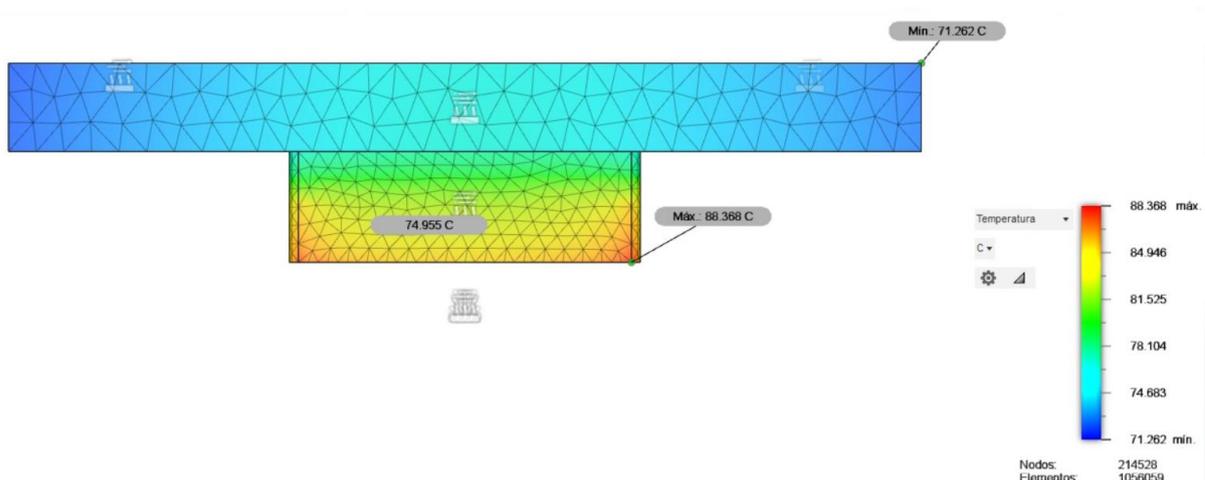
$$\%error = \frac{|102,9 - 100,16|}{100,16} * 100\%$$

$$error = 2,73\%$$

Por otra parte, al estar el sistema completo sección hembra y macho juntas, existe una mayor área de distribución de calor, así como de pérdidas hacia el medio, por lo que requerimos conocer las temperaturas en estado estable de la sección de trabajo, dado que las condiciones de frontera expresadas en la simulación están correctas, los datos obtenidos son confiables para realizar el siguiente análisis:

### Figura 3.9

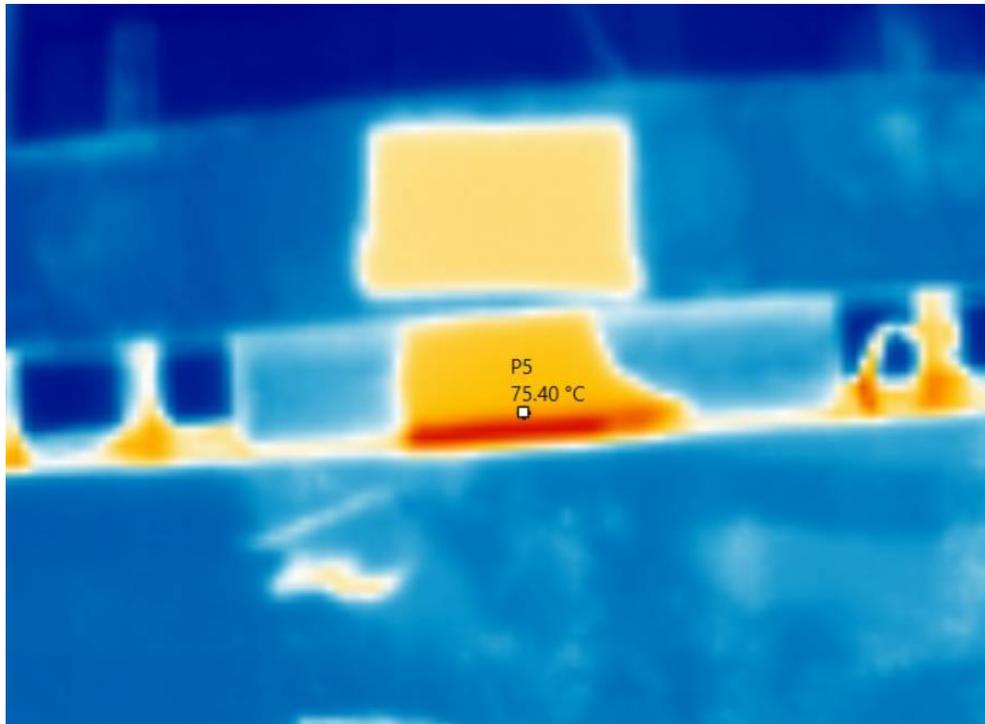
Simulación de distribución de temperatura de Fusion 360 - Sección macho



Nota. Simulación de la temperatura en el calce de la sección macho del sistema.

**Figura 3.10**

Foto cámara termográfica (molde ensamblado – vista lateral) tiempo transcurrido 30 [min]



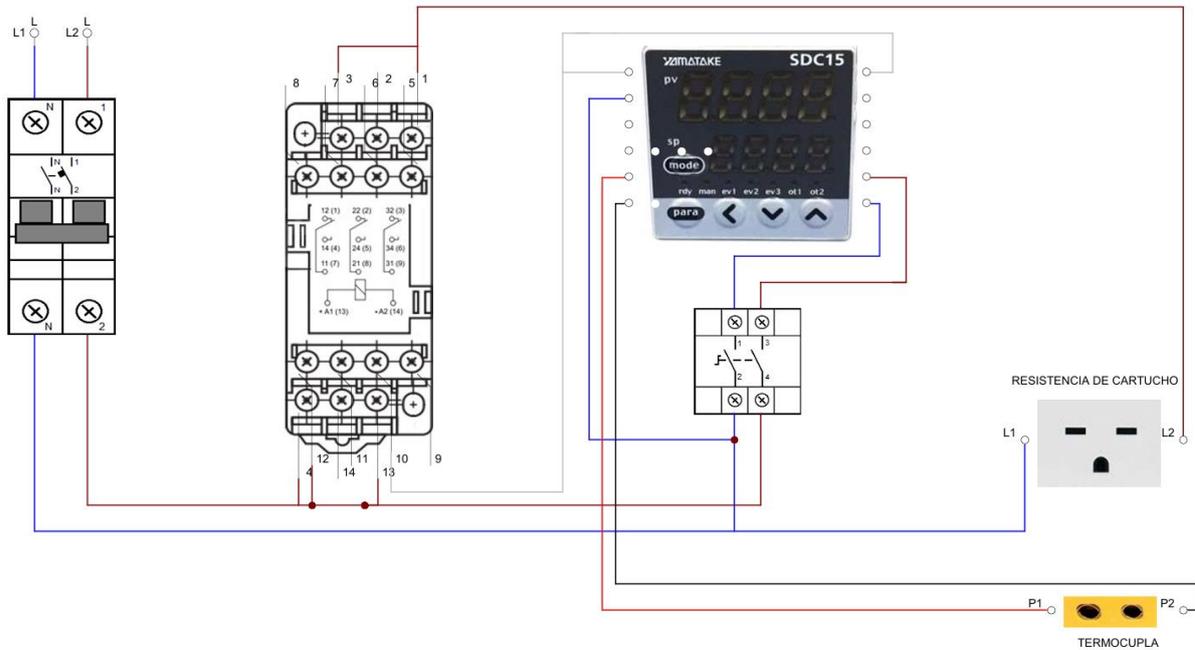
*Nota.* Se muestra el punto de estudio perteneciente al calce, para comparar con los valores de la simulación.

$$\%error = \frac{|75,4 - 74,95|}{74,95} * 100\%$$

$$error = 0,6\%$$

### 3.9. Sistema de control de temperatura

Una vez establecido el sistema de control utilizado, se realiza el diagrama para poder visualizar de forma efectiva si las hipótesis planteadas inicialmente eran las correctas, dando como resultado el siguiente circuito:

**Figura 3.11***Circuito del sistema de calentamiento*

*Nota.* Se muestra la composición del circuito, así como las conexiones respectivas para su funcionamiento.

Lo que se observa en la Figura 3.11 es un circuito el cual tiene un controlador SDC15 que se encarga de recibir la temperatura a partir de un sensor y enviar una señal a la resistencia de cartucho para que esta aumente su temperatura hasta llegar a los valores establecido en el setup. Sin embargo, la temperatura que alcanza el molde sobrepasa al valor establecido. Esto se debe a su configuración actual, la cual es un sistema encendido/apagado, por lo que tiene un mayor tiempo de encendido con la potencia máxima del sistema y esto hace que las temperaturas sobrepasen a las predeterminadas.

Con este antecedente, se establece la investigación del dispositivo SDC15 centrándose en la configuración de los parámetros del controlador para poder optimizar el funcionamiento del sistema. A partir de la investigación con el manual del controlador, se determinó que puede operar tanto encendido/apagado, como en un sistema PID. Se realizaron pruebas con ambos sistemas y se determinó que el más efectivo para el sistema de control de temperatura es el

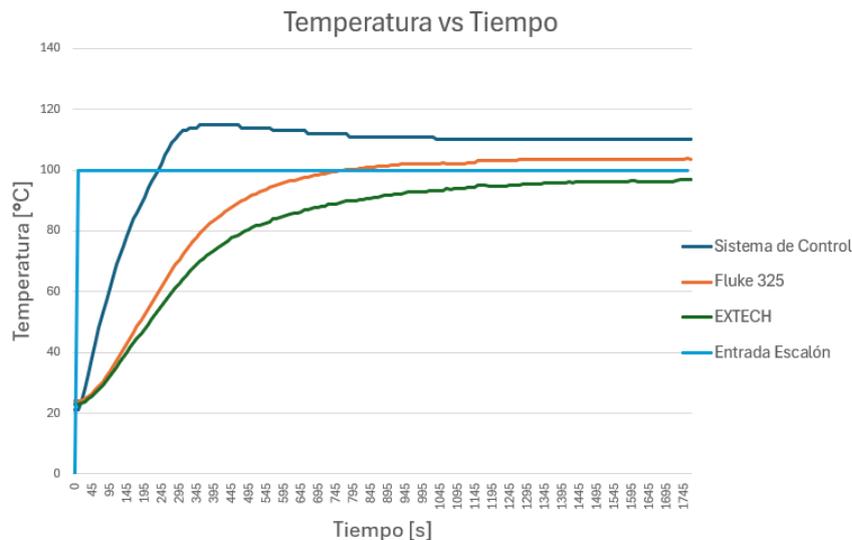
PID, dado que las oscilaciones del ancho de pulso se mantienen dentro de los parámetros establecidos por el cliente.

Cuando existe una mayor diferencia entre la temperatura medida y el setpoint resulta en un mayor tiempo de encendido, por ende, se incrementa la potencia y el calentamiento. A medida que la temperatura se acerca al setpoint, el tiempo de encendido disminuye, evitando sobrecalentamiento; la temperatura sigue oscilando ligeramente alrededor del setpoint, pero se encuentra dentro de un rango aceptable. Con esto permite un control efectivo de la potencia y un valor relativamente estable de la temperatura, logrando que el sistema PID sea el más adecuado.

Dado que la potencia y el tiempo de calentamiento del molde van de la mano y están a disposición del SDC15, el tiempo que le toma a la sección hembra y al sistema completo el alcanzar las temperaturas de trabajo varía drásticamente. De acuerdo con los resultados se tiene un tiempo experimental de 16 minutos para que la sección hembra alcance el equilibrio térmico y de 35 minutos para el sistema completo.

**Figura 3.12**

*Gráfico del comportamiento térmico del sistema*



*Nota.* La gráfica muestra el comportamiento térmico del sistema con diferentes sensores a una entrada escalón de 100 [°C].

