



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta de un proceso de  
diseño de una mordaza  
implementada en un banco de  
pruebas para el sellado de una  
película multicapa**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Saúl Alejandro Valdez Uribe

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Jorge Enrique Uribe Juárez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

# Agredecimientos

*Agradezco al Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) por permitirme ser parte de este magnífico equipo de colaboradores. Gracias al proyecto PAPIIT IT102318.*

*A mi gran amigo Jorge, por todas las enseñanzas brindadas, por apoyar e inspirar mis propuestas y pensamientos, por la confianza concedida desde el primer día.*

*A mi mamá por su apoyo y consejo invaluable.*

*A Ximena por compartir su vida conmigo y por el maravilloso equipo que hacemos.*

# Abreviaturas

$\beta$	Coeficiente volumétrico de expansión térmica [ $K^{-1}$ ]
$\Delta G$	Energía libre de Gibbs [ $J/mol$ ]
$\Delta H_m$	Entalpía [J]
$\Delta S_m$	Entropía [J]
$\Delta x$	Espesor [mm]
$\nu$	Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]
$A_S$	Área superficial [ $mm^2$ ]
<i>ANSI</i>	American National Standards Institute
<i>BOPP</i>	Polipropileno biorientado
$C_v$	Calor específico [ $J/g^\circ C$ ]
<i>CAD</i>	Computer-Aided Design
<i>CAE</i>	Computer-Aided Engineering
<i>CAM</i>	Computer-Aided Manufacturing
<i>CNC</i>	Computer Numerical Control
<i>DSC</i>	Calorimetría diferencia de barrido
<i>FEA</i>	Finite Element Analysis
$g$	Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]
<i>GCODE</i>	Computer-Aided Design
$Gr$	Número de Grashof [1]
$h$	Coeficiente convectivo [ $W/mm^2^\circ C$ ]
<i>HMI</i>	Human-Machine Interface
$k$	Conductividad térmica del fluido [ $W/mK$ ]
$L_c$	Longitud característica [mm]
$m$	Masa [kg]

$Nu$	Número de Nusselt [1]
$PID$	Proportional-Integral-Derivative control
$PP$	Polipropileno
$Pr$	Número de Prandtl [1]
$PWM$	Pulse Width Modulation
$Q$	Calor[J]
$R$	Resistencia[ $\Omega$ ]
$RPM$	Revoluciones por minuto
$T$	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]
$t$	Tiempo [s]
$T_g$	Temperatura de transición vítrea [ $^{\circ}C$ ]
$T_m$	Temperatura de fusión [ $^{\circ}C$ ]

# Resumen

Usar los datos y observaciones obtenidos mediante métodos numéricos y experimentales para diseñar un elemento de sellado implementado en un banco de pruebas con el fin de replicar y analizar el proceso de sellado de películas multicapa utilizadas en la fabricación de empaques flexibles en los sectores alimentario y así determinar la geometría y el material idóneo para el banco de pruebas. La metodología de investigación se basó en diversas metodologías de diseño, como el diseño mecánico, el diseño centrado en el usuario y el diseño asistido por computadora. Se utilizaron modelos matemáticos para describir el fenómeno de transferencia de calor en las mordazas y con ello, los conceptos propuestos se validan mediante análisis de elementos finitos para posteriormente realizar un proceso de experimentación. La tesis tiene como objetivo contribuir al avance de la ingeniería para la humanidad en la tecnología utilizada en la fabricación de procesos de sellado de películas multicapa. Se discutieron los diferentes métodos de sellado, como el sellado por mordazas calientes, impulso y ultrasónico, así como sus aplicaciones. La tesis también discute los errores durante el proceso de sellado y la importancia de monitorear los sensores de temperatura para lograr un sellado de la más alta calidad. Todo esto con el fin de entender las necesidades de los conceptos solución y lograr plantear las especificaciones y funcionalidades de la mordaza que fue implementada en el banco de pruebas de sellado continuo.

El proceso de diseño de la mordaza utilizada en el banco de pruebas es crucial para cumplir con los objetivos del proyecto. En este proyecto, se utilizó un material cerámico en lugar del aluminio utilizado anteriormente para analizar el proceso de sellado y mejorar la señal de temperatura. El proceso de diseño de la mordaza incluye la selección de materiales, cálculos para la transferencia de calor, diseño de la mordaza y validación numérica. Además, se presentan las especificaciones detalladas de las versiones 1, 2, 3 y 4 de la mordaza. Se utilizó un *software* de manufactura asistida por computadora para simular los pasos y las posiciones de la pieza para su fabricación manual en la máquina fresadora.

El proceso de diseño implementado permitió obtener criterios de selección de material, geometría y configuración de la instrumentación sobre el cuerpo de la mordaza. Se concluyó que el uso de materiales cerámicos en la fabricación de elementos mecánicos, específicamente la cerámica MACOR, es viable y se recomienda su uso en elementos mecánicos que requieran ser maquinados mediante desbaste de viruta y poseer las propiedades de un material cerámico, no obstante en este trabajo de investigación se determinó que el material ideal para la fabricación de mordazas para sellado de películas multicapa son materiales con una transferencia de calor alta, propia de un material metálico. Además, se concluyó que la conductividad térmica de los materiales es la variable más relevante para obtener resultados interpretables.

# Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	IV
Índice general	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	X
Índice de gráficos	XI
Introducción	XII
<b>1 Planteamiento</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	1
1.1.1 Objetivos particulares . . . . .	1
1.2 Hipótesis . . . . .	1
1.3 Estructura de la tesis . . . . .	2
<b>2 Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1 Diseño en ingeniería mecánica. . . . .	3
2.1.1 Transferencia de calor en elementos mecánicos. . . . .	4
2.1.2 Leyes de la termodinámica. . . . .	5
2.1.3 Mecanismos de transferencia de calor. . . . .	5
2.1.4 Diseño enfocado en la transferencia de calor. . . . .	6
2.1.5 Transferencia de calor al sistema. . . . .	7
2.1.6 Variación de la resistencia con la temperatura. . . . .	7
2.1.7 Efecto Joule. . . . .	8
2.1.8 Ley de enfriamiento de Newton. . . . .	8
2.1.9 Modelo de transferencia de calor. . . . .	10
2.1.10 Análisis numérico de la transferencia de calor. . . . .	10
2.2 Polímeros. . . . .	12
2.2.1 Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). . . . .	12
2.2.2 Temperatura de fusión ( $T_m$ ). . . . .	12
2.2.3 Calorimetría diferencia de barrido (DSC). . . . .	13
2.2.4 Películas de polipropileno. . . . .	13
2.2.5 Sostenibilidad de empaques flexibles. . . . .	14
2.3 Tecnologías de sellado. . . . .	16
2.3.1 Tipos de envolvedoras por cartuchos. . . . .	18

2.4	Errores durante el proceso de sellado. . . . .	21
2.4.1	Errores en el equipo de sellado. . . . .	21
2.4.2	Errores sobre empaques flexibles. . . . .	22
2.5	Antecedentes. . . . .	25
2.5.1	Diseño de mordazas en la industria. . . . .	25
2.5.2	Análisis de los resultados de simulaciones térmicas en mordazas de sellado. . . . .	28
2.5.3	Geometría de la huella de sellado. . . . .	31
<b>3</b>	<b>Proceso de diseño</b>	<b>33</b>
3.1	Identificación de oportunidades. . . . .	33
3.2	Planeación del diseño de las siguientes versiones de mordaza. . . . .	34
3.3	Necesidades de diseño. . . . .	35
3.4	Especificaciones de diseño. . . . .	36
3.4.1	Selección del material. . . . .	37
3.4.2	Diseño de ensamble. . . . .	38
3.5	Generación y selección de conceptos de solución. . . . .	41
3.5.1	Diagrama funcional. . . . .	41
3.6	Variables críticas . . . . .	43
3.6.1	Tiempo de permanencia . . . . .	43
3.6.2	Presión . . . . .	44
3.6.3	Temperatura . . . . .	45
3.7	Cálculo del calor implementado en el análisis numérico. . . . .	46
3.7.1	Proceso de cálculo de la transferencia de calor por el método de conducción. . . . .	46
3.8	Configuración del sistema de control. . . . .	50
3.9	Proceso iterativo de versiones de mordaza. . . . .	53
3.9.1	Proceso de diseño de la mordaza v1. . . . .	53
3.9.2	Proceso de diseño de la mordaza v2. . . . .	63
3.9.3	Proceso de diseño de la mordaza v3. . . . .	65
<b>4</b>	<b>Proceso de manufactura</b>	<b>71</b>
4.1	Proceso de manufactura. . . . .	71
4.1.1	Proceso de maquinado por fresado. . . . .	72
4.1.2	Proceso de maquinado mediante Control Numérico por Computadora (CNC). . . . .	72
4.1.3	Herramientas disponibles en el fresado. . . . .	73
4.1.4	Proceso de manufactura implementado en la fabricación de las mordazas v1 y v4. . . . .	75
4.1.5	Operaciones del proceso de maquinado de la mordaza v1. . . . .	76
4.1.6	Operaciones del proceso de maquinado de la mordaza v4. . . . .	80
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>83</b>
5.1	Resultado del proceso de diseño. . . . .	83
5.2	Especificaciones del diseño geométrico. . . . .	85
5.3	Proceso de validación de la mordaza v4. . . . .	86
5.3.1	Validación numérica de la mordaza v4. . . . .	86
5.3.2	Validación experimental de la mordaza v4. . . . .	90

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
<b>6 Conclusiones</b>	<b>96</b>
6.1 Trabajo futuro . . . . .	99
<b>Apéndices</b>	<b>100</b>
<b>A Anexos del marco teórico.</b>	<b>100</b>
A.1 Inercia térmica. . . . .	100
<b>B Anexos del proceso experimental.</b>	<b>102</b>
B.1 Esquema del proceso experimental . . . . .	102
<b>Referencias</b>	<b>104</b>

# Índice de figuras

2.1	Fases del proceso de diseño. . . . .	4
2.2	Mecanismo de transferencia de calor . . . . .	6
2.3	Termograma . . . . .	13
2.4	Ejemplo del uso de empaques flexibles en la estación espacial internacional	15
2.5	Opciones de empaques sustentables [51]. . . . .	15
2.6	Sellado por cartuchos . . . . .	17
2.7	Sellado por inducción. . . . .	17
2.8	Sellado por impulsos. . . . .	18
2.9	Sellado por ultrasonido. . . . .	18
2.10	Sistema de mordazas utilizado envolvedoras horizontales [20]. . . . .	19
2.11	Esquema envolvedoras horizontales [6]. . . . .	20
2.12	Error de sellado sobre película . . . . .	20
2.13	Esquema de envolvedoras verticales [17]. . . . .	21
2.14	Error de sellado sobre película . . . . .	23
2.15	Error de sellado sobre película . . . . .	24
2.16	Error de sellado sobre película . . . . .	24
2.17	Ensamble mordaza de <i>Greener Corporation</i> ®. . . . .	26
2.18	Resultados del análisis térmico de una mordaza de acero inoxidable. . . . .	26
2.19	Resultados del análisis térmico de un mordaza de Dura-Therm. . . . .	27
2.20	Distribución de temperatura en el cuerpo de la mordaza [21]. . . . .	29
2.21	Distribución de temperatura sobre la superficie de sellado [21]. . . . .	29
2.22	Distribución del gradiente de temperatura sobre el cuerpo de la mordaza [21]. . . . .	30
2.23	Perfiles de huella de sellado [43]. . . . .	31
3.1	Mordaza v0 en vista isométrica . . . . .	34
3.2	Modelo ensamblado con porta mordaza. . . . .	39
3.3	Ensamble del subsistema mordaza y porta mordaza (explosionado). . . . .	40
3.4	Funciones y subfunciones del sistema. . . . .	42
3.5	Sensor Láser ZX2-LDA [42]. . . . .	44
3.6	Regulador de presión Festo® MS6-LFR-1/4-D7-ERM-AS. . . . .	45
3.7	Termopar 5SRTC-TT-K-40-36. . . . .	46
3.8	Puesta a punto . . . . .	51
3.9	Funcionamiento del sistema eléctrico y neumático. . . . .	52
3.10	Dimensión en milímetros de la superficie de sellado v1 (vista de planta). . . . .	54
3.11	Especificaciones mordaza v1. . . . .	54
3.12	Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección mordaza v1. . . . .	55