### 3.10. Costos de Fabricación

Para una adecuada comprensión de los costos totales de fabricación, se presenta en esta sección los costos de los materiales y manufactura del molde. Los costos de los materiales se distribuyen según las secciones que componen el molde: bocines, columnas roscadas, cuñas, parte cóncava y convexa.

**Tabla 3.3**

*Costos de materia prima.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	MEDIDA [mm]	CANTIDAD	VALOR U.	TOTAL
1	Material H13 / hembra	∅ 252,5 x 55	1	\$331.20	\$331.20
2	Material H13 / macho	∅ 115 x 27	1	\$33.35	\$33.35
3	Material A36 / base macho	210 x 125 x 24	1	\$9.90	\$9.90
4	Bronce fosfórico / bocines	∅ 25 x 100	1	\$10.00	\$10.00
5	Acero plata / columnas	∅ 10 x 2000	1	\$29.90	\$29.90
6	Resistencias de cartucho	∅ 8 x 200	2	\$28.00	\$56.00
7	Termocupla tipo K	∅ 5 x 100	1	\$28.00	\$28.00
8	Cuñas	20 x 20 x 20	1	\$3.48	\$3.48
Subtotal					\$501.83

**Tabla 3.4**

*Costos de mecanizado.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	TIEMPO	TOTAL
1	Mecanizado	3 semanas	\$650.00
Subtotal			\$650.00

**Tabla 3.5**

*Costos de logística.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	TIEMPO	TOTAL
1	Cotización y Movilidad (Materiales)	2 días	\$60.00
2	Cotización y Movilidad (Mecanizado)	3 días	\$60.00
3	Transporte de materiales		\$40.00
Subtotal			\$160.00

**Tabla 3.6***Resumen de costos.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Materia Prima	\$501.83
2	Manufactura	\$65.00
3	Logística	\$160.00
	Subtotal	\$1311.83

El mecanizado comprende las técnicas empleadas para darle las medidas respectivas a las piezas, entre estas tenemos el fresado de las respectivas caras, torneado de los bocines, taladrado de los agujeros respectivos y fabricación de roscas, vaciado y manufactura de las esquinas a través de electroerosión.

La logística comprende los rubros relacionados al transporte y viáticos relacionados a los días dedicados para la cotización total del sistema.

Los precios mostrados corresponden al valor en dólares del proyecto realizado al día de publicación del documento, 17 de enero del 2025, tener en cuenta que el costo de los materiales varía de acuerdo con la casa comercial, además que el rubro del mecanizado cambia con el lugar de mecanizado.

### **3.11. Análisis de costos**

Para el análisis de costos, se realizó un estudio donde se puede emplear el molde, además de ser utilizado como método de fabricación en las placas de flujo. Este método es el de proveer de un servicio a instituciones privadas o públicas para la fabricación de muestras de estudio de materiales.

Por lo que, determinamos que también se puede a prestar servicios a instituciones para asistencia en manufactura y fabricación de piezas. Es importante aclarar que este análisis se asumió la fabricación de 48 probetas al año y que este molde duraría al menos 3 años, sin

embargo, esto puede aumentar llegando hasta al menos 10 años en donde se espera que se tengan nuevos métodos de fabricación debido al avance tecnológico actual.

**Tabla 3.7**

*Análisis de costos.*

Valor de salvamento				\$500.00
Ventas		\$4800.00	\$4800.00	\$4800.00
Ingresos				
Año	0	1	2	3
Egresos				
Materia Prima	\$501.83			
Cotización y Movilidad (Materiales)	\$60.00			
Cotización y Movilidad (Mecanizado)	\$60.00			
Transporte de Materiales	\$40.00			
Mecanizado del Material	\$650.00			
Mantenimiento		\$100.00	\$100.00	\$100.00
Costos de Operación		\$1920.00	\$1920.00	\$1920.00
Costos de Energético		\$24.00	\$24.00	\$24.00
Persona Encargada		\$2160.00	\$2160.00	\$2160.00

TIR	VAN
30%	\$377.73

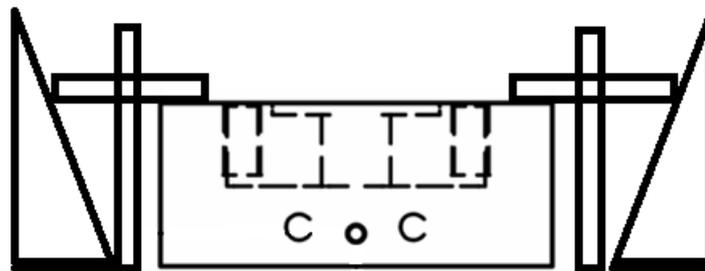
### 3.12. Análisis de resultados

El primer punto a estudiar es la deformación experimentada por el sistema debido a la presión ejercida, la sección macho que tiene contacto directo con la prensa consta de 2 materiales diferentes, acero A36 y H13, se tiene que para el acero A36 se genera una deformación de 0,00372 [mm] y consecuentemente el acero H13 tiene una deformación de 0,00354 [mm], que verificando con los valores simulados de la Figura 3.2 obteniendo así un

error del 11%, este valor es muy alto para una aproximación relacionada a la simulación ya que el análisis teórico está ligado a muchas asunciones comparado con el sistema real. La geometría total del molde está ligada a deflexión mínima para garantizar una superficie plana, de igual manera los grosores están sustentados por las formas de sujeción del sistema sobre la bancada de la prensa o troquel como se muestra en la Figura 3.13.

**Figura 3.13**

*Sujeción del sistema sobre la bancada*



*Nota.* Boceto describiendo la sujeción del molde con la bancada de la prensa por medio de bridas.

Respecto a la sección térmica, como se puede evidenciar en la Tabla 3.1 se realizaron 3 simulaciones en Fusion 360 donde la malla se refinaba cada vez más dando pasos de 5 [mm], se puede observar que a menor tamaño de elementos el orden mejora, reflejando así a nivel visual una señal de que la simulación respectiva tendría mejores resultados, por esto se observó que las variaciones en las temperaturas son mínimas 0,02 [°C] siendo factible emplear elementos de mayor tamaño para optimizar los recursos.

En referencia a Matlab, se visualiza que la generación de la malla es idéntica a la de Fusion 360. Se realizaron dos simulaciones con elementos de 5 a 10 [mm], donde se da a conocer que las distribuciones no varían significativamente pudiendo así definir que una malla de 10 [mm] es más que suficiente para obtener resultados decentes.

Habiendo obtenido la convergencia de los valores en cada una de las variantes empleadas, podemos compararlas entre sí, rápidamente podemos observar el rango de temperatura generado por los programas siendo de [100 < °C < 93,38] para fusión y [100 < °C <

95,5] para Matlab, además, los colores empleados en las distribuciones de la temperatura nos sirven de guía para asegurar que las distribuciones son similares lo que corrobora que las simulaciones son semejantes.

Comparando los valores teóricos de la temperatura en la superficie de la cavidad con los datos obtenidos por la simulación y el valor real, obtenemos un porcentaje de error del 2,73% encontrándose dentro del rango permitido en el que podemos aseverar nuevamente que la simulación se acerca mucho al comportamiento real de la matriz.

Por otro lado, al momento de unir las secciones (hembra-macho) el calor se transfiere desde la sección hembra al macho, debido a que el sistema de control está relacionado a la sección cóncava. La potencia suministrada no aumentará a sea de consideración, lo cual es el caso expuesto, cuando el calce entre en contacto con la sección hueca se produce una mayor pérdida por conducción siendo así necesario el envío de mayor potencia desde las resistencias hacia el sistema, manteniendo la temperatura de trabajo, como consecuencia el tiempo para alcanzar el estado estable es de 30 minutos aproximadamente con una temperatura de contacto con el grafito de  $71,8 [^{\circ}C]$  siendo un valor muy aproximado al de la simulación.

Para finalizar el sistema de control de temperatura tuvo varias modificaciones tanto en el modelo de control que pasó de encendido/apagado a PID, el tipo de termocupla empleada y parámetros de lectura máxima a la que puede trabajar el sistema de control de temperatura.

### **3.13. Análisis comparativo de resultados**

Los resultados teóricos o de simulación desarrollados en este proyecto fueron evaluados una vez fabricado el molde, sin embargo, es importante una comparativa con proyectos similares; por lo que, se evaluó de un proyecto que emplea un sistema de moldeo por compresión térmica con diferencias notables en el enfriamiento.

Comparando los datos obtenidos con este sistema se logró observar que el modelo empleado en este proyecto no solo se basa con un sistema para aumentar la temperatura del molde, sino que también tienen un sistema de enfriamiento, sin embargo, esta comparativa no

se basará en este factor dado que el cliente a que va dirigido el proyecto es distinto, en nuestro caso necesitamos enfriamiento por convección libre (Lucana Masias, 2008).

En este proyecto se presentan mejores resultados en los valores teóricos obtenidos de la deformación del molde el cual tiene un valor de 0,00372 [mm], en comparación a los 0,0441 [mm], esto se puede deber a los materiales empleados durante la fabricación del molde. Se emplearon materiales con alta capacidad de transferencia de calor para las secciones donde el material que se va a moldear se encuentra en contacto, sin embargo, hay que tener en cuenta los costos de fabricación de cada proyecto, en este caso los costos son de 1151.83 dólares americanos solo en la compra de materiales y manufactura del molde; por otra parte ellos tuvieron costos de 454.17 soles que a cambio de hoy representa 95,24 dólares americanos; es importante aclarar que no se tomó en cuenta los otros rubros tales como el sistema de calentamiento y enfriamiento debido a que no son el alcance de este proyecto (Lucana Masias, 2008).

Los costos de fabricación de ambos proyectos presentan diferencias significativas en la inversión realizada, principalmente debido a la selección de la materia prima. En nuestro proyecto, se emplearon materiales resistentes a temperatura y presión, como el acero H13, en comparación con la aleación de aluminio (alumold 500) que se utilizó en el otro proyecto, cuya temperatura máxima sin deformarse es de 110 °C. Esto reduce considerablemente los costos, tanto de adquisición de materiales como de manufactura (Lucana Masias, 2008).

Otro punto importante para tener en cuenta es que el proyecto solo cuenta con un proceso de calentamiento en la sección inferior de la matriz, por otro lado, este otro proyecto emplea el calentamiento en ambas secciones. La diferencia más significativa se radica en la potencia dado que este trabajo se desarrolla con una potencia de 1600 [W], en comparación a los 2000 [W] tanto para la sección inferior como la sección superior de la matriz; por lo que los tiempos que le toma llegar a la temperatura deseada es menor en comparación a nuestro proyecto superándolo por más del 60% (Lucana Masias, 2008).

## Capítulo 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio ha permitido analizar y evaluar los aspectos relacionados a la fabricación de un molde por compresión térmica para la manufactura de placas de grafito. A partir de los resultados obtenidos a través de las simulaciones y aplicaciones se da paso a las conclusiones más relevantes, así como a las recomendaciones para las posteriores mejoras en futuros trabajos homólogos a este:

### 4.1. Conclusiones

- A partir del análisis de las alternativas evaluadas en el proyecto, tales como: el método de extracción del material final, alineación de las secciones del molde y su geometría. Se realizaron los planos CAD correspondientes a la Alternativa 3 que fue la opción más adecuada, de esta manera, los planos propuestos cumplen con los estándares tanto de tolerancia como de funcionamiento para la fabricación del producto final.
- Los resultados en la simulación de la distribución de temperatura, obtenidos mediante Fusion 360 y MATLAB, indican que se alcanza una temperatura máxima de 96,33 [°C] en la periferia durante el proceso de moldeo. La validación cruzada de la simulación con los datos teóricos revela una variación del 1,33% ( $\pm 2$  [°C]), lo que confirma la alta precisión del modelo y su capacidad para cumplir con los requisitos del cliente.
- Realizando los ajustes necesarios en los parámetros en el dispositivo de control SDC15 se modificó su configuración inicial encendido/apagado a un control PID. En definitiva, estos cambios mejoraron la estabilidad térmica del molde, demostrando la efectividad de la modificación en el sistema.