3.13	Distribución del flujo de calor de la mordaza v1. . . . .	56
3.14	Distribución del flujo de calor representado con vectores de la mordaza v1. . . . .	56
3.15	Gradiente de temperatura de la mordaza v1. . . . .	57
3.16	Distribución de temperatura de la mordaza v1. . . . .	58
3.17	Proceso de validación experimental de la mordaza v1. . . . .	59
3.18	Dimensión en milímetros de la superficie de sellado de las mordazas v2 y v3 (vista de planta). . . . .	64
3.19	Especificaciones geométricas mordaza v2. . . . .	64
3.20	Especificaciones geométricas de la mordaza v3. . . . .	66
3.21	Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección de la mordaza v3. . . . .	67
3.22	Distribución del flujo de calor de la mordaza v3. . . . .	67
3.23	Distribución del flujo de calor representado con vectores de la mordaza v3. . . . .	68
3.24	Gradiente de temperatura de la mordaza v3. . . . .	69
3.25	Distribución de temperatura de la mordaza v3. . . . .	69
4.1	Tipos de fresado [23]. . . . .	73
4.2	Esquema del principio de funcionamiento Bloque en “V” . . . . .	75
4.3	Plano de manufactura de la mordaza v1. . . . .	76
4.4	Flujo de trabajo de la mordaza v1. . . . .	78
4.5	Proceso de fresado de la mordaza v1. . . . .	79
4.6	Plano de manufactura de la mordaza v4. . . . .	80
4.7	Resultado del proceso de manufactura mediante CNC [22]. . . . .	81
4.8	Planos de trabajo mordaza v4. . . . .	82
5.1	Línea de tiempo del proceso de diseño de las versiones. . . . .	84
5.2	Especificaciones mordaza v4. . . . .	86
5.3	Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección mordaza v4. . . . .	87
5.4	Distribución del flujo de calor mordaza v4. . . . .	87
5.5	Distribución del flujo de calor con vectores mordaza v4. . . . .	88
5.6	Gradiente de temperatura mordaza v4. . . . .	88
5.7	Distribución de temperatura mordaza v4. . . . .	89
B.1	Esquema del proceso experimental. . . . .	103

# Índice de tablas

2.1	Tecnologías de sellado. . . . .	16
3.1	Relación entre necesidades y métricas . . . . .	36
3.2	Propiedades MACOR [10] . . . . .	37
3.3	Propiedades aluminio 6061 [46] . . . . .	38
3.4	Tabla de datos del alambre de nicromo [25] . . . . .	38
3.5	Descripción tornillería. . . . .	39
3.6	Especificaciones mordazas. . . . .	47
3.7	Calor requerido para elevar la temperatura de la mordaza. . . . .	47
3.8	Cambio de la resistencia del alambre de nicromo. . . . .	47
3.9	Calor generado en la resistencia durante 60[s]. . . . .	48
3.10	Calor transferido por el método de conducción. . . . .	48
3.11	Datos obtenidos del planteamiento del fenómeno de convección. . . . .	49
3.12	Propiedades del aire a 1 atmosfera de presión y 25[°C] [9]. . . . .	50
3.13	Cálculo de números adimensionales. . . . .	50
3.14	Cálculo del calor convectivo. . . . .	51
5.1	Promedio de temperatura registrado por termopares en las gráficas. . . . .	91
5.2	Cambio de temperatura entre la ubicación de los termopares. . . . .	91

# Índice de gráficos

3.1	Comportamiento de la temperatura en la mordaza v1 a 175 [°C]. . . . .	60
3.2	Comportamiento de la temperatura en la mordaza v1 a 175 [°C]. . . . .	61
5.1	Comportamiento temperatura mordaza v4 a 125 [°C]. . . . .	92
5.2	Comportamiento temperatura mordaza v4 a 125 [°C]. . . . .	93
5.3	Comportamiento temperatura mordaza v4 a 150 [°C]. . . . .	94
5.4	Comportamiento temperatura mordaza v4 a 175 [°C]. . . . .	95

# Introducción

Es prioridad mencionar la motivación por la que se escribió esta tesis. Esta investigación se desarrolló con el objetivo general de contribuir al adelanto de la ingeniería para la humanidad, particularmente en la tecnología usada en el proceso de sellado de películas multicapa. Las cuales son ampliamente utilizadas en la fabricación de empaques en el sector alimentario y farmacéutico [37]. El progreso tecnológico en las herramientas desarrolladas posibilitará que la sociedad mejore la eficiencia del proceso de sellado de productos

Este trabajo se enfoca en el diseño de una mordaza implementada en un banco de pruebas, el cual permite simular el método de manufactura de empaques flexibles en su fase de sellado de películas multicapa por el método de cartuchos. Es requerido describir la metodología implementada de la investigación con el fin de justificar las decisiones de diseño y establecer los resultados de la investigación. La mayor parte de esta metodología se desglosó en el capítulo 2 en el que se hace mención al diseño en ingeniería mecánica. Las preguntas de la investigación especificadas en el planteamiento son respondidas a lo largo de los siguientes capítulos.

En esta investigación se propone el proceso de diseño de un elemento mecánico, por lo que se utilizaron diversas metodologías de diseño desde el enfoque de la investigación académica. Las preguntas de la investigación descritas en el planteamiento, son respondidas a lo largo de los siguientes capítulos. Primeramente, es requerido tener un contexto sobre el tema a abordar, para después describir el planteamiento del trabajo de investigación en el primer capítulo.

Se hizo uso del diseño mecánico como eje fundamental de la generación de conceptos y argumentos de diseño. Que dieron como resultado el análisis de la validación de las versiones de diseños propuestos, para así continuar con el proceso iterativo utilizado en el diseño mecánico propuesto en la literatura. En este trabajo de investigación se propone el proceso de diseño de un elemento mecánico, por lo que se utilizaron diversas metodologías de diseño desde el enfoque de la investigación académica.

En la literatura se presenta una definición de diseño en ingeniería mecánica, la describe como el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización [39]. Para esta investigación también se tomaron en cuenta otras metodologías, como fue el diseño de producto centrado en el usuario, de la cual se tomaron principalmente las herramientas del análisis de la interacción del usuario con el concepto a diseñar durante todo su ciclo de vida. Como se describirá con mayor detalle, esta metodología resultó en la implementación de herramientas computacionales [32].

Para lograr transmitir las ideas desde un concepto de diseño, se usa el dibujo mecánico, el cual es clave en el diseño de componentes y sistemas mecánicos, con la principal característica que permite documentar las especificaciones técnicas del producto, en cualquiera de sus fases. El dibujo en ingeniería sigue normas utilizadas en todo el mundo. Estas normas permiten estandarizar las características del dibujo tradicional, así como los dibujos de forma digital [33]. El dibujo asistido por computadora fue implementado para el diseño geométrico, desde la generación de ideas de concepto de solución, pasando por el dibujo de bocetos y obtener como resultado un modelo 3D, para el cual se utilizó el *software SolidWorks*®.

En cualquier metodología de diseño mecánico es requerido validar los conceptos de solución propuestos. Una de las formas para realizar esa fase de validación puede ser mediante análisis numérico, el cual permite obtener resultados aproximados a fenómenos reales en ingeniería. Para este trabajo de investigación se utilizó el análisis por elemento finito. El cual permite realizar análisis numéricos de geometrías complejas, esto se logra al dividir en una serie de áreas o volúmenes al dominio de interés. Estas divisiones se conocen como elementos y pueden tener diferente geometría y tamaño según sea necesario [29].

Debido a que las mordazas presentan un fenómeno de transferencia de calor, en el que existe un flujo de energía calorífica que se trasfiere de una fuente a las mordazas y posteriormente de las mordazas a la película multicapa, se utilizaron modelos matemáticos que describieran este fenómeno. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la transferencia de calor pueden ser resueltas analíticamente de forma sencilla si el flujo de calor y las condiciones de contorno están bien planteados, pero solamente para los problemas más sencillos, como geometrías regulares y simples (rectángulos, esferas, tubos. etc.), para flujos unidireccionales, en estado estable y condiciones de frontera homogéneas [29].

Para el análisis de transferencia de calor de la mordaza fue necesario utilizar el análisis por elemento finito, debido a que posee una geometría compleja debido a los detalles y condiciones de frontera no claramente definidas debido a la superficies geométricas. Se utilizó el software CAE de Hyperworks®), desde su solucionador Optistruc®), el cual permite resolver un conjunto de ecuaciones matriciales mediante técnicas iterativas para cada uno de los nodos de la malla de elementos y así describir el comportamiento térmico del sistema [1].

Existe una metodología que integra perfectamente el CAD, permitiendo avanzar mediante iteraciones de pasos secuenciales del diseño de elementos mecánicos y procesos. Este método es la ingeniería asistida por computadora, la cual se basa en el usos de software para simular el rendimiento y las propiedades del modelo en un fenómeno real. Con la información obtenida se logran tomar decisiones con el objetivo de mejorar el concepto de solución. La metodología incluye la simulación, validación y optimización desde un elemento mecánico hasta un proceso completo [50].

Para completar el proceso de diseño mecánico se requirió manufacturar diferentes elementos mecánicos, las principales piezas para esta investigación fueron las mordazas de sellado, para las cuales se utilizaron las herramientas CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) se utilizó este *software* así como maquinaria controlada por computadora para

automatizar un proceso de fabricación [13].

A diferencia de las herramientas antes mencionadas CAD y CAE, los *softwares* CAM se enfocan en como fabricar el elemento mecánico. Es posible diseñar mediante las herramientas CAD una solución muy elegante, pero lo correcto es pensar en diseñar como manufacturar (sistema CAM, para este trabajo), si es que se tiene como objetivo un producto físico. De lo contrario, se obtendrá un modelo que satisface un concepto de forma virtual, sin la posibilidad de generar prototipos o elementos mecánicos físico [13] .

La principal industria beneficiada por esta investigación son los fabricantes de empaques flexibles, así como la industria alimenticia que debe de empaquetar sus productos para evitar su descomposición. Es importante recordar que las empresas pertenecientes a la industria alimentaria deben preservar sus productos, así como comunicar la información correspondiente a la solicitada por las instituciones correspondientes. Se tienen que anunciar desde diferentes perspectivas, como mercadotecnia, manejo del producto y desde la posición legal la marca también quiere agregar información de contacto, recetas o sugerencias de uso [37].

Los empaques flexibles son los adecuados para afrontar los retos del mercado actual y es la forma de embalaje de más rápido crecimiento [37]. Debido a ello, existen diferentes tecnologías de sellado para su fabricación. La más relevante para esta investigación es el método de sellado por cartuchos. Este método consiste en generar un cambio de fase en la interfaz del contacto entre polímero y polímero empleando mordazas calientes. De esta forma se genera una deformación debido a la presión y temperatura en la interfaz de mordaza y película multicapa, al enfriarse el polímero genera el sellado de los empaques [54].

Sin embargo, existen factores que generan deficiencias durante el proceso de sellado por cartuchos, por lo que son producidos residuos sólidos provenientes del paquete defectuoso y el producto en su interior. Estas deficiencias están relacionados con las máquinas de sellado, particularmente en la interfaz de sellado formada por la mordaza y la película multicapa [54]. Por lo que esta investigación se enfocará en proponer un proceso de diseño para una mordaza de sellado implementada en un banco de pruebas que será utilizado para estudiar las variables críticas de temperatura, presión y tiempo involucradas en el proceso de sellado.

# Capítulo 1

## Planteamiento

En el contexto de esta investigación, se aborda el proceso de diseño de una mordaza de sellado de película multicapa con el propósito de explorar y analizar las principales variables involucradas en el fenómeno de sellado, con el fin de contribuir al conocimiento existente en el diseño mecánico. Los límites de este estudio se enfocan en un diseño geométrico centrado en la transferencia de calor por conducción y la selección del material, excluyendo consideraciones relacionadas con la estructura geométrica y las propiedades estructurales, dado que se trata de una aplicación en un banco de pruebas con un bajo número de ciclos de trabajo.

Se definieron los alcances del proyecto basándose en la obtención de lecturas de temperatura durante el proceso de sellado. Mediante el análisis de datos y la aplicación de técnicas numéricas, se logró determinar la geometría y el material adecuado. Además, se desarrolló el proceso de diseño y manufactura, centrándose en un caso específico dentro de la investigación en ingeniería.

### 1.1 Objetivo

Diseñar, manufacturar y validar mediante un proceso numérico y experimental una mordaza utilizada en la investigación del proceso de sellado térmico de una película multicapa de polipropileno.

#### 1.1.1 Objetivos particulares

- Identificar los principales requerimientos de diseño de una mordaza empleada en el proceso experimental de sellado de una película multicapa.
- Manufacturar los diseños propuestos para ser validados con un método experimental.

### 1.2 Hipótesis

La geometría de la mordaza de sellado será útil para instrumentar y así obtener lecturas válidas de datos de temperatura, presión y tiempo durante el proceso experimental de los parámetros requeridos en la operación de máquinas selladoras por el método de sellado por cartuchos.

## 1.3 Estructura de la tesis

El propósito del capítulo 1 es introducir al lector al tema principal de la tesis, el objetivo, objetivo particulares y la hipótesis planteada. También se encuentra el proceso de escritura del trabajo.

En el capítulo 2 se exponen y describen las investigaciones previas al tema de análisis, así como los conceptos en que se sustenta la investigación. Su finalidad es la de explicar y respaldar la solución que se ha planteado para conseguir los objetivos y solucionar el problema.

El capítulo 3 presenta la metodología empleada para el diseño de la mordaza desde la fase conceptual hasta la validación del modelo, describiendo los análisis térmicos de las diferentes mordazas. Así como las variables principales que fueron registradas por los instrumentos de mediciones y su implementación en el banco de sellado de películas multicapa fabricado. Al final se explican las decisiones tomadas partiendo de los resultados obtenidos después del proceso de validación numérica y experimental.

En el capítulo 4 se explica el método de manufactura implementado y su planeación partiendo de los datos de inicio, así mismo se detalla el flujo de trabajo durante el maquinado de las mordazas manufacturadas. Se muestran las operaciones de maquinado implementadas para obtener la geometría deseada mediante mecanizado por arranque de viruta.

A partir del capítulo anterior, en el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos a partir del trabajo de investigación realizado. Como resultado se presenta el proceso de diseño de la mordaza v4, la cual fue utilizada para proceso experimental, se muestran los resultados de la geometría, simulación térmica y comportamiento de calor durante el proceso de calentamiento.

Por último, en el capítulo 6 se enlistan de forma clara y organizada las conclusiones obtenidas, para las cuales se consideraron los objetivos y resultados del estudio. También se presentan las recomendaciones, limitaciones y trabajo a futuro. Con fines de estructurar este apartado, se logró segmentar las conclusiones en dos grupos, el referente a los criterios de selección de material, y el referente a los criterios de diseño geométrico.

# Capítulo 2

## Marco teórico

Se establece que la teoría constituye la base que sustentará cualquier estudio, experimento o propuesta de desarrollo de un trabajo de investigación, por lo que se planteó un marco teórico en cuyo contenido se encuentra una descripción y formulación del método adoptado durante el proceso y su respaldo conceptual para continuar con los antecedentes, vigencia, proyección futura, aplicabilidad y limitaciones conocidas.

### 2.1 Diseño en ingeniería mecánica.

El diseño en ingeniería mecánica es altamente iterativo, se deben tomar diversas decisiones con poca información, en otras ocasiones con la cantidad adecuada y en algunas otras con exceso de información parcialmente contradictoria [8].

El diseño mecánico hace uso de diversas ramas de ingeniería. Por lo que es necesario tener en cuenta que para diseñar el elemento mecánico más simple se tienen que involucrar una gran cantidad de fenómenos. En el caso específico de una mordaza para el sellado de películas multicapa, se tendrán que estudiar diferentes fenómenos mecánicos para formular un plan con el fin de satisfacer las necesidades del proceso de manufactura y así solucionar un problema en particular el cual será descrito a continuación [8].

Con los objetivos planteados anteriormente y teniendo en mente seguir un proceso de diseño metódico para obtener los resultados óptimos (figura 2.1), se decidió utilizar diversas herramientas de diseño con las cuales se podrán obtener resultados a partir de los cuales se lograron tomar decisiones de diseño.

En el proceso creativo, el reconocimiento de la necesidad surge de la observación y análisis, a menudo vinculado a una inconformidad. Esta etapa puede basarse en conceptos. La definición del problema permite establecer especificaciones concretas para las soluciones. A diferencia de la identificación de necesidades, este paso implica un análisis más detallado, identificando factores clave y estableciendo parámetros específicos. Ambos pasos son esenciales para guiar eficazmente el proceso de diseño. [8].

En el diseño mecánico se utiliza de manera considerable el software de diseño asistido por computadora (CAD), el método de análisis que se integra perfectamente con el CAD es el análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) [7]. La teoría detrás de dicho proceso de validación se describe a continuación.

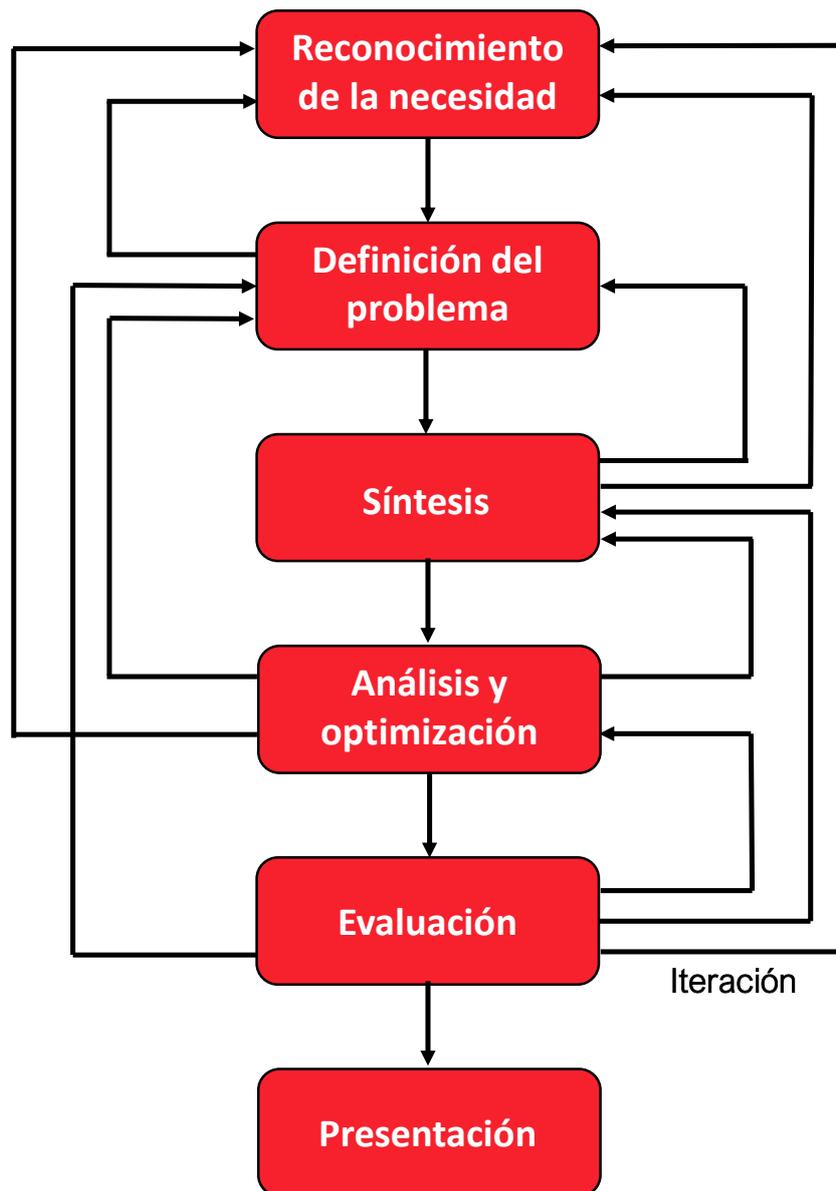


Figura 2.1: Fases de proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones [8].

### 2.1.1 Transferencia de calor en elementos mecánicos.

El calor se define como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro, como resultado de la diferencia de temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de calor tiene dirección y sentido [9].

### 2.1.2 Leyes de la termodinámica.

Las leyes de la termodinámica hacen referencia a los principios fundamentales de la termodinámica, los cuales rigen todos los fenómenos termodinámicos de la naturaleza. Un proceso no puede tener lugar a menos que satisfaga tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica [59].

- **Ley cero de la termodinámica:** “Establece que si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí”. En otras palabras, la energía total de un sistema aislado se mantiene constante [59].
- **Primera ley de la termodinámica (principio de conservación de la energía):** “La energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, solo puede cambiar de forma” [59].
- **Segunda ley de la termodinámica:** “la energía tiene calidad, así como cantidad, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía”. El flujo de calor se dirige de manera natural desde una zona de mayor temperatura hacia una zona de menor temperatura, en un intento por igualar las temperaturas entre las diferentes partes del sistema [59].

### 2.1.3 Mecanismos de transferencia de calor.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. (figura 2.2). Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura [9].

- **Conducción:** Este mecanismo de propagación calor hace referencia al fenómeno de la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas. En gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas. En los sólidos la transferencia se debe a las vibraciones de las moléculas. La rapidez de la conducción de calor a través de un medio depende de su configuración geométrica, y material del que esté hecho, así como los gradientes de temperatura [9].
- **Convección:** Cuando el calor se trasfiere entre un fluido y una superficie sólida se conoce como transferencia de calor por convección. Entre más rápido es el movimiento del fluido, existe mayor transferencia de energía por convección. Cuando no existe movimiento de fluido con respecto a la superficie sólida se conoce como convección libre y la transferencia de calor se realiza por conducción pura [9].
- **Radiación:** A diferencia de los otros mecanismos de transferencia de calor, la radiación no requiere un medio interventor para transferir la energía, ya que este mecanismo es la energía que emiten todos los materiales en forma de onda electromagnética debido a su temperatura. Este es el mecanismo que puede transferir energía con mayor velocidad (a la velocidad de la luz). La radiación térmica se considera un fenómeno superficial para sólidos opacos, como los metales, la madera, las rocas, la radiación incidente sobre estos cuerpos suele absorberse en el orden de micras [9].



Figura 2.2: Mecanismos de transferencia de calor y sus principales variaciones [2].

### 2.1.4 Diseño enfocado en la transferencia de calor.

El diseño enfocado en la transferencia de calor es fundamental en el diseño de elementos mecánicos que como requerimiento de diseño impliquen la transferencia de energía térmica de un lugar a otro. Para diseñar estos sistemas es necesario tomar en cuenta las propiedades térmicas de los materiales, utilizados, las condiciones ambientales y de operación. La eficiencia energética es un factor crítico en el diseño de elementos mecánicos, por lo que se busca maximizar la eficiencia para así disminuir los costos de operación y el impacto ambiental. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos grupos:

- **Capacidad nominal:** consiste en la determinación de la razón de la transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia específica de temperatura.
- **Dimensionamiento:** consiste en la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una razón determinada para una diferencia específica de temperatura [9].

Cada mecanismo de transferencia de calor tendrá sus propias variables para lograr determinar la razón de la transferencia de calor. Una de las variables principales en la transferencia de calor es la conductividad térmica, la cual se define como: “la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura” [9].

Bajo condiciones normales de presión, en todo momento los 3 mecanismos de transferencia de calor se ven involucrados, pero en el momento de diseñar un elemento mecánico enfocándonos en la transferencia de calor, es muy importante identificar cuál de los mecanismos es el más relevante para el fenómeno. En el caso particular del diseño de la mordaza de sellado, el principal mecanismo será la conductividad y la convección térmica. Debido a que para la radiación térmica, el metal y los cerámicos se consideran cuerpos opacos y la fuente de radiación presente en el experimento es despreciable.

### 2.1.5 Tráferencia de calor al sistema.

Se hará uso de la ecuación de balance de energía para un sistema cerrado, es decir, que no existe transferencia de masa hacia dentro o fuera del sistema (mordaza) [9].