- Tras finalizar el proceso de moldeo, el material compuesto de resina y grafito requiere un mecanizado. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo, no se logró fabricar las placas de flujo.

#### 4.2. Recomendaciones

Las recomendaciones a tener en cuenta para un posible cambio del molde o para la fabricación de algún homologado son las siguientes:

- Incorporar una resistencia de cartucho en el calce macho para así asegurarse que la temperatura dentro de la cámara donde se encuentra el grafito tiene una temperatura homogénea de 100 [°C].
- El molde diseñado está estructuralmente sobredimensionado, lo que se traduce en mayores costos y mayor tiempo de fabricación, por lo que se puede disminuir las medidas mostradas en el Apéndice A del plano de la sección hembra sin que se comprometa la integridad de este.
- Para mejorar los tiempos de calentamiento del molde, es necesario implementar un par de resistencias de cartucho en la parte superior de la sección hembra.
- Para el sistema de temperatura, se aconseja el cambio de un sistema encendido/apagado hacia un PID para asegurarse que la temperatura de trabajo no tenga grandes fluctuaciones.

# BIBLIOGRAFÍA

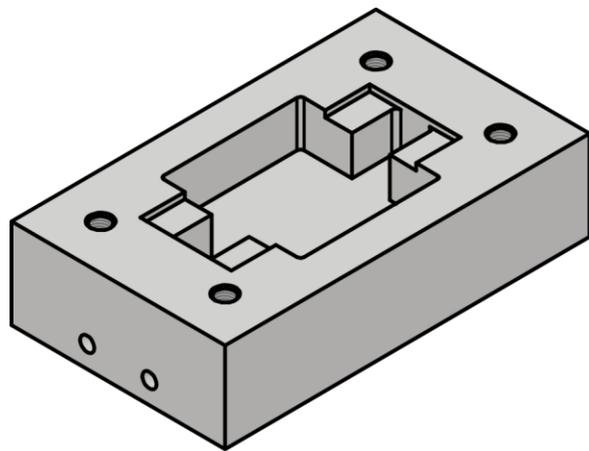
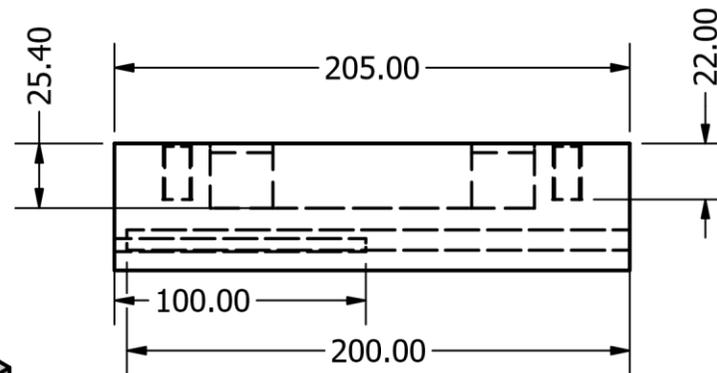
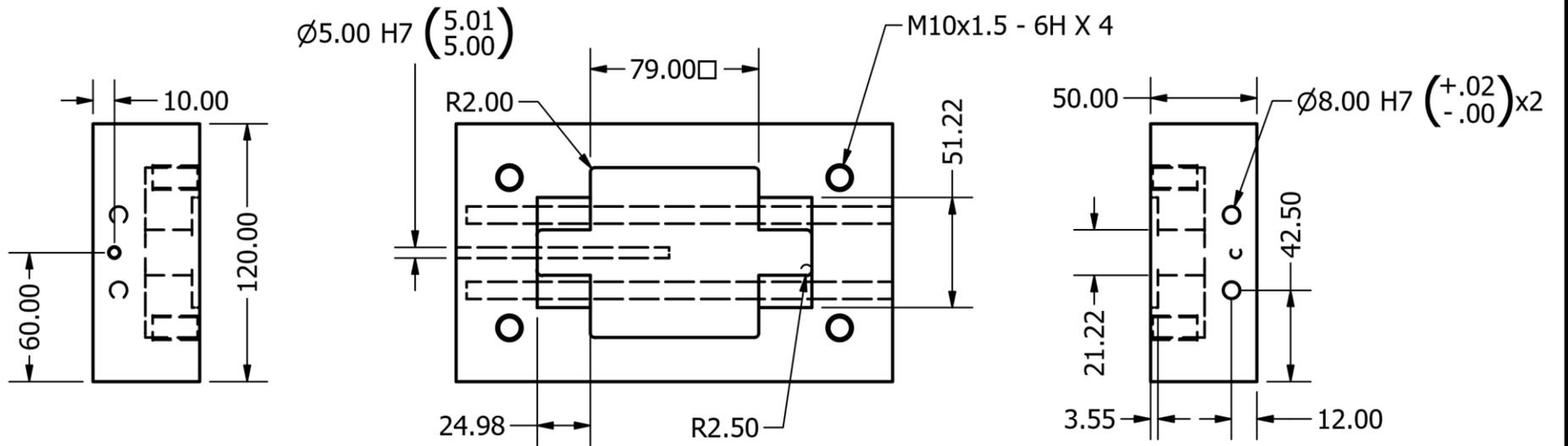
- Azbil. (2016). *Azbil North America, INC*. Recuperado de [https://www.orderazbil.com/ccrz\\_ProductDetails?sku=C15&cclcl=en\\_US](https://www.orderazbil.com/ccrz_ProductDetails?sku=C15&cclcl=en_US)
- Böhler, A. (s.f.). *Voestalpine*. Recuperado de <https://www.acerosbohler.com/es/products/w302-isobloc/>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Díez Barcenilla, G. (2023). *Diseño, desarrollo e implementación de la sostenibilidad para el moldeo de materiales compuestos*. Recuperado de [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/62154/TESIS\\_DIEZ\\_BARCENILLA\\_GORKA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/62154/TESIS_DIEZ_BARCENILLA_GORKA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jiménez Arias, L. J. (2024). *Implementación de dos sistemas de control de temperatura mediante la acción de control ON/OFF para el laboratorio de tecnología industrial de la ESFOT*. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/26112/1/CD%2014564.pdf>
- Lucana Masias, D. I. (2008). *Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica*. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1a34f275-f9a6-4ecf-bf95-09c2d80654f0/content>
- Nisbett, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México, D. F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Santana-Villamar, J., Carrasco-Cordero, M., Suarez-Loor, J., Espinoza-Andaluz, M., & Rigail-Cedeño, A. F. (2024). *Low-energy and solventless manufacturing of epoxy/expanded graphite bipolar plates*. *Materials Advances*, 5(17), 7028–7034. <https://doi.org/10.1039/d4ma00327f>

Tibaquirá G., J. E., & Posner, J. D. (2009). *Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico*. *Scientia et Technica*, 75–80. Recuperado de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2569/1473>

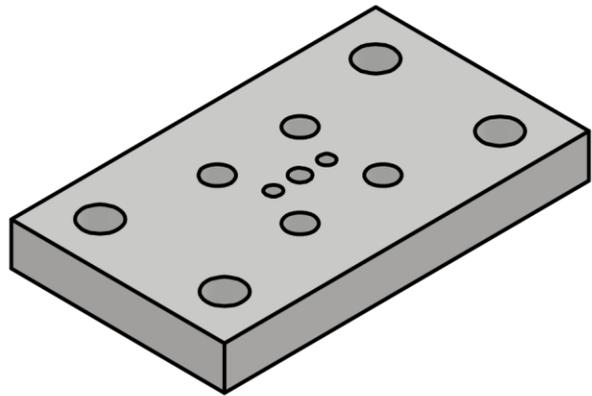
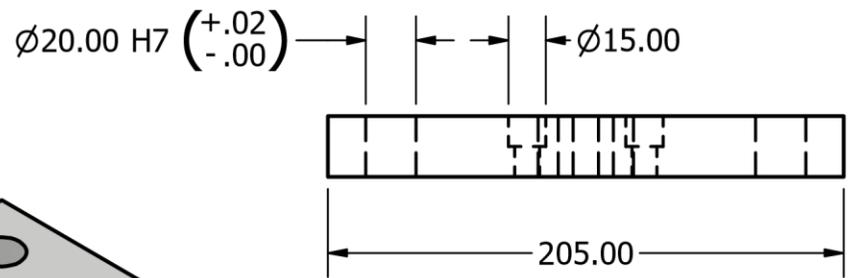
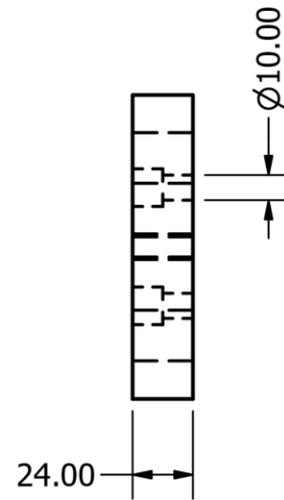
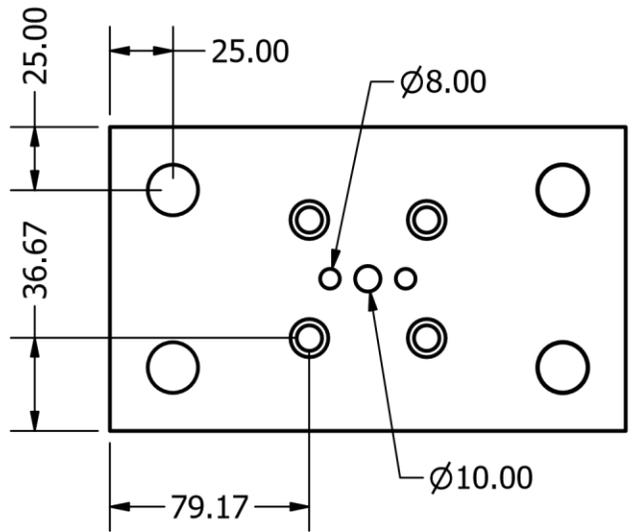
U.S. Department of Energy. (n.d.). *Fuel Cells*. Recuperado el 31 de enero de 2025, de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

# APÉNDICE A

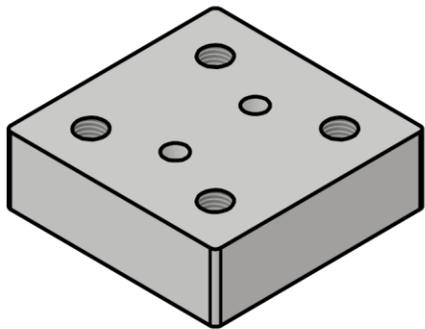
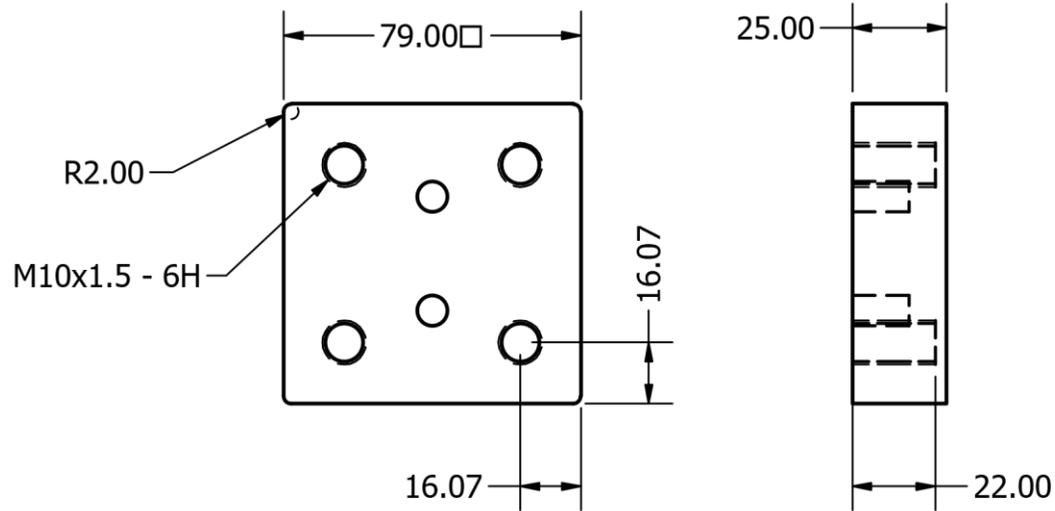
1. PLANO SECCIÓN HEMBRA
2. PLANO SECCIÓN MACHO-BASE
3. PLANO SECCIÓN MACHO-CALCE
4. PLANO CUÑA
5. PLANO BOCÍN Y COLUMNA
6. CÓDIGO SIMULACIÓN EN MATLAB
7. MANUAL DE USUARIO DEL CONTROLADOR SDC15