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

- $Q$ : La cantidad neta de la transferencia de calor que entra o sale del sistema [ $J$ ].
- $m$ : Masa del sistema [ $g$ ].
- $C_v$ : Calor específico [ $J/g \cdot ^\circ C$ ].
- $\Delta T$ : Cambio de la temperatura [ $^\circ C$ ].

Realizar un balance de energía del sistema será de gran utilidad para tomar decisiones sobre la selección y el diseño de la fuente que transferirá calor a la mordaza de sellado. Ya que permite conocer el flujo de calor que ingresa al sistema bajo las condiciones del experimento.

### 2.1.6 Variación de la resistencia con la temperatura.

La resistividad de un conductor metálico casi siempre aumenta con la temperatura. Esto sucede debido a que tanto los electrones como los iones vibran con mayor amplitud, lo que aumenta la probabilidad de que un electrón libre en movimiento choque, reduciéndose así la corriente eléctrica.

Para los metales y otros materiales es posible expresar la dependencia de la resistencia con respecto a la temperatura por [25]:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.2)$$

- $R_0$ : Resistencia a temperatura  $T_0$  [ $\Omega$ ].
- $R$ : Resistencia a temperatura  $T$  [ $\Omega$ ].
- $\alpha$ : Coeficiente de temperatura de la resistividad [ $^\circ C^{-1}$ ].
- $T_0$ : Temperatura inicial [ $^\circ C$ ].
- $T$ : Temperatura final [ $^\circ C$ ].

De esa forma se podrá diseñar la fuente de calor requerida para el sistema de sellado por mordazas.

### 2.1.7 Efecto Joule.

El efecto Joule sucede cuando pasa una corriente eléctrica en un circuito y este eleva su temperatura, ya que parte de la energía eléctrica se disipa en forma de calor. El físico James Joule concluyó: *"la cantidad de energía calorífica producida por un corriente eléctrica a través de un resistor es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente eléctrica, del tiempo de que esta circula por el resistor y de la resistencia de este"*. El modelo matemático es el siguiente [25]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.3)$$

- $Q$ : Energía calorífica producida por la corriente [J].
- $I$ : Intensidad de la corriente eléctrica [A].
- $R$ : Resistencia del resistor [ $\Omega$ ].
- $t$ : Tiempo [s].

Mediante el efecto Joule se generó la fuente de calor que transferirá la energía al sistema

### 2.1.8 Ley de enfriamiento de Newton.

La tasa de transferencia de calor está dada por la ley de enfriamiento de Newton [45]:

$$Q_{conv} = h \cdot A_S \cdot (T_S - T_\infty) \quad (2.4)$$

- $Q_{conv}$ : Calor transferido mediante convección [W].
- $A_S$ : Área superficial de transferencia de calor [ $mm^2$ ].
- $h$ : Coeficiente convectivo de la transferencia de calor [ $W/mm^2 \cdot ^\circ C$ ].
- $T_S$ : Temperatura media de la superficie de transferencia de calor [ $^\circ C$ ].
- $T_\infty$ : Temperatura media del fluido circulante [ $^\circ C$ ].

#### Obtención del coeficiente convectivo de la transferencia de calor.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor depende de las propiedades del fluido (densidad, calor específico, viscosidad dinámica, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica), propiedades geométricas de la superficie y aspereza, propiedades del flujo como su velocidad, las últimas dos (aspereza y velocidad) en caso de convección forzada. Por lo anterior, el análisis del mecanismo de transferencia de calor mediante convección se vuelve más complejo que el análisis de conducción y radiación [45].

$$h = \frac{k \cdot Nu}{Lc} \quad (2.5)$$

- $h$ : Coeficiente convectivo de la transferencia de calor [ $W/mm^2 \cdot C$ ].
- $k$  : Conductividad térmica del fluido [ $W/m \cdot K$ ].
- $Nu$ : Número de Nusselt [1].
- $Lc$ : longitud característica [mm].

Como se mencionó antes, el coeficiente convectivo depende de varias propiedades del fluido y también de la superficie de contacto. Por lo que se hace uso de diferentes números adimensionales que engloban todos los parámetros, de esta forma se reducen el número de variables de un fenómeno para poder escalarlo posteriormente a situaciones similares. es decir a otras dimensiones, fluidos o velocidades [45].

A continuación se presentan los números y sus variables involucradas en el mecanismo de transferencia de calor mediante convección natural.

### Número de Grashof.

Es la relación entre las fuerzas de empuje y las fuerzas inerciales. Esta cantidad adimensional representa los efectos de la convección natural [9].

$$Gr = \frac{\text{fuerzas de empuje}}{\text{fuerza de inercia}} = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} \quad (2.6)$$

- $g$ : Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].
- $\beta$  : Coeficiente volumétrico de expansión térmica [ $K^{-1}$ ].
- $Lc$ : Longitud característica [mm].
- $T_s$ : Temperatura media de la superficie de transferencia de calor [ $^{\circ}C$ ].
- $T_\infty$ : Temperatura media del fluido circulante [ $^{\circ}C$ ].
- $\nu$ : Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ] [45].

### Número de Prandtl.

El número de Prandtl correlaciona la viscosidad de un fluido con la conductividad térmica del mismo. Por lo que evalúa la relación ente el trasporte de cantidad de movimiento y la capacidad de trasporte térmico de un fluido [34] [45].

$$Pr = \frac{\text{difusividad de momentum}}{\text{difusividad de calor}} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (2.7)$$

- $C_p$ : Calor específico [ $kJ/kg \cdot K$ ].
- $\mu$ : Viscosidad dinámica [ $Pa \cdot s$ ].
- $k$ : Conductividad térmica [ $W/m \cdot K$ ].

**Número de Nusselt.**

El número de Nusselt es equivalente al gradiente de temperatura adimensional en la superficie. Este número adimensional representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa [9].

Para convección natural, el número de Nusselt promedio cuando existe un flujo de calor constante desde la superficie del sólido se obtiene [45]:

$$Nu = \left( 0.825 + \frac{0.387(Gr_L \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{1 + (0.437/Pr)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (2.8)$$

- $Gr$ : Número de Grashof [1].
- $Pr$ : Número de Prandtl [1].

**2.1.9 Modelo de transferencia de calor.**

En la literatura se propone un modelo que determina la velocidad calentamiento en la superficie de sellado, para el caso específico del proceso de sellado por el método de mordazas, considerando la temperatura en el medio de un material calentado se puede considerar como una respuesta escalonada de una ecuación invariante en el tiempo lineal de primer orden [28]:

$$T_n = T_i \cdot (1 - e^{-t/k}) \quad (2.9)$$

- $T_n$ : Temperatura interfaz de sellado [°C].
- $T_i$ : Temperatura de la superficie de la mordaza [°C].
- $t$ : Tiempo [s].
- $k$ : Conductividad térmica del material de la mordaza [ $W/m \cdot C$ ].

En términos de diseño, referente a la selección del material, si se busca tener una alta razón de cambio optimizando el proceso de transferencia de calor, primeramente se tendría que seleccionar un material con una alta conductividad térmica.

**2.1.10 Análisis numérico de la transferencia de calor.**

Para esta investigación fue necesario realizar un análisis de transferencia de calor para lograr comparar los resultados del comportamiento del flujo de calor, gradientes de temperatura y distribución de la temperatura sobre la geometría y materiales de las versiones de mordazas diseñadas. Fue requerido implementar un análisis numérico mediante elemento finito, debido a la complejidad de la geometría de la mordaza. De esta forma se logra evaluar las propiedades de un modelo digital sin necesidad de ser fabricado.

**Ley de Fourier.**

El modelo matemático que se muestra a continuación rige el comportamiento de transferencia de calor por conducción [2]:

$$Q = -k \cdot A \cdot (\Delta T / \Delta x) \quad (2.10)$$

- $Q$ : Calor transferido mediante conducción [W].
- $A$ : Área [ $mm^2$ ].
- $k$ : Conductividad térmica [ $W/mm \cdot C$ ].
- $\Delta T$ : Cambio de temperatura [ $^{\circ}C$ ].
- $\Delta x$ : Espesor [mm].

Se puede concluir que el calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional al espesor [2]. Esta es la ecuación que se resuelve mediante análisis numérico, se obtiene una solución iterativa mediante el método Gauss-Seidel o Jacobi. De esta forma se resuelven las ecuaciones matriciales para cada uno de los elementos que componen el modelo.

Partiendo de la metodología de análisis de elementos finitos (FEA), los análisis térmicos pueden dividirse en dos categorías:

- **Análisis térmicos en estado estable:** la distribución de temperatura y el flujo de calor del modelo son independientes del tiempo. No son considerados los efectos transitorios. Las propiedades del material como la conductividad y el coeficiente de convección son independientes de la temperatura [2].
- **Análisis térmicos en estado transitorio:** la distribución de temperatura y el flujo de calor del modelo son independientes del tiempo. No son considerados los efectos transitorios [2].
  - **Análisis térmicos en estado transitorio no lineal:** se busca el equilibrio térmico de un sistema que puede ser alcanzado después de un cierto tiempo [2].
  - **Análisis térmicos en estado transitorio lineal:** las fuentes de calor pueden ser dependientes del tiempo o invariantes en el tiempo [2].

Es importante conocer las diferencias entre estos análisis para así poder seleccionar el necesario para cada fenómeno presentado en los procesos de diseño. Así mismo, fue requerido conocer las limitaciones y alcances de cada uno de estos análisis térmicos para lograr tomar decisiones relevantes en el proceso de validación de los conceptos de diseños presentados en las siguientes secciones del presente trabajo de investigación.

## 2.2 Polímeros.

Con el objetivo de conocer el parámetro de temperatura al cual se realizarán los experimentos del sellado continuo, fue requerido conocer las propiedades características del material polimérico de la película multicapa. Para ello se explican a continuación las principales temperaturas involucradas en los materiales poliméricos, así como los estudios realizados para conocer las propiedades del polímero de la película multicapa implementada. Estas propiedades son relevantes para determinar el rango de temperatura para la experimentación del sellado continuo.

### 2.2.1 Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

La temperatura de transición vítrea hace referencia a una temperatura característica de los polímeros, en el que existe un bajo coeficiente de expansión volumétrico. El estado cristalino no tiene regularidad en el estado vítreo. Cuando el polímero se encuentra a esta temperatura comienza el movimiento de segmentos largos de las moléculas debido al incremento en el volumen libre [35]. Al superar la temperatura de transición vítrea existe suficiente energía para permitir el movimiento y ondulación de la cadena [57].

### 2.2.2 Temperatura de fusión ( $T_m$ ).

La temperatura de fusión hace referencia a la temperatura de cambio de fase del polímero, es decir, existe un cambio en el estado homogéneo de la materia. Por lo que a esta temperatura, el volumen cristalino del polímero está en equilibrio con el estado fundido. No todos los polímeros amorfos tienen un punto de fusión claro, ya que la fusión generalmente sucede dentro de un rango de temperaturas, por lo que la transición es de forma gradual [57].

$$\Delta G = \Delta H_m - T_m \Delta S_m = 0 \quad (2.11)$$

- $\Delta G$ : Energía libre de Gibbs [ $J/mol$ ].
- $\Delta H_m$ : Cambio en la entalpía durante la fusión [J].
- $T_m$ : Temperatura de fusión [ $^{\circ}C$ ].
- $\Delta S_m$ : cambio de entropía durante la fusión [ $J/^{\circ}C$ ].

En la figura 2.3 se observa la relación entre el volumen específico y la temperatura para diferente etapa de un polímero. En esta imagen se describe cada una de las fases de los polímeros. En el caso del polímero amorfo hace referencia a un polímero que carece de una estructura, la fase cristalina es en la que todas las cadenas poliméricas están altamente alineadas que estructura cristalina, el polímero cristalino es una fase en la que existe una mezcla de regiones cristalinas y amorfas.