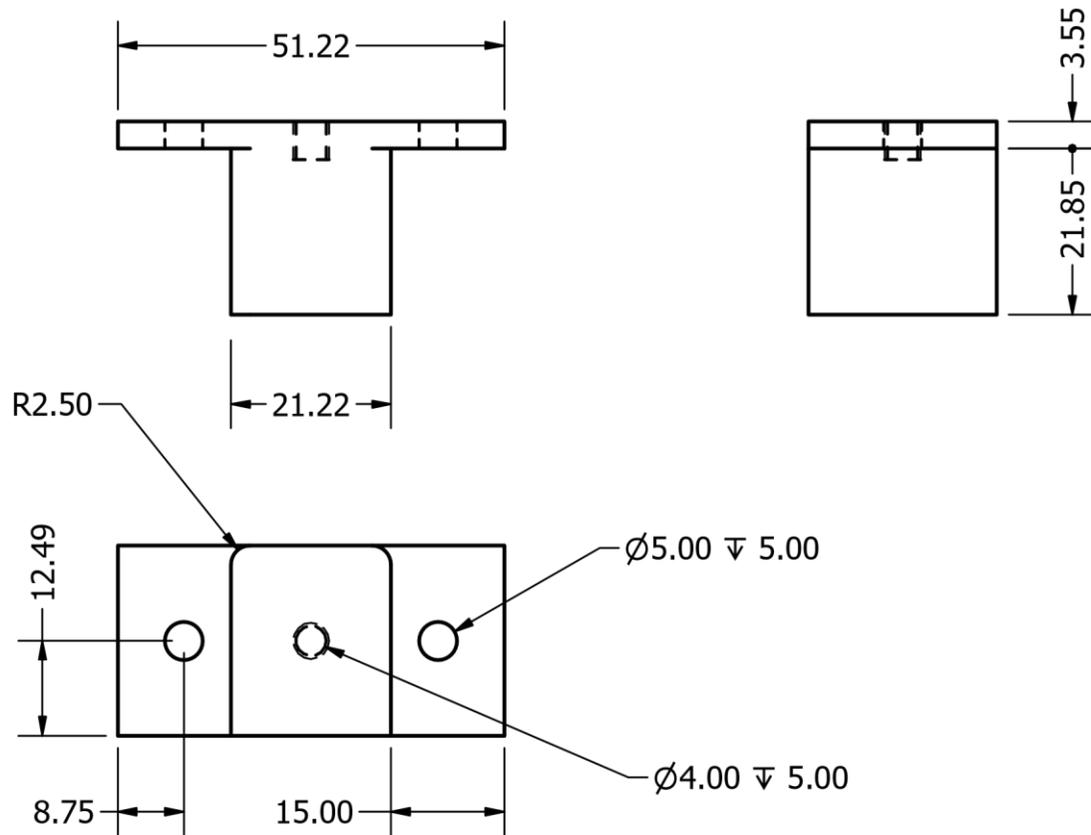
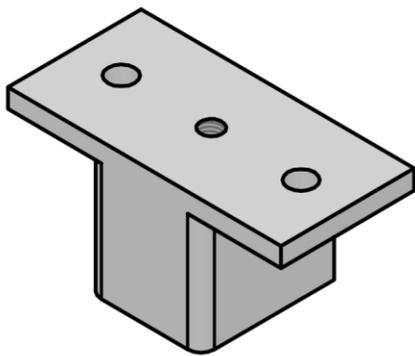
ESCALA:	1:3	TÍTULO:	
MATERIAL:	ACERO H13	MOLDE DE COMPRESIÓN TÉRMICA	
UNIDADES:	MILÍMETROS	<b>SECCIÓN HEMBRA</b>	
FORMATO:	A4		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LAS PRODUCCIÓN



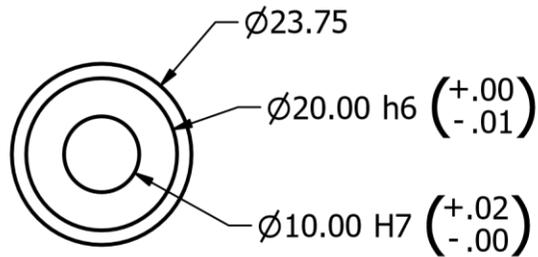
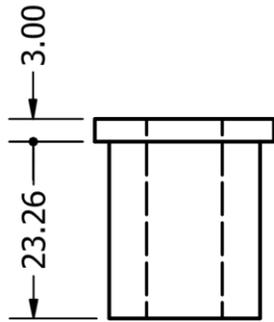
ESCALA:	1:3	TÍTULO:	
MATERIAL:	ACERO A36	MOLDE DE COMPRESIÓN TÉRMICA <b>SECCIÓN MACHO-BASE</b>	
UNIDADES:	MILÍMETROS		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LAS PRODUCCIÓN
FORMATO:	A4		



ESCALA:	1:2	TÍTULO:	
MATERIAL:	ACERO H13	MOLDE DE COMPRESIÓN TÉRMICA <b>SECCIÓN MACHO-CALCE</b>	
UNIDADES:	MILÍMETROS		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LAS PRODUCCIÓN
FORMATO:	A4		



ESCALA:	1:2	TÍTULO:	
MATERIAL:	ACERO H13	MOLDE DE COMPRESIÓN TÉRMICA <b>CUÑA</b>	
UNIDADES:	MILÍMETROS		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LAS PRODUCCIÓN
FORMATO:	A4		



$\varnothing 10.00 \text{ h6 } \left( \begin{matrix} +.00 \\ -.01 \end{matrix} \right)$

M10x1.5

22.43

100.00

ESCALA:	1:1	TÍTULO: MOLDE DE COMPRESIÓN TÉRMICA <b>COLUMNAS y BOCÍN</b>	
MATERIAL:	Acero y bronce		
UNIDADES:	MILÍMETROS		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LAS PRODUCCIÓN
FORMATO:	A4		

## Código Matlab de simulación en estado estable.

```
archivo = 'Molde_Hembra_final.stl';

% Crear un modelo PDE y cargar la geometría
thermalModel = createpde('thermal', 'steadystate'); % Modelo de conducción estacionaria
geometry = importGeometry(thermalModel, archivo);
%%
% Mostrar la geometría importada
figure;
pdegplot(geometry, 'FaceLabels', 'on'); % Mostrar las caras con etiquetas
title('Geometría Importada');
%%
% Definir propiedades térmicas del material
thermalProperties(thermalModel, 'ThermalConductivity', 22.8); % Ejemplo: k = 30 W/(m*K)
%%
% Aplicar condiciones de frontera
thermalBC(thermalModel, 'Face', 14:31, ...
    'Temperature', 100); % Ejemplo: Temperatura fija de 100°C en las caras 14 a 31
%% conveccion
thermalBC(thermalModel, 'Face',
[11,12,13,14,15,16,17,18,21,22,24,25,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,59,60,61,62,63], ...
    'ConvectionCoefficient', 10.29, ... % h = 25 W/(m^2*K)
    'AmbientTemperature', 19); % Temperatura ambiente = 25 °C
%% radiacion
% Asignar la constante de Stefan-Boltzmann
thermalModel.StefanBoltzmannConstant = 5.67e-8; % W/(m^2*K^4)
thermalBC(thermalModel, 'Face',
[11,12,13,14,15,16,17,18,21,22,24,25,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,59,60,61,62,63], ...
    'Emissivity', 0.15, ... % Emisividad de la superficie
    'AmbientTemperature', 19); % Temperatura ambiente = 25 °C
%% malla
generateMesh(thermalModel, 'Hmax', 5); % Tamaño máximo de los elementos
figure;
pdeplot3D(thermalModel); % Visualizar la malla generada
title('Malla Generada');
%% resolver
options = struct('MaxIter', 1000, 'RelTol', 1e-6); % Ajusta las opciones de convergencia
resultados = solve(thermalModel, options);

% Visualizar la distribución de temperatura
figure;
pdeplot3D(thermalModel, 'ColorMapData', resultados.Temperature);
title('Distribución de Temperatura');
colorbar;
```

# SDC15 Single Loop Controller User's Manual for Installation

Thank you for purchasing the SDC15. Before operating this product described in this User's Manual, please take note of the following points regarding safety. Be sure to keep this manual nearby for handy reference.

## RESTRICTIONS ON USE

This product has been designed, developed and manufactured for general-purpose application in machinery and equipment. Accordingly, when used in applications outlined below, special care should be taken to implement a fail-safe and/or redundant design concept as well as a periodic maintenance program.

- Safety devices for plant worker protection
- Start/stop control devices for transportation and material handling machines
- Aeronautical/aerospace machines
- Control devices for nuclear reactors

Never use this product in applications where human safety may be put at risk.

## REQUEST

Ensure that this User's Manual is handed over to the user before the product is used. Copying or duplicating this User's Manual in part or in whole is forbidden. The information and specifications in this User's Manual are subject to change without notice. Considerable effort has been made to ensure that this User's Manual is free from inaccuracies and omissions. If you should find any inaccuracies or omissions, please contact Yamatake Corporation. In no event is Yamatake Corporation liable to anyone for any indirect, special or consequential damages as a result of using this product.

©2003 Yamatake Corporation ALL RIGHTS RESERVED

This manual explains handling precautions, mounting, wiring procedures, PV range types, parameter list and main specifications only. See the user's manuals listed below for detailed handling procedures, setting methods, etc. These manuals also contain information on using various functions.

SDC15 Single Loop Controller User's Manual for Basic Operation CP-SP-1147E

SDC15 Single Loop Controller User's Manual for Installation & Configuration CP-SP-1148E

SLP-C35 Smart Loader Package for SDC15/25/26/35/36 Single Loop Controller User's Manual CP-UM-5290E

## Unpacking

Check the following items when removing the SDC15 from its package:

Name	Part No.	Qty	Remarks
Mounting Bracket	81446403-001	1	For C15T only
Gasket	81409657-001	1	For C15T only
User's Manual	CP-UM-5287E	1	This Manual
	CP-UM-5287	1	

## SAFETY PRECAUTIONS

**WARNING** Warnings are indicated when mishandling this product might result in death or serious injury to the user.

**CAUTION** Cautions are indicated when mishandling this product might result in minor injury to the user, or only physical damage to this product.

### WARNING

- Note that incorrect wiring of the SDC15 can damage the SDC15 and lead to other hazards. Check that the SDC15 has been correctly wired before turning the power ON.
- Before wiring, or removing/mounting the SDC15, be sure to turn the power OFF. Failure to do so might cause electric shock or faulty operation.
- Do not touch electrically charged parts such as the power terminals. Doing so might cause electric shock.
- Do not disassemble the SDC15. Doing so might cause electric shock or faulty operation.