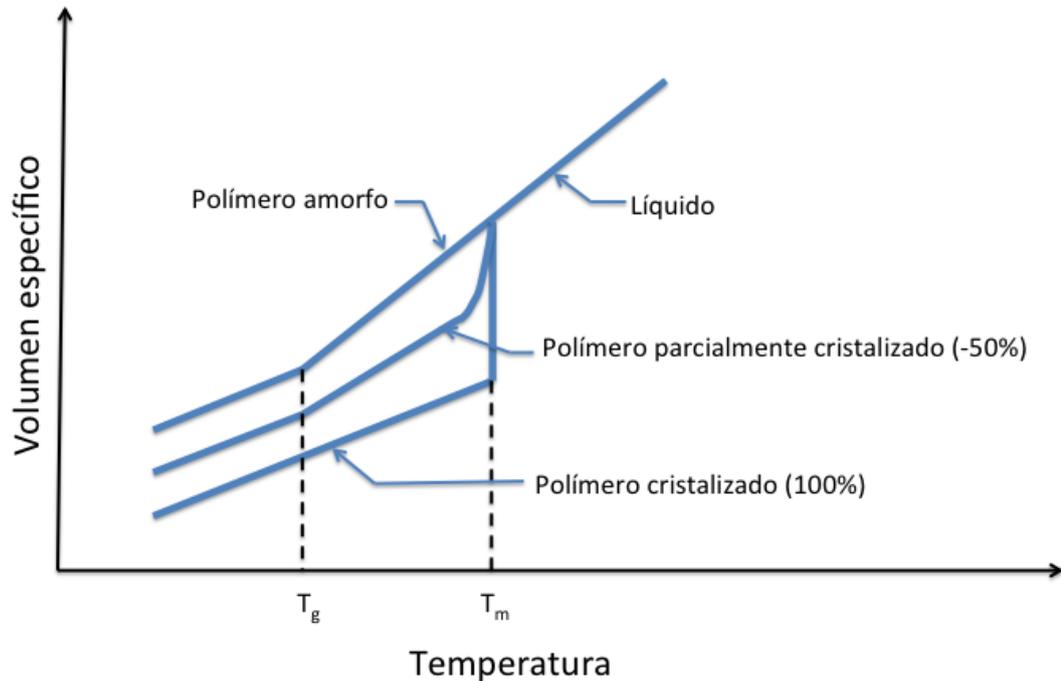


Figura 2.3: Se muestra  $T_g$  refiriéndose al cambio de la pendiente y  $T_m$  que denota un cambio de fase [57].

### 2.2.3 Calorimetría diferencia de barrido (DSC).

Al realizar el procedimiento de la calorimetría diferencial de barrido se puede observar sutiles cambios de la estructura de la muestra de polímero. Durante esta técnica se puede observar los cambios asociados con transiciones térmicas en materiales al someter las muestras a un proceso de calentamiento y comparar la cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura de la muestra con el de un material de referencia con respecto del tiempo [57].

La absorción de calor se observa como un pico endotérmico en la curva DSC, y el resultado es la entalpía requerida para inducir una transición térmica en la muestra. Esta técnica experimental fue utilizada para conocer las características térmicas de la película multicapa y así conocer los parámetros de temperatura para la fase de experimentación del sellado [57].

### 2.2.4 Películas de polipropileno.

Uno de los materiales más usado para la fabricación de empaques son las películas de polipropileno. La baja densidad del polipropileno ha ocasionado que logre sustituir a otros materiales en la fabricación de empaques. Materiales como el polietileno, cloruro de polivinilo, poliéster y celofán han sido desplazados por el polipropileno. Las películas de polipropileno se definen como láminas menores a 0.254[mm] de espesor y durante el proceso de fabricación se puede o no darle una orientación al estirar la película de polímero, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del material, por lo que es posible obtener películas de polipropileno sin orientación, uniorientado, orientado en un eje o biorientado [49], [15].

Para esta investigación se utilizó una película multicapa de polipropileno simple o sin orientación específica. Esto se concluyó de los resultado de un análisis por espectroscopia Raman, este estudio aprovecha el efecto en términos energéticos que tiene los fotones al interactuar con las moléculas vibrantes de una muestra de material, este efecto es conocido como dispersión de Raman [56] .En el que se observó una coincidencia de nivel del 84 % entre los picos de un polipropileno simple [55].

### 2.2.5 Sostenibilidad de empaques flexibles.

Cuando se analiza el impacto ambiental a través de la vida útil de los empaques alternativos, los empaques flexibles actuales generan una menor huella ambiental, con respecto a los empaques rígidos convencionales como latas, botellas de vidrio o incluso bolsas de papel [37]. Los empaques flexibles requieren menor energía para ser manufacturados y transportados, lo cual reduce la emisión de gases de efecto invernadero. También usan menor cantidad de agua en su proceso de manufactura [12].

Algunos de los beneficios que provee el uso de empaques flexibles en la industria son los siguientes [52] y de forma ilustrativa se logran observar estas ventajas en la figura 2.4:

- Portabilidad
- Cocinado/capacidad de cocinarse en el microondas
- Abrir y cerrar
- Frescura de los alimentos
- Disminución de material
- Comercio electrónico

De esta forma, los empaques flexibles pueden seguir desarrollándose, considerando estos aspectos positivos y trabajar para crear una colaboración en toda la cadena de valor para alinearse con los principios de economía circular [12].

El estudio de los empaques flexibles pueden resultar en la disminución del impacto ambiental. Cuando múltiples variables son examinadas, como la elección del material, optimización en el diseño del empaque o la reducción del empaque [37]. Las compañías dedicadas a la manufactura de empaques flexibles han encontrado la forma de producir empaques hechos de materiales biodegradables o reciclables que se puede ver en la figura 2.5 como *WJ Packaging Solutions*® , entre otras.



Figura 2.4: **Ejemplo del uso de empaques flexibles en la estación espacial internacional:** La astronauta Samantha Cristoforetti fotografiada tomando una bebida en el módulo *Unity* abordo de la Estación Espacial Internacional. La estación de comida se encuentra en el módulo *Unity*, como se observa en la fotografía a la derecha de la astronauta se observa un panel con empaques flexibles que contienen el alimento [38].



(a) Empaque flexible reciclable.

(b) Perfil Cuadrado.

Figura 2.5: Opciones de empaques sustentables [51].

## 2.3 Tecnologías de sellado.

El principio general de funcionamiento del sellado de películas multicapa es transferir energía en forma de calor a la interfaz de sellado para conseguir un cambio de fase que genere una unión entre las películas multicapa que conforman empaque. Existen muchos métodos para sellado de empaques flexibles, en la tabla 2.1 se describen algunos de los métodos utilizados.

Tabla 2.1: Tecnologías de sellado.

	Principio de funcionamiento	Aplicaciones	Desventajas
<b>Sellado por mordazas de cartucho.</b> ( figura 2.6).	Mediante mordazas calientes se busca transferir calor a la interfaz de sellado para generar un cambio de fase en la película para después obtener un enfriamiento a temperatura ambiente y obtener el sellado [28].	Fabricación de bolsas laminadas, tapas para envases, proceso de formado de empaque/llenado/sellado (por ejemplo, empaques de papas fritas) [43].	Contaminación por partículas sólidas. Desalineamiento entre los elementos y gradientes de temperatura en la superficie del sellado [28].
<b>Sellado por Inducción.</b> ( figura 2.7).	Se irradia un campo magnético a una capa metálica, se genera una corriente eléctrica inducida a la capa metálica y a su vez a la capa sellante adyacente a esta. La capa metálica se calienta por efecto Joule y se obtiene el sellado [28].	Sellos a prueba de manipulaciones, tapas [43].	Este método es aplicable solo para películas conductoras y de espesores específicos. Difícil configuración de los parámetros de operación de la máquina [28].
<b>Sellado por Impulsos.</b> ( figura 2.8).	Consiste en un alambre que funciona como resistencia con un revestimiento de teflón con el fin de ayudar a ajustar el flujo de calor, sin una barra de presión. Sujeta la película y la calienta mediante una corriente de impulsos. A continuación se enfría la película mediante presión, después de que la corriente se haya detenido [28].	Sellado de materiales pegajosos, películas termoplásticas para bolsas de vegetales congelados [43].	Procesos lentos a comparación del sellado por mordaza de cartucho [28].
<b>Sellado por ultrasonido.</b> ( figura 2.9).	Esta tecnología funciona mediante la inducción de frecuencias altas de vibración mecánica en la interfaz de película-película de sellado, y la fricción generada por la vibración entre sus superficies consigue el sellado [54]. Es importante resaltar que el calor es generado únicamente en la interfaz de sellado mientras las herramientas se mantienen frías [27].	Láminas de termoplástico para bolsas, bandejas, cartones recubiertos de termoplásticos, tapones de rosca de cartones [27].	Es requerido tomar en cuenta el espesor de las películas para colocar el parámetro correcto de frecuencia. [54].

Partiendo de estos métodos básicos se han logrado crear diversas máquinas selladoras que utilizan estas tecnologías y en combinación diversos sensores, mecanismos y complementos que logran obtener los resultados esperados por su diseñadores.

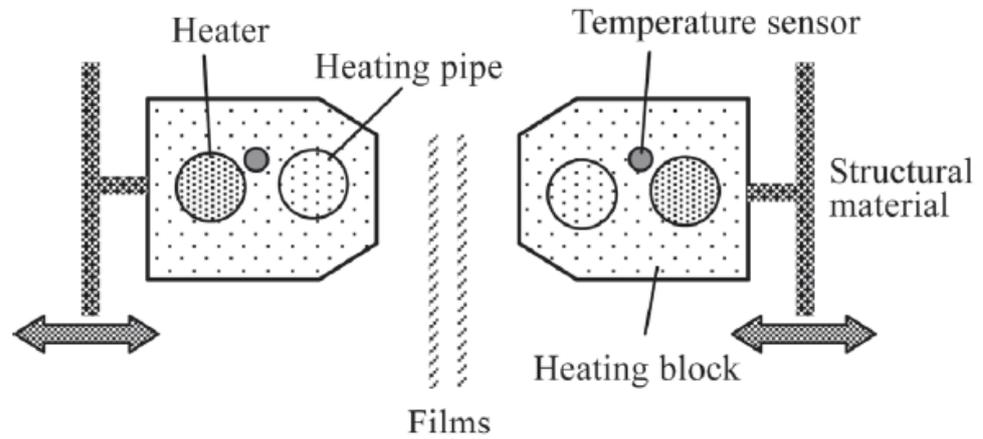


Figura 2.6: Sellado por cartuchos [28].

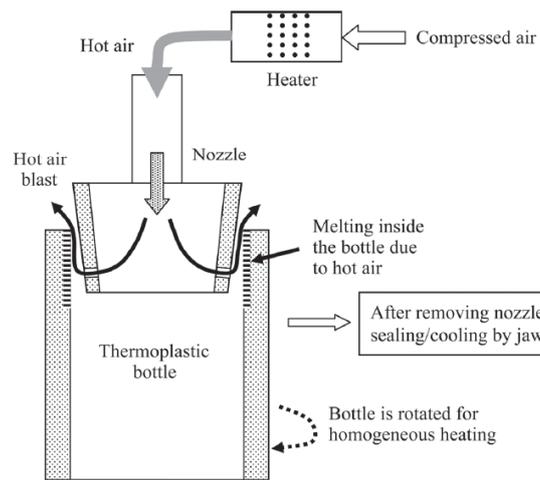


Figura 2.7: Sellado por inducción [28].

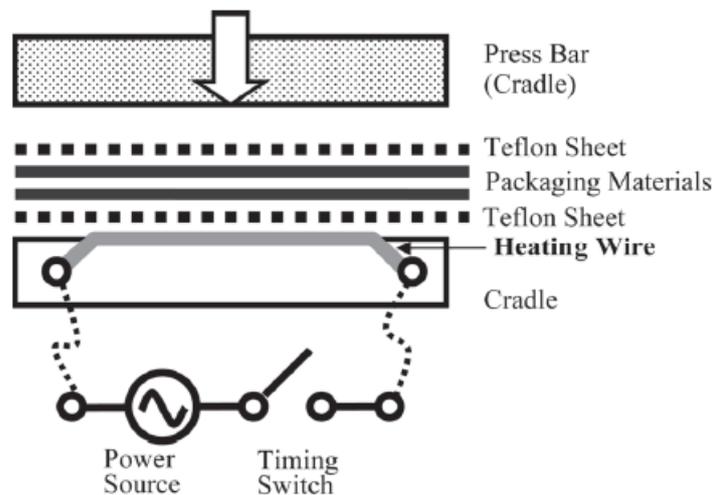


Figura 2.8: Sellado por impulsos [28].

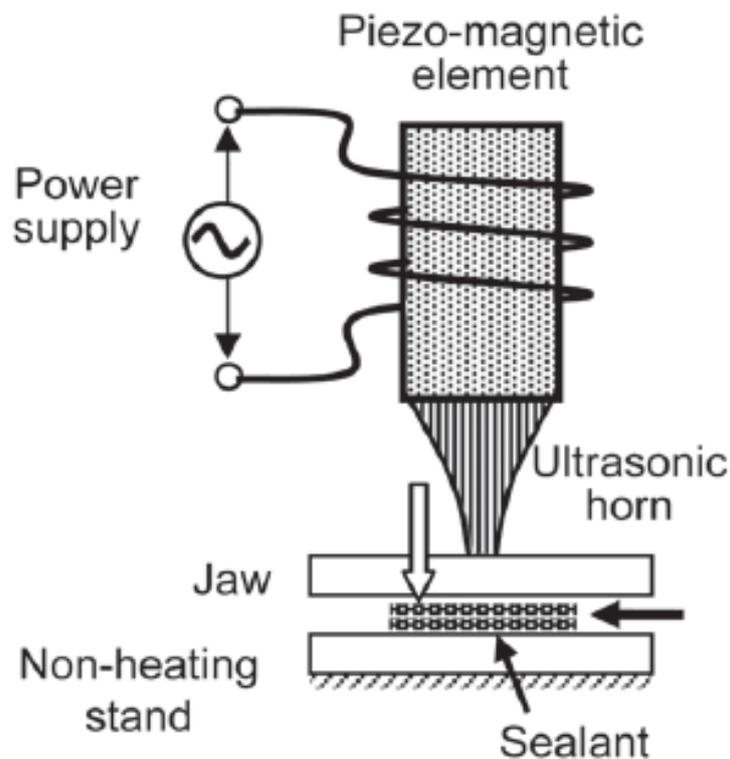


Figura 2.9: Sellado por ultrasonido [28].

### 2.3.1 Tipos de envolvedoras por cartuchos.

Existen diferentes tipos de máquinas envolvedoras, cada una de ellas con un sistema de sellado propio al tipo de material a utilizar, condiciones de trabajo, y dimensiones de paquetes a generar. Es posible dividirlos en horizontales y verticales, cada uno de estos tipos de máquinas tiene características particulares, las cuales se describen en los siguientes párrafos. Es importante resaltar que la esencia de estas máquinas radica en 3 funciones principales suministrar la película del empaque, sellar y cortar los empaques de una línea de producción mientras los productos son transportados.

Como se mencionó con anterioridad, el enfoque de esta investigación es el diseño de las

mordazas de sellado implementadas en las envolvedoras, las cuales tienen el mismo objetivo en ambas versiones de envolvedoras, por lo que ambos tipos de envolvedoras utilizan un diseño de mordaza de sellado similar pero adaptado a la tecnología de instrumentación de cada máquina. Los resultados de este trabajo de investigación serán de utilidad para generar un avance tecnológico en la industria de las máquinas envolvedoras por cartuchos.

### **Envolvedores horizontales.**

Las envolvedoras horizontales tiene gran importancia para este trabajo debido a la subfunción de sellado, para la cual utilizan mordazas rotatorias que permiten sellar el empaque, cortar y trasladar los productos una vez sellados. En el esquema figura 2.11 se observa las principales secciones que formar este tipo de máquinas.

En la figura 2.10 se observa un sistema de sellado implementado en envolvedores horizontales, el cual puede ser implementado en el sistema mostrado en el esquema figura 2.11. En la figura 2.10 se muestran las mordazas ensambladas en un par de ejes los cuales están sincronizados mediante un sistema de engranajes.

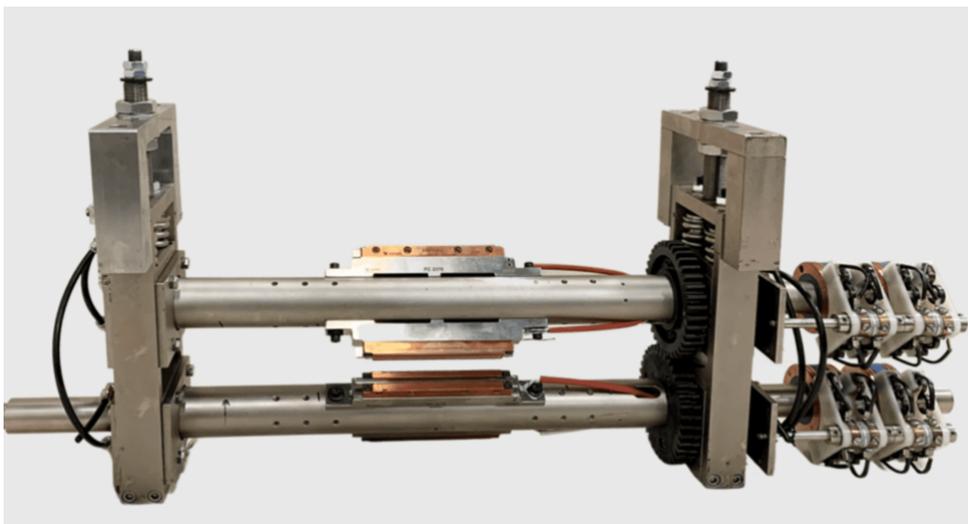


Figura 2.10: Sistema de mordazas utilizado envolvedoras horizontales [20].

Este sistema de sellado funciona bajo el mismo principio que la tecnología de sellado mediante cartuchos, es decir, se busca transferir calor a la interfaz de sellado para generar un cambio de fase en la película. Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, las máquinas envolvedoras también cuentan con la subfunción de transportar el paquete con los productos una vez que la película haya sido sellada. Por lo que se ha optado por un diseño de mordazas rotatorias que al girar desplazan la película de material sellada con el producto en su interior, como se puede observar en las figuras figuras 2.11 y 2.12.

### **Envolvedores verticales.**

Las envolvedoras verticales son otra alternativa para generar paquetes e introducir productos dentro de ellos. En este caso el material del paquete es arrastrado por el exterior de un tubo, el cual dosifica el producto dentro de los empaques. De la misma forma que las envolvedoras horizontales, las envolvedoras verticales sellan el empaque en la parte

intermedia entre un producto y el siguiente y cuentan con una cuchilla que divide los paquetes entre sí [6].

En la figura 2.13 se observa de forma esquemática las principales funciones de una envolvente vertical. Se detallan algunos elementos mecánicos, A: señala la barra anti electrostática, la cual sirve para evitar que la película se adhiera al conformador, así evitar errores a darle forma al empaque. B: hace referencia a la boquilla ionizadora cuya utilidad es la de neutralizar cargas electrostáticas para obtener un sellado limpio [17].

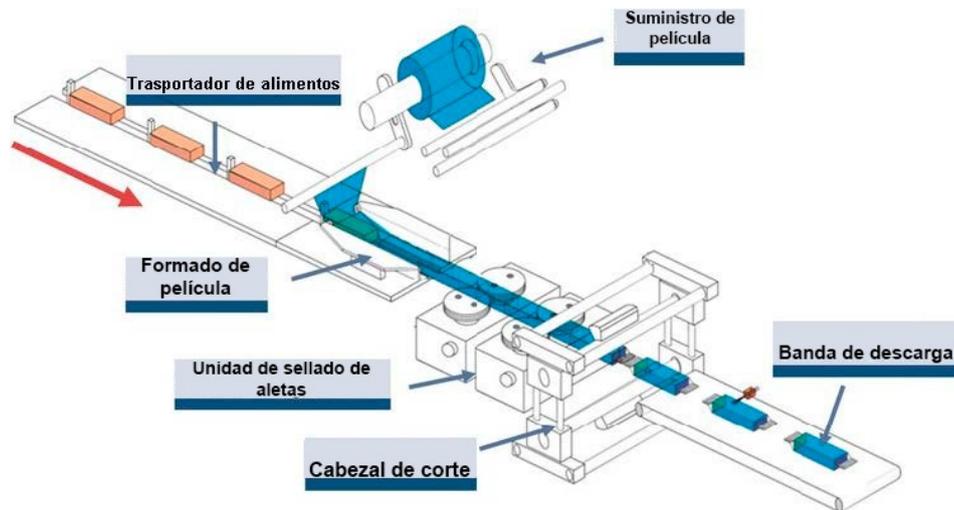


Figura 2.11: Esquema envolventoras horizontales [6].

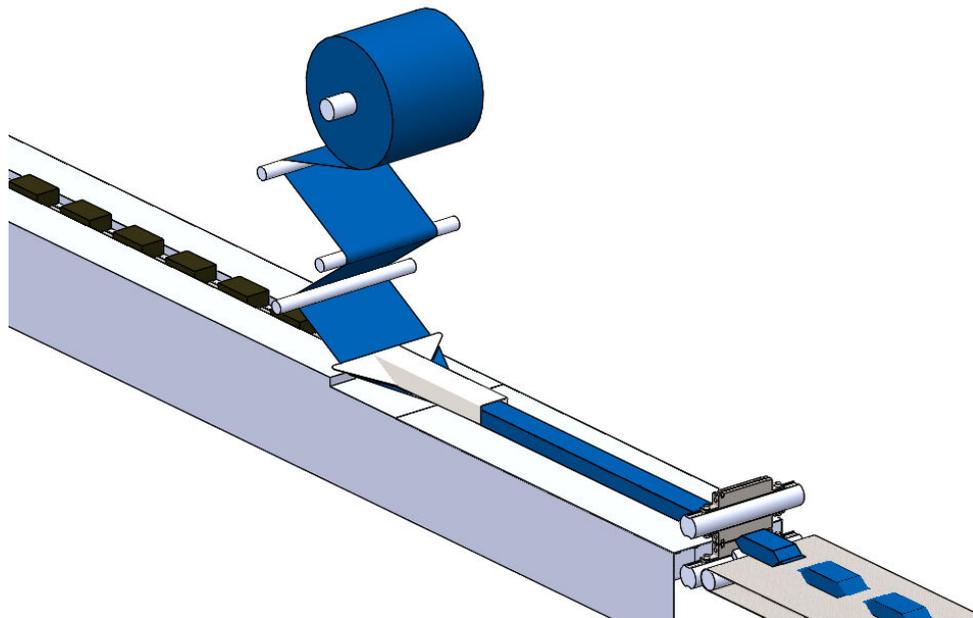


Figura 2.12: **Esquema de envolventoras horizontales:** En este acercamiento se logra apreciar de forma aislada el sistema de alimentación de la película y las mordazas de sellado que también realizan la operación de corte, al final obteniendo los paquetes sellados.

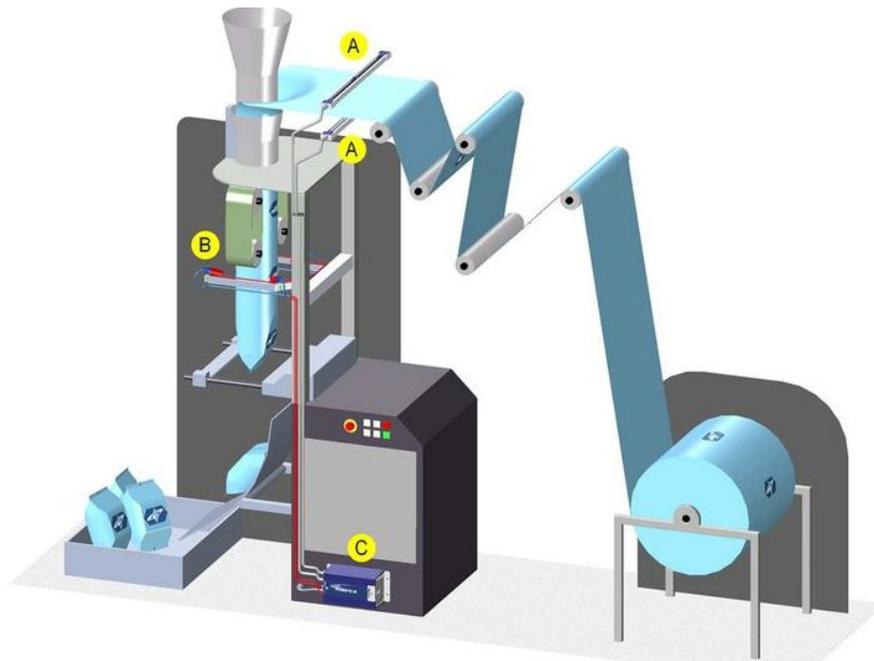


Figura 2.13: Esquema de envolvedoras verticales [17].