### CAUTION

- Use the SDC15 within the operating ranges recommended in the specifications (temperature, humidity, voltage, vibration, shock, mounting direction, atmosphere, etc.). Failure to do so might cause fire or faulty operation.
- Do not block ventilation holes. Doing so might cause fire or faulty operation.
- Wire the SDC15 properly according to predetermined standards. Also wire the SDC15 using specified power leads according to recognized installation methods. Failure to do so might cause electric shock, fire or faulty operation.
- Do not allow lead clippings, chips or water to enter the controller case. Doing so might cause fire or faulty operation.
- Firmly tighten the terminal screws at the torque listed in the specifications. Insufficient tightening of terminal screws might cause electric shock or fire.
- Do not use unused terminals on the SDC15 as relay terminals. Doing so might cause electric shock, fire or faulty operation.
- We recommend attaching the terminal cover (sold separately) after wiring the SDC15. Failure to do so might cause electric shock.
- Use the relays within the recommended service life. Continuous use might cause fire or faulty operation.
- Use Yamatake Corporation's "SURGENON" if there is the risk of power surges caused by lightning. Doing so might cause fire or faulty operation.
- Do not operate the keys with a mechanical pencil or sharp-tipped object. Doing so might cause faulty operation.

## Mounting

### Location

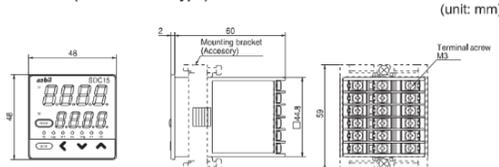
- Install the controller in the following locations:
- Common mode voltages for I/O excluding the power supply and relay contact output: The voltage to ground is 33Vr.m.s max., 46.7V peak max., and 70Vdc max.
  - Not high or low temperature / humidity.
  - Free from sulfide gas or corrosive gas.
  - Less dust or soot.
  - Appropriately processed locations to prevent direct sunlight, wind or rain.
  - Less mechanical vibration and shock.
  - Not close to the high voltage line, welding machine or electrical noise generating source.
  - The minimum 15 meters away from the high voltage ignition device for a boiler.
  - Less effect by the magnetic.
  - No flammable liquid or gas.

### Mounting Procedure

- The mounting must be horizontal within 10 degrees tilted in back side lowering or within 10 degrees tilted in back side rising.
- In the case of panel mount type (C15T), the mounting panel should be used with a thickness of less than 9 mm of firm board.

### External Dimensions

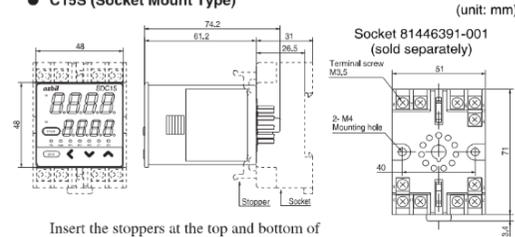
#### C15T (Panel Mount Type)



### Handling Precautions

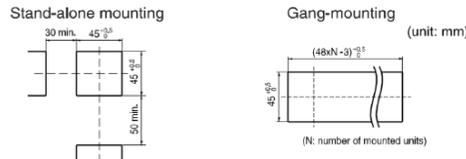
To fasten this controller onto the panel, tighten a mounting bracket screws, and turn one more half turn when there is no play between the bracket and panel. Excessively tightening the screws may deform the controller case.

#### C15S (Socket Mount Type)



Insert the stoppers at the top and bottom of the socket into the holes of the controller body to firmly secure it to the socket.

#### Panel Cutout Dimensions



### Handling Precautions

- When three or more units are gang-mounted horizontally, the maximum allowable ambient temperature is 40°C.
- If dustproof or waterproof protection is required, mount the device using the stand-alone mounting method. If gang-mounted, dustproof and waterproof protection may not be maintained.
- Provide a space of at least 50mm or more above and below the controller.

## Wiring

Be sure to provide a switch within operator reach for shutting OFF the main power supply to the controller in the main supply wiring. Also, in case of AC power supply models, the main supply wiring also requires a time-lagged type (T) fuse (rated current: 0.2A, rated voltage: 250 V). (IEC127)

The following table shows the meaning of the symbols in the terminal wiring label on the controller side:

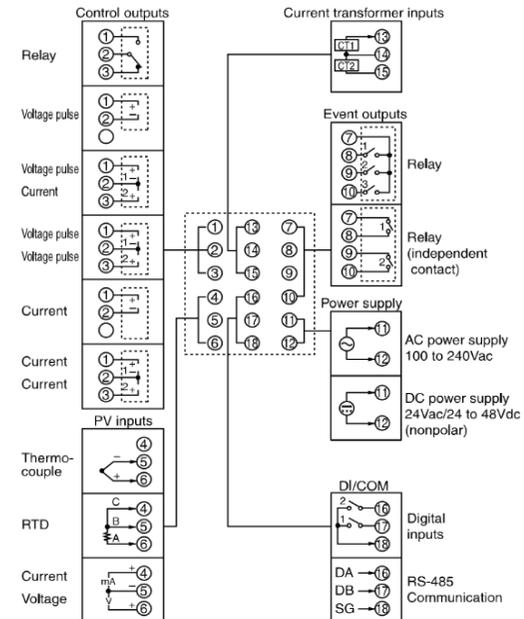
Symbols	Meaning
⎓	DC power supply
~	AC power supply
⚠	Caution, fear of electric shock
⚠	Caution

### Handling Precautions

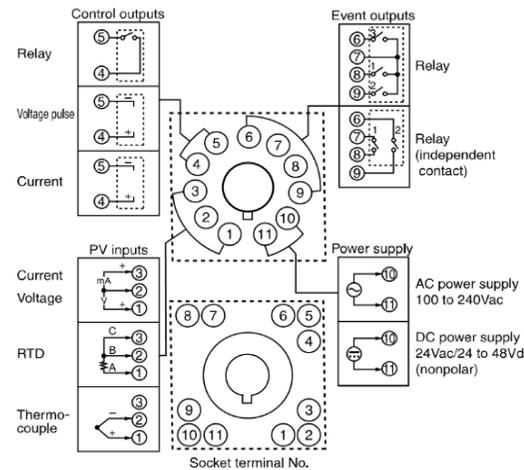
- Before wiring the SDC15, verify the controller's model No. and terminal Nos. written on the label on the side of the body. Inspect all wiring once wiring work for the SDC15 has been completed.
- Use M3 crimp-type terminal lugs for wiring to terminal.
- Provide a distance of at least 50cm between I/O lead wires or communications lead wires and power lead wires of 100V min. Also, do not pass these lead wires through the same piping or wiring duct.
- Be careful not to allow any crimp-type terminal lugs to touch adjacent terminals.
- Prepare a heater current conductor to send a heater current through the current transformer.
- Do not use a heater current that exceeds the specified permissible current as this may damage the controller.
- The controller requires about 6 seconds to start up once the power is turned ON. The controller can be used once it has started up. However, it is recommended to allow a warm-up time of at least 30 minutes to attain the specified accuracy.
- The current transformer input cannot be used for phase control.
- There is no isolation provided between control output 1 and control output 2.
- Install an isolator as required.
- Do not connect a terminating resistor to either end of the RS-485 communications line. Doing so may interfere with communication.

- Regarding a device or equipment which is connected to this controller, use a model to which the basic insulation meeting with the power supply voltage and the maximum operating voltage of the I/O units is provided.

### Connection of C15T



### Connection of C15S



### I/O isolation

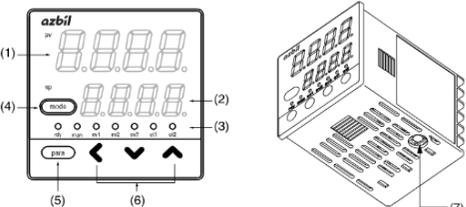
Items surrounded by solid lines are insulated from other signals.

Power supply	Internal Circuit	Control output 1
PV input		Control output 2
Current Transformer input 1	Event output 1 (Note)	Event output 2 (Note)
Current Transformer input 2		Event output 3
Loader communication		
Digital input 1		
Digital input 2		
RS-485 Communication		

Availability of input or output is based on a model number.

(Note) In case of the independent contact, the part between the event output 1 and the event output 2 is isolated.

## Part names and functions



- (1) Upper display : Displays PV values (current temperature, etc.) or setup items.
- (2) Lower display : Displays SP values (set temperature, etc.) and other values of setup items.
- (3) Mode indicator rdy : Lights when READY (control stop)  
man : Lights when MANUAL (manual mode)  
ev1 to ev3 : Lights when event relays are ON.  
ot1 to ot2 : Lights when the control output is ON.
- (4) Mode key : The operation which was set beforehand can be done by pressing the key for 1s or more. Factory setting is RUN / READY selection.
- (5) Para key : Switches the display.
- (6) <, >, A keys : Used for incrementing numeric values and performing arithmetic shift operations.
- (7) Loader connector: Connects to a personal computer with the special cable provided in the smart loader package.

## SP setup

While the PV/SP is displayed in the operation display mode, press the [ $\leftarrow$ ]·[V]·[A] key to change the SP in the lower display.  
 >> When no keys are pressed for 2 sec. or longer, the flashing of the numeric value is stopped to set the currently displayed value.  
 SP can be set in the parameter setting display mode.

For details on handling and setting procedures other than the PV input range setting procedure, refer to the table of parameter list. For the details on operation and setting method, refer to the following user's manuals:  
 SDC15 Single Loop Controller User's Manual for Basic Operation CP-SP-1147E  
 SDC15 Single Loop Controller User's Manual for Installation & Configuration CP-SP 1148E

## PV range table

CO1 No.	Sensor type	Range[°C]	Range[°F]	CO1 No.	Sensor type	Range[°C]	Range[°F]
1	K	-200 to +1200	-300 to +2200	41	Pt100	-200 to +500	-300 to +900
2	K	0 to 1200	0 to 2200	42	JPt100	-200 to +500	-300 to +900
3	K	0 to 800	0 to 1500	43	Pt100	-200 to +200	-300 to +400
4	K	0 to 600	0 to 1100	44	JPt100	-200 to +200	-300 to +400
5	K	0 to 400	0 to 700	45	Pt100	-100 to +300	-150 to +500
6	K	200 to +400	-300 to +700	46	JPt100	-100 to +300	-150 to +500
9	J	0 to 800	0 to 1500	51	Pt100	-50.0 to +200.0	-50 to +400
10	J	0 to 600	0 to 1100	52	JPt100	-50.0 to +200.0	-50 to +400
11	J	-200 to +400	-300 to +700	53	Pt100	-50.0 to +100.0	-50 to +200
13	E	0 to 600	0 to 1100	54	JPt100	-50.0 to +100.0	-50 to +200
14	T	-200 to +400	-300 to +700	83	Pt100	0.0 to 200.0	0 to 400
15	R	0 to 1600	0 to 3000	64	JPt100	0.0 to 200.0	0 to 400
16	S	0 to 1600	0 to 3000	67	Pt100	0 to 500	0 to 900
17	B	0 to 1800	0 to 3300	68	JPt100	0 to 500	0 to 900
18	N	0 to 1300	0 to 2300				
19	PL11	0 to 1300	0 to 2300				
20	WRcS-26	0 to 1400	0 to 2400				
21	WRcS-26	0 to 2300	0 to 4200				
24	DIN U	200 to +400	-300 to -700				
25	DIN L	100 to +800	-150 to +1500				

## Handling Precautions

- The accuracy of the B thermocouple is  $\pm 5\%$ FS for a range of 260°C or less, and  $\pm 1\%$ FS for 260 to 800°C. The indicated low limit is 20°C.
- The accuracy of the PL11 thermocouple(CO1 No.19) in the range of 0 to 32°F does not meet the indication accuracy specified in the Specifications.
- For ranges with a decimal point, tenths are displayed on the line underneath point.
- Set by the number of setup CO1 according to the type and range of the sensor used.

## Alarm code table

This table shows a list of malfunction alarms and countermeasures to take in each case.