## 2.4 Errores durante el proceso de sellado.

Fue necesario retomar los principales errores que pueden suceder durante el proceso de sellado mediante cartuchos, ya sea en envolvedoras horizontales o verticales. Esto con el fin de evitar en lo posible los errores en el banco de pruebas y así obtener la mayor calidad en el sellado en cada una de las muestras obtenidas.

### 2.4.1 Errores en el equipo de sellado.

Un equipo de envolvedoras consiste en un conjunto de subsistemas funcionando coordinadamente para obtener un sellado óptimo en función del tipo de producto a contener y requerimientos del proceso. Cuando alguno de estos subsistemas falla puede ocasionar errores en el sellado y por ende en el producto final.

#### Errores en termopares.

Uno de los subsistemas más importantes es el que comprende la mordaza y el monitoreo de temperatura, el cual es realizado mediante termopares que se encuentran instalados sobre el cuerpo de la mordaza. Un termopar es un sensor de temperatura el cual consiste en dos metales diferentes unidos por un extremo, en el momento en que la unión de los metales experimenta cambios de temperatura, lo que produce un voltaje que se puede correlación con la temperatura [40].

Existen termopares para cada necesidad de medición; sin embargo, se tiene que tener en cuenta diferentes aspectos sobre ellos para obtener una medición de temperatura adecuada. Los termopares aislados son el tipo más usado en la práctica general [40].

Los termopares tienen errores inherentes a su método de manufactura, ya que es inevitable una variación en el proceso de aleación, por lo que la lectura de los termopares también tendrá una variación equivalente a la precisión del método de manufactura. El error presente en las lecturas puede ser irrelevante en la mayoría de las aplicaciones; sin embargo, si es requerido, se pueden adquirir termopares con tolerancias más cerradas para asegurar la menor cantidad de impurezas y la mayor consistencia en la calidad de la aleación [14].

Se presentan diversos errores en estos instrumentos de mediciones como un uso incorrecto, esto debido a que, como ya se mencionó, existen diferentes tipos de termopares y cada uno de ellos tiene una aplicación en particular. Así mismo, es requerido tener precaución de realizar una revisión al conectar las terminales de los termopares, ya que estos tienen una polaridad y no se obtendrán lecturas de temperatura correctas. También es recomendable contemplar un aislamiento simple que permita disminuir al máximo las variaciones en la temperatura del sistema que se desea analizar [14].

Otro parámetro a tener en cuenta durante la implementación de termopares es que deben estar conectados a tierra en una sola ubicación. De no ser así se puede generar un “bucle de tierra” con la corriente fluyendo de una tierra a otra. Es probable que esto ocasione campos electro magnéticos que puedan generar problemas en la señal de salida de los termopares y así afectar su precisión. Existen algunas soluciones para este error en la implementación de termopares, como el uso de termopares con aislamiento interno entre la entrada y la salida, lo cual permite eliminar el bucle y aditamentos que permitan aislar el bucle [14].

Durante el uso de estos sensores también es importante recordar que tienen una vida de uso recomendada por el fabricante, debido a que durante su uso los termopares pueden estar expuestos a frecuencias altas de ciclos de trabajo continuo, acercándose a sus rangos máximos de temperatura, lo cual causa estragos en la metalurgia por ende ocasiona variaciones de 10-20 °F. Por lo que tiene que reemplazarse como parte de un mantenimiento preventivo periódico [14].

Debido a la geometría (alargada) de todas las mordazas implementadas en el método de sellado por cartuchos, el calor tiende a concentrarse en la zona central, ocasionando varios de los principales errores en el proceso de sellado.

### 2.4.2 Errores sobre empaques flexibles.

Para el método de sellado por cartuchos, cada material con el que fue realizado la película multicapa tiene un umbral de sello (SIT siglas en Inglés) propio, el cual la multicapa de material es suficientemente calentada para sellar los huecos en los sellos, de esta forma generando el mínimo sello aceptable. De la misma manera, cada material utilizado en este proceso tiene una temperatura máxima, en la cual el material de la envoltura se distorsiona, fractura o genera un *hot tack* inadecuado (fuerza de sello e integridad mientras el sello sigue caliente) [58].

La característica huella que deja el proceso de sellado mediante cartuchos sobre la película puede ser analizada visualmente o mecánicamente con el fin de observar anomalías

en el proceso. Esto fue requerido como un método de validación del funcionamiento de la mordaza y el banco de pruebas en general. Para ello se realizó una recopilación de algunos de los principales errores observados sobre la película de sellado.



Figura 2.14: **Concertación de calor en la zona central de la mordaza:** en esta imagen se logra observar una deformación sobre la película de sellado en la zona central, lo cual refleja una elevada temperatura de la mordaza de sellado, lo cual podría ocasionar una mayor dificultad para abrir el paquete o dañar el producto [24]

En la figura 2.15 se resalta también que el calor concentrado en la zona central del sellado fue excesivo, por lo que existe un degradado, el cual se observa en el cambio de color entre blanco y rojo.

Existen diversas razones por la que este error en particular puede ocasionarse, puede ser por arrugas previas sobre el material a sellar, errores en el sistema de alimentación independiente al sellado. Pero para este caso, en particular los más probables que haya sucedido por una distorsión debido al calor excesivo.



Figura 2.15: **Desplazamiento de la película superior sobre inferior:** En esta imagen se logra observar un desplazamiento en el momento del sellado, ya que la película inferior (color blanco) sobresale de la película superior (color rojo) [24]



Figura 2.16: **Plegues en el sellado:** Se observa como el sellado se realiza sobre dos o más pliegues del material [24]

## 2.5 Antecedentes.

A continuación se presentan los antecedentes de investigaciones realizadas sobre el estudio del proceso de sellado de películas multicapa. Se muestran las conclusiones en la comparación de los análisis de calor en el uso de dos materiales diferentes (acero inoxidable y Dura-Therm®). También se muestran las conclusiones en el estudio de las diferentes geometrías de la superficie de sellado y el patrón impreso sobre el empaque.

### 2.5.1 Diseño de mordazas en la industria.

Los fabricantes de mordazas diseñan sus productos adaptándose a los requerimientos de los fabricantes de empaques. Logran ajustarse a nuevas necesidades de materiales, cambios en el tamaño del paquete y estandarización de mordazas multiplataforma. La industria se enfoca en requerimientos de diseños particulares, con los que busca satisfacer necesidades y dar soluciones a las problemáticas que se presentan durante el proceso, los cuales son:

- **Configuraciones consistentes y precisas:** el estudio de las variables críticas sobre el proceso es la clave para obtener soluciones en los errores del sellado. La empresa Greener Corporation ® propone como soluciones para la presión y la temperatura del proceso los siguientes productos:
  - **Sella Fácil™ FLEX:** permite ajustar la presión del sellado automáticamente a las capas extra de material de la envoltura en el sello [11].
  - **Dura-Therm®:** se obtiene una transferencia de calor más consistente figura 2.19 [11].
- **Fácil mantenimiento:** para facilitar el mantenimiento de los equipos de sellado generaron los insertos de recambio rápido. Lo cual otorga una modularidad del sistema de mordaza, permitiendo solo reemplazar la superficie de sellado cuando sea necesario [11].
- **Geometrías personalizadas:** es posible fabricar mordazas que al sellar dejen una huella de sellado solicitada por el cliente, eso con el fin de adaptarse a materiales o a tipos de empaque [11].

Estos análisis fueron realizados con el fin de justificar el comportamiento del material utilizado para la manufactura de las mordazas de sellado, como solución a la problemática que involucra la variación de temperatura en la superficie de sellado, la cual a su vez ocasiona inconsistencias en el sellado, como sellos distorsionados o con fugas, como se observó en la figura 2.15.

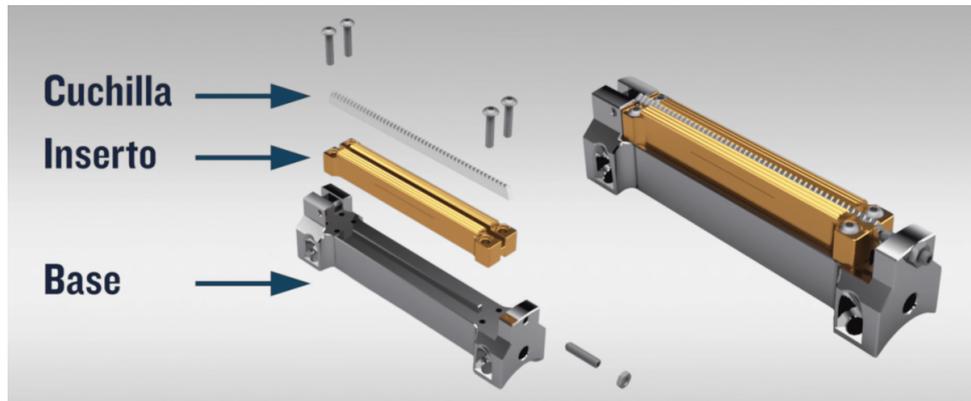


Figura 2.17: **Ensamble mordaza de Greener Corporation®**: En esta imagen se muestra una propuesta de solución puesta por la industria de manufactura de mordazas. Para un fácil mantenimiento del equipo de sellado, se le diseña con una propiedad de modularidad, para reemplazar la superficie de sellado de la mordaza (inserto), el cual es el elemento con mayor probabilidad de fallo por fatiga [11].

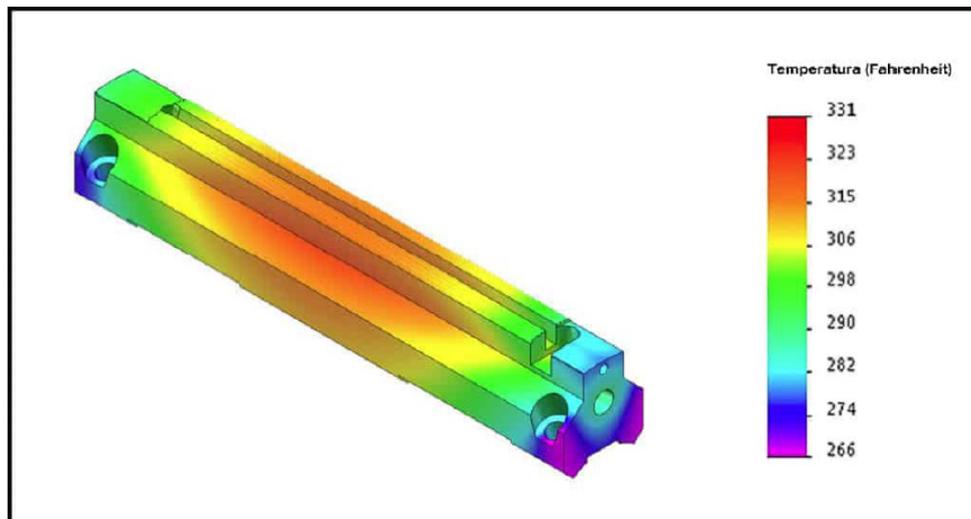


Figura 2.18: **Resultados del análisis térmico de una mordaza de acero inoxidable**: se observa la concentración de mayor temperatura en el centro de la mordaza, así como variaciones de hasta 33[F], equivalente a 18.33 [°C], sobre la superficie de sellado [58].