Alarm code	Error	Cause	Countermeasure
AL01	PV input error (over range)	Sensor line break, incorrect wiring, incorrect range code setting	Checking wiring or reset range code..
AL02	PV input error (under range)	Sensor line break, incorrect wiring, incorrect range code setting	Checking wiring or reset range code..
AL03	CJ failure	Terminal temperature compensation unit failure (thermocouple)	Checking the allowable ambient temperature.
	PV input error	Sensor line break, incorrect wiring (RTD)	Checking wiring.
AL11	CT input failure (over-range) (CT input 1 or 2, or both)	A current exceeding the upper limit of the display range was measured. The number of CT turns or the number of CT power wire loops is incorrectly set, or wiring is incorrect.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Use a CT with the correct number of turns for the display range.</li> <li>Reset the number of CT turns.</li> <li>Reset the number of CT power wire loops.</li> <li>Check the wiring.</li> </ul>
AL70	A/D conversion error	Defective A/D converter	Replace unit.
AL95	Parameter error	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power turned OFF during fixing of data</li> <li>Data corrupted due to noise, etc.</li> </ul>	Reset data or replace unit.
A 96	Adjustment data error	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power turned OFF during fixing of data</li> <li>Data corrupted due to noise, etc.</li> </ul>	Reset data or replace unit.
AL97	Parameter error (RAM area)	Data corrupted due to noise, etc.	Replace unit.
AL98	Adjustment data error (RAM area)	Data corrupted due to noise, etc.	Replace unit.
AL99	ROM error	Data corrupted due to noise, etc.	Replace unit.

## Maintenance

Cleaning: When wiping out the SDC15, use the soft and dried cloth.  
 Parts replacement: Do not replace the parts.  
 Fuse replacement: When replacing the fuse for the power supply wires, make sure that the replacement fuse complies with all applicable safety standards.  
 Standard IEC127, Cutoff Speed Delayed operation type (T), Rated Voltage 250V, Rated Current 200mA

## Model selection table

Basic model No.	Mounting	Control output	PV input	Power supply	Optional functions	Additional processing	Specifications
C15							
(Note 4)	T						Panel mount type
	S						Socket mount type
(Note 2)	R0						Control output 1 Control output 2
	V0						Relay contact output None
(Note 1)	VC						Voltage pulse output (for SSR drive) None
(Note 1)	VV						Voltage pulse output (for SSR drive) Current output
(Note 1)	CV						Voltage pulse output (for SSR drive) Voltage pulse output (for SSR drive)
(Note 1)	CC						Current output None
							Current output Current output
	T						Thermocouple input (K, J, E, T, R, S, B, N, PL11, WRcS-26, DIN U, DIN L)
	R						RTD input (Pt100/JPT 100)
	L						DC voltage /DC current input (0 to 1Vdc, 1 to 5Vdc, 0 to 5Vdc, 0 to 10Vdc, 0 to 20mA, 4 to 20mA/Adc)
	A						AC Model (100 to 240Vac)
	D						DC Model (24Vac, 24 to 48Vdc)
						00	None
						01	Event relay output: 3 points
(Note 1, 3)						02	Event relay output: 3 points Current transformer input: 2 points Digital input: 2 points
(Note 1, 3)						03	Event relay output: 3 points Current transformer input: 2 points RS-485 communication
(Note 5)						04	Event relay output: 2 points (independent contact)
(Note 1, 3, 5)						05	Event relay output: 2 points (independent contact) Current transformer input: 2 points (independent contact) Digital input: 2 points
(Note 1, 3, 5)						08	Event relay output: 2 points (independent contact) Current transformer input: 2 points RS-485 communication
						00	No additional processing
						D0	Inspection Certificate provided
						Y0	Complying with the traceability certification

- Note 1. Can not be selected for the C15S.  
 Note 2. Only 1a contact applicable for the C15S  
 Note 3. Current transformer socket separate y  
 Note 4. Socket sold separately y  
 Note 5. Can not be selected for the DC model.

## Specifications

- PV Input**  
 Thermocouple: K,J,E,T,R,S,B,N (JIS C1602-1995)  
 PL II (Engelhard Industries Data (ITS90))  
 WRcS-26 (ASTM E988-96(Reapproved 2002))  
 DIN U,DIN L (DIN 43710-1985)
- Resistance temperature detector (RTD): Pt100 (JIS C1604-1997)  
 JPt100 (JIS C1604-1989)  
 0 to 1V, 1 to 5V, 0 to 5V, 0 to 10V  
 0 to 20mA, 4 to 20mA
- DC voltage: 0 to 1V, 1 to 5V, 0 to 5V, 0 to 10V  
 DC current: 0 to 20mA, 4 to 20mA
- Sampling cycle: 500ms  
 Accuracy:  $\pm 0.5\%$ FS  $\pm 1$ digit,  
 $\pm 1\%$ FS  $\pm 1$ digit for a negative area of the thermocouple (at ambient temperature 23 $\pm 2$ °C)
- Digital input**  
 Input type: Dry contact or open collector  
 Allowable ON contact resistance: Max.250 $\Omega$   
 Allowable OFF contact resistance: Min.100k $\Omega$   
 Allowable ON voltage: Max.1.0V  
 Terminal current (ON): Approx.7.5mA in case of short circuit  
 Approx.5.0mA in case of contact resistance 250 $\Omega$
- Minimum hold time: 1s or more
- Current transformer input**  
 Number of input points: 2 points  
 Input object: Current transformer with 100 to 4,000 turns (availability is by 100-turn units)  
 Optional unit Model No.: QN206A (800 turns, hole diameter: 5.8 mm)  
 Optional unit Model No.: QN212A (800 turns, hole diameter: 12mm)

- Transport conditions  
 Ambient temperature: -20 to +70°C  
 Ambient humidity: 10 to 95%RH (non-condensing)
- Other specifications  
 Degrees of protection: Case front side IP66 /NEMA 4 equivalent (Only for stand-alone mounting on a panel when an attached gasket is used.)  
 Power consumption: AC Model  
 Max. 12VA (100Vac:8VA, 264Vac:12VA)  
 (6VA for 100Vac and 9VA for 264Vac to our company SDC10 equivalent function)  
 DC Model  
 Max. 7VA (24Vac)  
 Max. 5W (24 to 48Vdc)  
 Max. 20ms (AC model)  
 No power failure allowed (DC model)
- Non-detected power failure time: Max. 2000m  
 Altitude: Approx.150g (with mounting bracket) at panel mount type  
 Mass: Approx.200g (with socket) at socket mount type
- Terminal screw tightening torque: 0.4 to 0.6N·m  
 Applicable standards: EN61010-1, EN61326  
 Over-voltage category: Category II (IEC60364-4-443, IEC60664-1)  
 Allowable pollution degree: Pollution degree 2

## Accessories and optional parts

Name	Model No.
Mounting bracket (for C15T)	81446403-001 (Accessory)
Gasket	81409657-001 (Accessory)
Current transformer	QN206A (5.8mm hole dia.) QN212A (12mm hole dia.)
Socket (for C15S)	81446391-001
Hard cover	81446442-001
Soft cover	81446443-001
Terminal cover	81446898-001

- Current measurement lower limit: 0.4Aac (800 turns, 1 time)  
 Formula; Number of turns  $\div$  (2000 x number of power wire loops)
- Current measurement upper limit: 50.0Aac (800 turns, 1 time)

- PV Input range setup**  
 In the setup setting display mode [CO1], press the [ $\leftarrow$ ]·[V]·[A] key to set the lower display to select a desired PV range type.  
 >> When no keys are pressed for 2 sec. or longer, the flashing of the numeric value is stopped to set the currently displayed value.

User level details 0: Display in basic / standard / high function,  
1: Display in standard / high function,  
2: Display in high function.  
Initial value may vary depending on model No.

[List of Setup Setting Displays]

[List of Operation Displays]

■ Operation Displays

Display	Item	Contents	Initial value	User level
Upper display: PV Lower display: SP	SP (Target value)	SP low limit (C07) to SP high limit (C08)	0	0
↳P-1 Lower display: LSP	LSP No. (1st digit: Value at the right end digit)	1 to LSP system group (C30 Max. 4)	1	0
oV	MV (Manipulated Variable)	-10.0 to +110.0% Setting is disabled in AUTO mode. (Numeric value does not flash). Setting is enabled in MANUAL mode. (Numeric value flashes.)	-	0
HEAT	Heat MV (Manipulated Variable)	Setting is disabled -10.0 to +110.0%	-	0
Cool	Cool MV (Manipulated Variable)	Setting is disabled -10.0 to +110.0%	-	0
Upper display: PV Lower display: example	AT progress display (1st digit example)	Setting is disabled. Except for 0. During execution of AT = Numeric value at right end digit 0: Completion of AT	-	0
↳E-1	CT (Current transformer) current value 1	Setting is disabled.	-	0
↳E-2	CT (Current transformer) current value 2	Setting is disabled.	-	0
↳E-3	Internal event 1 main setting	Setting range is different depending on the internal event operation type. -199.9 to +999.9; Except below. 0 to 9999.0; When the setting value is an absolute value -199.9 to +999.9%; For MV.	0	0
↳E-3b	Internal event 1 sub-setting	Setting is disabled. Upper display: The distinction by ON delay or OFF delay is displayed at the side location of [1-]. Lower display: Displayed by the unit (either one of 0.1s, s, or min) based on the internal event 1 delay time unit (E1, the 3rd digit of C3).	0	0
↳E-...	Timer remaining time 1	Setting is disabled. Upper display: The distinction by ON delay or OFF delay is displayed at the side location of [1-]. Lower display: Displayed by the unit (either one of 0.1s, s, or min) based on the internal event 1 delay time unit (E1, the 3rd digit of C3).	-	0
↳E-2	Internal event 2 main setting	Setting range is different depending on the internal event operation type. -199.9 to +999.9; Except below. 0 to 9999.0; When the setting value is an absolute value. -199.9 to +999.9%; For MV.	0	0
↳E-2b	Internal event 2 sub-setting	Setting is disabled. Upper display: The distinction by ON delay or OFF delay is displayed at the side location of [2-]. Lower display: Displayed by the unit (either one of 0.1s, s, or min) based on the internal event 2 delay time unit (E2, the 3rd digit of C3).	0	0
↳E-...	Timer remaining time 2	Setting is disabled. Upper display: The distinction by ON delay or OFF delay is displayed at the side location of [2-]. Lower display: Displayed by the unit (either one of 0.1s, s, or min) based on the internal event 2 delay time unit (E2, the 3rd digit of C3).	-	0
↳E-3	Internal event 3 main setting	Setting range is different depending on the internal event operation type. -199.9 to +999.9; Except below. 0 to 9999.0; When the setting value is an absolute value. -199.9 to +999.9%; For MV.	0	0
↳E-3b	Internal event 3 sub-setting	Setting is disabled. Upper display: The distinction by ON delay or OFF delay is displayed at the side location of [3-]. Lower display: Displayed by the unit (either one of 0.1s, s, or min) based on the internal event 3 delay time unit (E3, the 3rd digit of C3).	-	0

[List of Parameter Setting Displays]

■ Mode bank

Bank selection:  $\tilde{m}o\tilde{d}$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳-A	AUTO/MANUAL mode selection	↳A: AUTO mode ↳M: MANUAL mode	AUTO	0
↳-R	RUN/READY mode selection	↳R: RUN mode ↳Y: READY mode	RUN	0
↳-S	AT Stop/Start selection	↳S: AT Stop ↳n: AT Start	AT Stop	0
↳o,↳t	Release all DO latches	↳o,↳n: Latch continue ↳t,↳f: Latch release	Latch continue	0
↳,↳-1	Communication DI 1	↳o,↳f: OFF ↳t,↳n: ON	OFF	0

■ SP bank

Bank selection:  $\tilde{S}P$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳P-1 to ↳P-4	SP of LSP1 group to LSP4 group	SP low limit (C07) to SP high limit (C08)	0	0

■ Event bank

Bank selection:  $\tilde{E}$

■ PID bank

Bank selection:  $\tilde{P}i\tilde{d}$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳P-1	Proportional band	0.1 to 999.9%	5.0	0
↳I-1	Integration time	0 to 9999s (0: No integral control action)	120	0
↳D-1	Derivative time	0 to 9999s (0: No derivative control action)	30	0
↳R-1	Manual reset	-10.0 to +110.0%	50.0	0
↳L-1	MV low limit	-10.0 to +110.0%	0.0	1
↳H-1	MV high limit	-10.0 to +110.0%	100.0	1
↳P-1C	Cool-side proportional band	0.1 to 999.9%	5.0	0
↳I-1C	Cool-side integration time	0 to 9999s (0: No integral control action)	120	0
↳D-1C	Cool-side derivative time	0 to 9999s (0: No derivative control action)	30	0
↳L-1C	Cool-side MV low limit	-10.0 to +110.0%	0.0	1
↳H-1C	Cool-side MV high limit	-10.0 to +110.0%	100.0	1

■ Parameter bank

Bank selection:  $\tilde{P}a\tilde{r}$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳C-1	Control method	0: ON/OFF control 1: PID fixed 2: ST (Self turning)	0 or 1	0
↳E,↳t	MV low limit at AT	-10.0 to +110.0%	0.0	0
↳E,↳H	MV high limit at AT	-10.0 to +110.0%	100.0	0
↳DFF	ON/OFF control differential	0 to 9999.0	5	0
↳FFS	ON/OFF control operating point differential	-199.9 to 9999.0	0	2
↳F	PV filter	0.0 to 120.0s	0.0	0
↳R	PV ratio	0.001 to 9.999	1.000	1
↳b	PV bias	-199.9 to +9999.0	0	0
↳SU	Time proportional cycle unit	0: 1s unit 1: 0.5s fixed (Cycle time is disabled) 2: 0.2s fixed (Cycle time is disabled) 3: 0.1s fixed (Cycle time is disabled)	0	2
↳C1	Time proportional cycle 1	5 to 120s (The output includes the relay output.) 1 to 120s (The output does not include the relay output.)	10 or 2	0
↳C2	Time proportional cycle unit 2	0: 1s unit 1: 0.5s fixed (Cycle time is disabled) 2: 0.2s fixed (Cycle time is disabled) 3: 0.1s fixed (Cycle time is disabled)	0	2
↳C2	Time proportional cycle 2	5 to 120s (The output includes the relay output.) 1 to 120s (The output does not include the relay output.)	10 or 2	0
↳P,↳S	Time proportional operation type	0: Controllable aiming type 1: Actuator life aiming type (Only one ON/OFF operation within time proportional cycle time)	0 or 1	2
↳PU	SP ramp-up	0.0 to 999.9U (0.0: No ramp)	0.0	2
↳PD	SP ramp-down	0.0 to 999.9U (0.0: No ramp)	0.0	2

■ Extension tuning bank

Bank selection:  $\tilde{E}t$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳E,↳S	AT type	0: Normal (Standard control characteristics) 1: Immediate response (Control characteristics immediately responding to the external disturbance.) 2: Stable (Control characteristics with less up/down function of PV)	1	0
↳F,↳d	Just-FITTER setting band	0.00 to 10.00	0.30	2
↳P,↳S	SP lag constant	0.0 to 999.9	0.0	2
↳P-1	Proportional band tuning factor at AT	0.00 to 99.99	1.00	2
↳I-1	Integration time tuning factor at AT	0.00 to 99.99	1.00	2
↳D-1	Derivative time tuning factor at AT	0.00 to 99.99	1.00	2
↳C,↳-R	Control algorithm	0: PID (conventional PID) 1: Pa-PID (high performance type)	0	1
↳F,↳o	Just-FITTER overshoot suppression factor	0 to 100	0	1
↳S,↳R	ST step execution resolution width	0.00 to 99.99%	10.00	2
↳S,↳S	ST step settling bound	0.00 to 10.00%	0.50	2
↳S,↳H	ST hunting settling bound	0.00 to 10.00%	1.00	2
↳S,↳D	ST step ramp change	0: ST is executed when the PV ramp up or down. 1: ST is executed only when the PV ramp up.	0	1

■ Setup bank

Bank selection:  $\tilde{S}E\tilde{U}P$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳C-1	PV input range type	Thermocouple (T): 1 to 6, 9 to 11, 13 to 21, 24, 25 RTD (R): 41 to 46, 51 to 54, 63, 64, 67, 68 DC current/voltage (L): 84, 86 to 90	1 41 88	0
↳C-2	Temperature unit	0: Centigrade (°C) 1: Fahrenheit (°F)	0	0
↳C-3	Cold junction compensation	0: Cold junction compensation is performed. (Internal) 1: Cold junction compensation is not performed. (External)	0	2
↳C-4	Decimal point position	0: No decimal point 1: One digit below decimal point 2: Two digits below decimal point 3: Three digits below decimal point (Select '0' or '1' for the RTD range with decimal point)	0	0
↳C-5	PV range low limit	When the PV input range type is thermocouple (T) or RTD (R), the setting is disabled although range low limit is displayed. -199.9 to +9999U when the PV input range type is DC voltage/current (L).	-	0
↳C-6	PV range high	When the PV input range type is thermocouple (T) or RTD (R), the setting is disabled although range high limit is displayed. -199.9 to +9999U when the PV input range type is DC voltage/current (L).	-	0
↳C-7	SP low limit	PV input range low limit to PV input range high limit	0	1
↳C-8	SP high limit	SP high limit	1000	1
↳C-9	Square root extraction dropout	0.0 to 100.0% (0.0: No square root extraction)	0.0	2
↳C-14	Control action	0: Heat control (reverse action) 1: Cool control (direct action)	0	0
↳C-15	Selection of MV at PV alarm occurrence	0: Control operation is continued. 1: MV at PV alarm occurrence is outputted.	0	2
↳C-16	MV at PV alarm occurrence	-10.0 to +110.0%	0.0	2
↳C-17	MV at READY (at heat-side for heat/cool control)	-10.0 to +110.0%	0.0	1
↳C-18	MV at READY (at cool-side)	-10.0 to +110.0%	0.0	1
↳C-19	Operation at MANUAL change	0: Bump-less 1: Preset	0	1
↳C-20	Preset MANUAL value	-10.0 to +110.0% Dead even at MANUAL mode when power is ON.)	0.0 or 50.0	1
↳C-21	PID operation initialization function selection	0: Automatic 1: Not initialized 2: Initialized (when SP value different from current value is inputted.)	0	2
↳C-22	PID operation initial MV	-10.0 to +110.0%	0.0 or 50.0	2
↳C-26	Heat/cool control	0: Disabled 1: Enabled	0	0
↳C-27	Heat/cool selection	0: Normal 1: Energy saving	0	1
↳C-28	Dead zone	-100.0 to +100.0%	0.0	0
↳C-29	Heat/cool control selection point	-10.0 to +110.0%	50.0	2
↳C-30	LSP setting system	1 to 4	1	0
↳C-32	SP ramp unit	0: 0.1 U/s 1: 0.1 U/min 2: 0.1 U/h	1	2
↳C-36	CT1 operation type	0: Heater burnout detection 1: Current value measurement	0	0
↳C-37	CT1 output	0: Control output 1 1: Control output 2 2: Event output 1 3: Event output 2 4: Event output 3	0	0
↳C-38	CT1 measurement wait time	30 to 300ms	30	0
↳C-39	CT2 operation type	Same as CT1.	0	0
↳C-40	CT2 output	0 to 0	0	0
↳C-41	CT2 measurement wait time	30 to 300	30	0
↳C-42	Control output 1 range	1: 4 to 2mA 2: 0 to 20mA	1	0
↳C-43	Control output 1 type	0: MV 1: Heat MV 2: Cool MV 3: PV 4: PV before ratio bias filter 5: SP 6: Deviation (PV-SP) 7: CT1 current value 8: CT2 current value 9: Invalid 10: SP+MV 11: PV+MV	0	0
↳C-44	Control output 1 scaling low limit	-199.9 to +9999 (The decimal point position and unit may vary depending on the control output 1 type.)	0.0	0
↳C-45	Control output 1 scaling high limit	0 to 9999 (The decimal point position and unit are same as for PV.)	200.0	0
↳C-47	Control output 2 range	Same as control output 1.	1	0
↳C-48	Control output 2 type	0 to 0	3	0
↳C-49	Control output 2 scaling low limit	-199.9 to +9999 (The decimal point position and unit may vary depending on the control output 2 type.)	0	0
↳C-50	Control output 2 scaling high limit	0 to 9999 (The decimal point position and unit are same as for PV.)	200.0	0

Display	Item	Contents	Initial value	User level
↳C-44	CPL/MODBUS	0: CPL 1: MODBUS ASCII format 2: MODBUS RTU format	0	0
↳C-45	Station address	0 to 127 Communication is disabled when '0' is set.	0	0
↳C-46	Transmission speed	0: 4800bps 1: 9600bps 2: 19200bps 3: 38400bps	2	0
↳C-47	Data format (data length)	0: 7bits 1: 8bits	1	0
↳C-48	Data format (parity)	0: Even parity 1: Odd parity 2: No parity	0	0
↳C-49	Data format (stop bits)	0: 1bit 1: 2bits	0	0
↳C-50	Communication minimum response time	1 to 250ms	3	2
↳C-71	Key operation mode/type	0: Standard type 1: Special type	0	2
↳C-72	MODE key function	0: Invalid 1: AUTO/MANUAL selection 2: RUN/READY selection 3: AT Stop/Start 4: LSP group selection 5: Release of all DO latches 6: Invalid 7: Communication DI selection 8: Invalid	1	0
↳C-73	MODE display setup	Whether the mode bank setup display is enabled or disabled is determined by the sum of the following weighting: Bit 0: AUTO/MANUAL display 0: Disabled, +1: Enabled Bit 1: RUN/READY display 0: Disabled, +2: Enabled Bit 3: AT stop/start display 0: Disabled, +8: Enabled Bit 4: DO latch release 0: Disabled, +16: Enabled Bit 5: Communication DI ON/OFF display 0: Disabled, +32: Enabled Other invalid setup: 0, +4, +64, +128	255	1
↳C-74	PV/SP value display setup	Whether the basic display is enabled or disabled is determined by the sum of the following weighting: Bit 0: PV display 0: Disabled, +1: Enabled Bit 1: SP display 0: Disabled, +2: Enabled Bit 2: LSP group No. display 0: Disabled, +4: Enabled Other invalid setup: 0, +8	15	1
↳C-75	MV display setup	Whether the basic display is enabled or disabled is determined by the sum of the following weighting: Bit 0: MV display 0: Disabled, +1: Enabled Bit 1: Heat MV/cool MV display 0: Disabled, +2: Enabled Bit 3: AT progress display 0: Disabled, +8: Enabled Other invalid setup: 0, +4	15	1
↳C-76	Event setting value display setup	0: In the operation display mode, the internal event setting value is not displayed. 1: In the operation display mode, the internal event 1 setting value is displayed. 2: In the operation display mode, the internal event 1 to 2 setting value is displayed. 3: In the operation display mode, the internal event 1 to 3 setting value is displayed.	0	1
↳C-77	Event remaining time display setup	0: In the operation display mode, the ON/OFF delay remaining time of the internal event is not displayed. 1: In the operation display mode, the ON/OFF delay remaining time of the internal event 1 is displayed. 2: In the operation display mode, the ON/OFF delay remaining time of the internal event 1 to 2 is displayed. 3: In the operation display mode, the ON/OFF delay remaining time of the internal event 1 to 3 is displayed.	0	1
↳C-78	CT input current value display setup	0: In the operation display mode, the CT current value is not displayed. 1: In the operation display mode, the CT1 current value is displayed. 2: In the operation display mode, the CT1 to 2 current value is displayed.	0	1
↳C-79	User level	0: Basic configuration 1: Standard configuration 2: High function configuration	0	0
↳C-80	LED monitor	0: Disabled 1: Flashing at RS-485 communication signal transmission 2: Flashing at RS-485 communication signal receiving 3: OR (logical sum) of all DI status 4: Flashing at READY	0	2
↳C-81	Number of CT1 turns	0: 800 turns 1 to 40: CT turns decided by 100.	8	2
↳C-82	Number of CT1 power wire loops	0: 1 time 1 to 6: Number of times	1	2
↳C-83	Number of CT2 turns	0: 800 turns 1 to 40: CT turns decided by 100.	8	2
↳C-84	Number of CT2 power wire loops	0: 1 time 1 to 6: Number of times	1	2

■ Event assignment bank

Bank selection:  $E_{uCF}$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$E_{1,C1}$ to $E_{5,C1}$	Operation type of internal event 1 to 5 configuration 1	0: No event 1: PV high limit 2: PV low limit 3: PV high/low limit 4: Deviation high limit 5: Deviation low limit 6: Deviation high/low limit 7: Deviation high limit (Final SP reference) 8: Deviation low limit (Final SP reference) 9: Deviation high/low limit (Final SP reference) 10: SP high limit 11: SP low limit 12: SP high/low limit 13: MV high limit 14: MV low limit 15: MV high/low limit 16: CT1 heater burnout/over-current 17: CT2 heater short-circuit 18: CT2 heater burnout/over-current 19: CT2 heater short-circuit 20: Loop diagnosis 1 21: Loop diagnosis 2 22: Loop diagnosis 3 23: Alarm (status) 24: READY (status) 25: MANUAL (status) 26: Invalid 27: During AT execution (status) 28: During SP ramp (status) 29: Control direct action (status) 30: ST execution (status) 31: Invalid 32: Timer (status) 33: High and low limits of MFB value (Invalid in this unit)	0	0
$E_{1,C2}$ to $E_{5,C2}$	Internal event 1 to 5 Configuration 2	Digits are called as 1st digit, 2nd digit, 3rd digit and 4th digit from the right end digit. 0: Direct 1: Reverse 2: None 1: Standby 2: Standby + Standby at SP change 0: Continue 1: Forced OFF	0000	0
$E_{1,C3}$ to $E_{5,C3}$	Internal event 1 to 5 Configuration 3	Digits are called as 1st digit, 2nd digit, 3rd digit and 4th digit from the right end digit. 0: No event 1: Alarm direct + OR operation 2: Alarm direct + AND operation 3: Alarm reverse + OR operation 4: Alarm reverse + AND operation 0: As normal execution 1: Event OFF at the event setting via ue (main)=0 0: 0.1s 1: 1s 2: 1min 0	0000	2
	1st digit: Alarm OK		0	
	2nd digit: Special OFF		0	
	3rd digit: Delay time unit		0	
	4th digit: Undefined		0	

■ DI assignment bank

Bank selection:  $d'$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$d'1,1$ to $d'3,1$	Internal contact 1 to 3 Operation type	0: No function 1: LSP group selection (0/+1) 2: LSP group selection (0/+2) 3: LSP group selection (0/+4) 4: Invalid 5: Invalid 6: Invalid 7: RUN/READY selection 8: AUTO/MANUAL selection 9: Invalid 10: AT Stop/Start 11: ST Disabled/Enabled 12: Control action direct/reverse selection (As per setting/opposite operation of setting) 13: SP ramp Enabled/Disabled 14: PV hold (No-hold/Hold) 15: PV maximum value hold (No-hold/Hold) 16: PV minimum value hold (No-hold/Hold) 17: Timer Stop/Start 18: Release of all DO latches (Continue/Release) 19: Invalid 20: Invalid	0	0
$d'1,2$ to $d'3,2$	Internal contact 1 to 3 Input bit operation	0: Disabled. (Input of default) 1: Function 1 (A and B) or (C and D) 2: Function 2 (A or B) and (C or D) 3: Function 3 (A or B or C or D) 4: Function 4 (A and B and C and D)	0	2

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$d'1,3$ to $d'3,3$	Internal contact 1 to 3 Input assignment A	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: DI1 3: DI2 4 to 9: Undefined 10: Internal event 1 11: Internal event 2 12: Internal event 3 13: Internal event 4 14: Internal event 5 15 to 17: Undefined 18: Communication DI1 19: Communication DI2 20: Communication DI3 21: Communication DI4 22: MANUAL mode 23: READY mode 24: Undefined 25: During AT execution 26: During SP ramp 27: Undefined	2 to 4	2
$d'1,4$ to $d'3,4$	Internal contact 1 to 3 Input assignment B	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: DI1 3: DI2 4 to 9: Undefined 10: Internal event 1 11: Internal event 2 12: Internal event 3 13: Internal event 4 14: Internal event 5 15 to 17: Undefined 18: Communication DI1 19: Communication DI2 20: Communication DI3 21: Communication DI4 22: MANUAL mode 23: READY mode 24: Undefined 25: During AT execution 26: During SP ramp 27: Undefined	0	2
$d'1,5$ to $d'3,5$	Internal contact 1 to 3 Input assignment C	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: DI1 3: DI2 4 to 9: Undefined 10: Internal event 1 11: Internal event 2 12: Internal event 3 13: Internal event 4 14: Internal event 5 15 to 17: Undefined 18: Communication DI1 19: Communication DI2 20: Communication DI3 21: Communication DI4 22: MANUAL mode 23: READY mode 24: Undefined 25: During AT execution 26: During SP ramp 27: Undefined	0	2
$d'1,6$ to $d'3,6$	Internal contact 1 to 3 Input assignment D	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: DI1 3: DI2 4 to 9: Undefined 10: Internal event 1 11: Internal event 2 12: Internal event 3 13: Internal event 4 14: Internal event 5 15 to 17: Undefined 18: Communication DI1 19: Communication DI2 20: Communication DI3 21: Communication DI4 22: MANUAL mode 23: READY mode 24: Undefined 25: During AT execution 26: During SP ramp 27: Undefined	0	2
$d'1,7$ to $d'3,7$	Internal contact 1 to 3 Polarity A to D	Digits are called as 1st digit, 2nd digit, 3rd digit and 4th digit from the right end digit. 0: Direct 1: Reverse	0000	2
$d'1,8$ to $d'3,8$	Internal contact 1 to 3 Polarity	0: Direct 1: Reverse	0	2
$d'1,9$ to $d'3,9$	Internal contact 1 to 3 Internal event No. assignment	0: Direct 1: Reverse 0: Easy internal event 1 to 5: Internal event numbers	0	2

■ DO assignment bank

Bank selection:  $d'o$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$d'o1,1$ to $d'o3,1$	Control output 1 to 3 operation type	0: Input of default 1: MV1 (ON/OFF) control output, time proportional output/heat-side proportional output of heat/cool control 2: MV2 (cool-side proportional output of heat/cool control) 3: Function 1 (A and B) or (C and D) 4: Function 2 (A or B) and (C or D) 5: Function 3 (A or B or C or D) 6: Function 4 (A and B and C and D)	0	2
$d'o1,2$ to $d'o3,2$	Control output 1 to 3 output assignment A	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: Internal event 1 3: Internal event 2 4: Internal event 3 5: Internal event 4 6: Internal event 5 7 to 13: Undefined 14: MV1 15: MV2 16 to 17: Undefined 18: DI1 19: DI2 20 to 25: Undefined 26: Internal contact 1 27: Internal contact 2 28: Internal contact 3 29 to 33: Undefined	14 to 15 or 2 to 4	2
$d'o1,3$ to $d'o3,3$	Control output 1 to 3 output assignment B	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: Internal event 1 3: Internal event 2 4: Internal event 3 5: Internal event 4 6: Internal event 5 7 to 13: Undefined 14: MV1 15: MV2 16 to 17: Undefined 18: DI1 19: DI2 20 to 25: Undefined 26: Internal contact 1 27: Internal contact 2 28: Internal contact 3 29 to 33: Undefined	0	2
$d'o1,4$ to $d'o3,4$	Control output 1 to 3 output assignment C	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: Internal event 1 3: Internal event 2 4: Internal event 3 5: Internal event 4 6: Internal event 5 7 to 13: Undefined 14: MV1 15: MV2 16 to 17: Undefined 18: DI1 19: DI2 20 to 25: Undefined 26: Internal contact 1 27: Internal contact 2 28: Internal contact 3 29 to 33: Undefined	0	2
$d'o1,5$ to $d'o3,5$	Control output 1 to 3 output assignment D	0: Normally open (OFF, 0) 1: Normally close (ON, 1) 2: Internal event 1 3: Internal event 2 4: Internal event 3 5: Internal event 4 6: Internal event 5 7 to 13: Undefined 14: MV1 15: MV2 16 to 17: Undefined 18: DI1 19: DI2 20 to 25: Undefined 26: Internal contact 1 27: Internal contact 2 28: Internal contact 3 29 to 33: Undefined	0	2

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$d'o1,6$ to $d'o3,6$	Control output 1 to 2, event output 1 to 3	Digits are called as 1st digit, 2nd digit, 3rd digit and 4th digit from the right end digit. 0: Direct 1: Reverse	0000	2
$d'o1,7$ to $d'o3,7$	Control output 1 to 2, event output 1 to 3 Polarity	0: Direct 1: Reverse	0	2
$d'o1,8$ to $d'o3,8$	Control output 1 to 2, event output 1 to 3 Latch	0: Disabled 1: Enabled (Latch at ON) 2: Enabled (Latch at OFF, except at the time of initialization after power ON)	0	2

■ User function bank

Bank selection:  $UF$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$UF-1$	User function definition 1	This is the display in upper display. The setup exception is as follows: P- : : Yet to be registered. P- : : Proportional band of the PID group in use d'- : : Derivative time of the PID group in use d'- : : Manual reset of the PID group in use eL- : : MV low limit of the PID group in use eH- : : MV high limit of the PID group in use P- : : Cool-side proportional band of the PID group in use I- : : Cool-side integration time of the PID group in use d'- : : Cool-side derivative time of the PID group in use eL- : : Cool-side MV low limit of the PID group in use eH- : : Cool-side of MV high limit of the PID group in use	----	1
$UF-2$	User function definition 2		----	1
$UF-3$	User function definition 3		----	1
$UF-4$	User function definition 4		----	1
$UF-5$	User function definition 5		----	1
$UF-6$	User function definition 6		----	1
$UF-7$	User function definition 7		----	1
$UF-8$	User function definition 8		----	1

■ Lock bank

Bank selection:  $LoC$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$LoC$	Key lock	0: All settings are enabled. 1: Mode, event, operation display, SP, UF, lock, manual MV, and mode key can be set. 2: Operation display, SP, UF, lock, manual MV, and mode key can be set. 3: UF, ock, manual MV, and mode key can be set.	0	0
$C, LoC$	Communication lock	0: RS-485 communication read/write is enabled. 1: RS-485 communication read/write is disabled.	0	2
$L, LoC$	Loader lock	0: Loader communication read/write is enabled. 1: Loader communication read/write is disabled.	0	2
$PR55$	Password display	0 to 15 5: Password 1A to 2B display	0	0
$PS1A$	Password 1A	0000 to FFFF (hexadecimal value)	0000	0
$PS2A$	Password 2A	0000 to FFFF (hexadecimal value)	0000	0
$PS1B$	Password 1B	0000 to FFFF (hexadecimal value)	0000	0
$PS2B$	Password 2B	0000 to FFFF (hexadecimal value)	0000	0

■ Instrument information bank

Bank selection:  $Id$

Display	Item	Contents	Initial value	User level
$Id01$	ROM ID	0 (hex)	-	2
$Id02$	ROM version 1	XX.XX (2 digits after decimal point)	-	2
$Id03$	ROM version 2	XX.XX (2 digits after decimal point)	-	2
$Id04$	SLP support information		-	2
$Id05$	EST support version		-	2
$Id06$	Manufacturing date code (year)	Year + 2000 Ex.: '3' means the year 2003.	-	2
$Id07$	Manufacturing date code	Month + Day + 100 Ex.: '10201' means the 1st day of December (month, day)	-	2
$Id08$	Serial No.		-	2

azbil

Specifications are subject to change without notice.

Yamatake Corporation  
Advanced Automation Company

1-12-2 Kawana, Fujisawa  
Kanagawa 251-8522 Japan

URL: <http://www.azbil.com>

Printed in Japan.  
1st Edition: Issued in Feb. 2003 (A)  
14th Edition: Issued in Jan. 2008 (A)

Printed on recycled paper. (07)