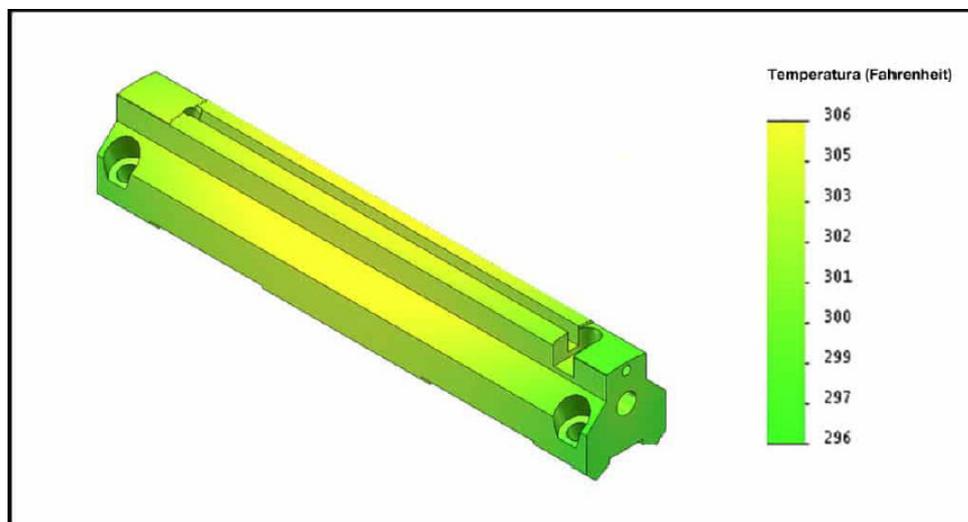


Figura 2.19: **Resultados del análisis térmico mordaza de Dura-Therm®**: se logra una disminución en la variación de la temperatura de la superficie de sellado de  $\pm 3$  [°F], equivalente a 1.67 [°C], teniendo como resultado una temperatura uniformemente distribuida [58].

### 2.5.2 Análisis de los resultados de simulaciones térmicas en mordazas de sellado.

Como parte de los antecedentes consultados para la realización de este trabajo de investigación. Se examinaron tesis previas sobre el mismo tema. A continuación se presentan los resultados del proceso de validación de la mordaza implementada en un banco de pruebas y algunas de las conclusiones reportadas por el equipo. Para obtener estos resultados se realizó un análisis térmico en estado estacionario mediante FEM en el *software* de CAE Ansys®[21]. Es importante mencionar una característica importante del diseño de esta mordaza, es la restricción de temperatura en el contacto con la base y a su vez con los cilindros neumáticos. Fue necesario implementar barrenos como disipadores de calor, debido a que si los empaques de cilindros neumáticos sobrepasa los 150 [°C] ya no funcionarán adecuadamente, según lo reportado en [21].

El primer resultado analizado es la distribución de temperatura sobre la mordaza. Se puede observar que en la escala de temperatura existe un rango de 15.74[°C] a 871.61 [°C]. La temperatura máxima excede el punto de fusión de la mordaza, pero los autores justifican este resultado a que se realizó un análisis en estado estable y en realidad el sistema se encuentra en un continuo cambio debido al controlador de temperatura. Esto se puede ver como pulsos continuos enviados a la resistencia para que trabaje a la potencia necesaria para elevar la temperatura durante el proceso transitorio. De esta forma se observará la distribución de temperatura a la potencia que trabaja la fuente de calor durante el proceso [21].

Según lo reportado por los autores de esta tesis, la temperatura se distribuye uniformemente hacia la mordaza desde la resistencia. Existen zonas entre los barrenos de disipación de temperatura en las que se observa con temperatura elevada de 229.71 [°C]. La base cuenta con elementos aislantes, por lo que se aprecia una temperatura menor a 87.66 [°C]. La temperatura se concentra de forma radial al barreno de la mordaza, por lo que el modelo muestra pérdidas relevantes de energía. Sin embargo, la función de distribución de temperatura hacia la superficie de sellado se cumple. Se mantiene un rango de temperatura en la superficie de sellado entre 158 [°C] y 87 [°C] [21].

En la siguiente imagen se muestra el resultado de la distribución de temperatura en la mordaza mediante un corte longitudinal. Se observa un rango de temperatura en la superficie de sellado que va de 69.47[°C] hasta 77.94[°C]. Esto asegura la calidad de los sellos generados en las probetas que se ubican en la zona central de mordaza. En los extremos se observa una caída en la temperatura desde 69.47[°C] hasta 39.81[°C] [21].

El gradiente de temperatura también es un resultado importante de analizar debido a que permite obtener conclusiones útiles para la siguiente iteración de diseños. Las gráficas de gradiente de temperatura permite ver el contorno de las zonas en las que existe mayor cambio de temperatura con respecto a la distancia. En figura 2.22 se observa que el gradiente de temperatura es pobre en la zona de la mordaza y se concentra radialmente a la fuente de calor [21].

Las conclusiones de esta fase de validación de diseño mecánico, los autores de esta tesis proponen algunas mejoras para las siguientes iteraciones. Debido a que el modelo

propuesto tiene gradientes de temperatura relevantes para el proceso de sellado sobre la superficie, proponen sellar probetas solamente en la zona central, y así evitar fallos en el sellado debido a temperatura variable durante el proceso. Debido a las pérdidas de energía mostradas en la distribución de temperatura, se planea para siguientes iteraciones utilizar el elevado gradiente de temperatura que rodea la zona de la fuente de calor. Por lo que mover la resistencia más cercana a la superficie de sellado que a la base de la mordaza puede ser una solución viable.

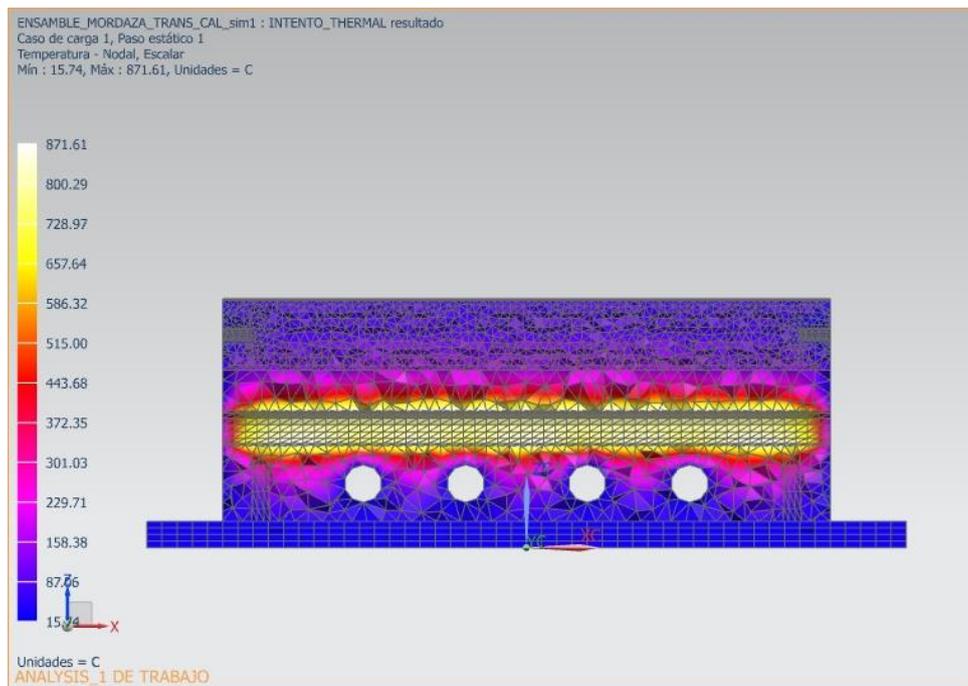


Figura 2.20: Distribución de temperatura en el cuerpo de la mordaza [21].

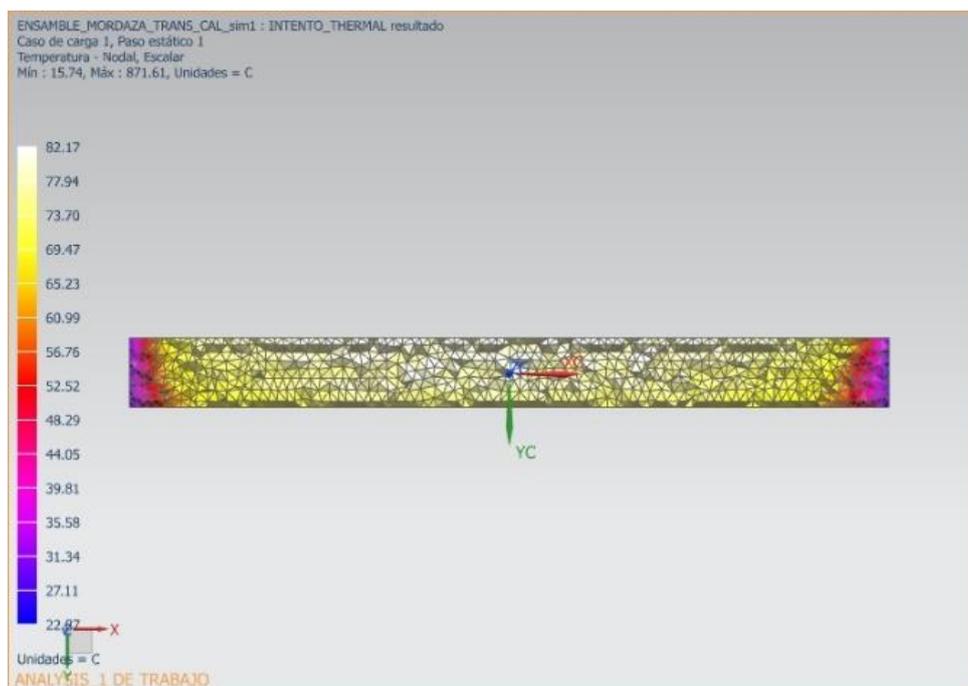


Figura 2.21: Distribución de temperatura sobre la superficie de sellado [21].

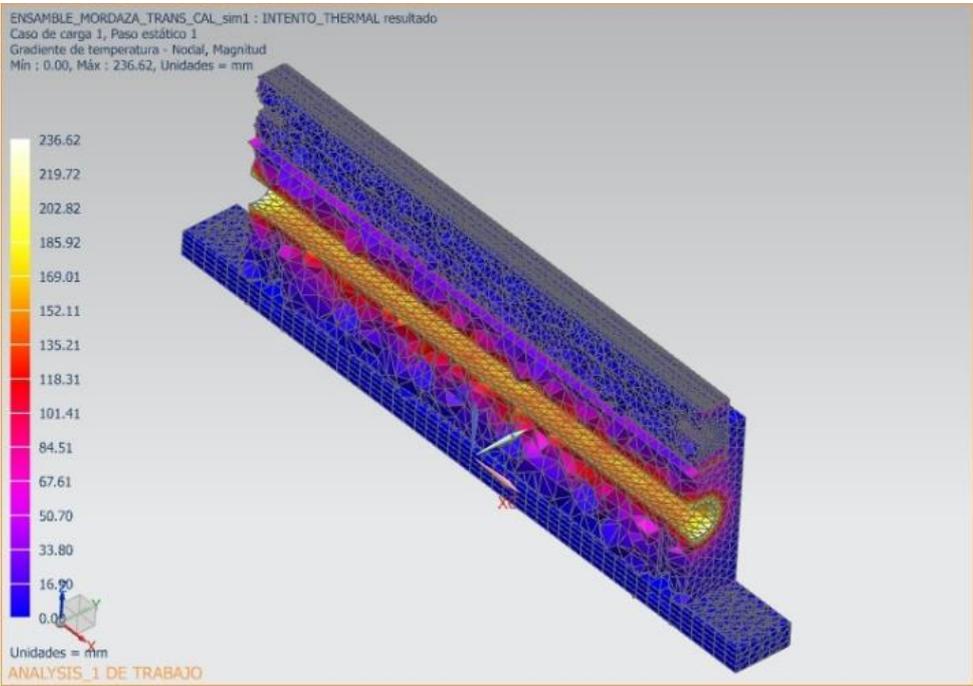


Figura 2.22: Distribución del gradiente de temperatura sobre el cuerpo de la mordaza [21].

### 2.5.3 Geometría de la huella de sellado.

Como parte fundamental del diseño de una placa de prensado para el sellado de películas multicapa, se requiere seleccionar la geometría de la interfaz de sellado, la cual dejará su huella en el empaque. Las geometrías de sellos en empaques flexibles de productos diversos también se utilizan como base de comparación en cuanto a su producto contenido y los materiales del empaque [43].

En 48 diferentes empaques recolectados al azar se observaron que solo 3 geometrías fueron utilizadas ( figura 2.23) [43]:

- Perfil en "V" horizontal: 36 muestras.
- Perfil en "V" vertical: 2 muestras.
- Perfil cuadrado: 10 muestras.

Partiendo de este muestreo se realizó un estudio comparativo en el que se observa que existen leves modificaciones en cuanto a la orientación del estriado, el paso entre surcos en el caso del perfil en "V".

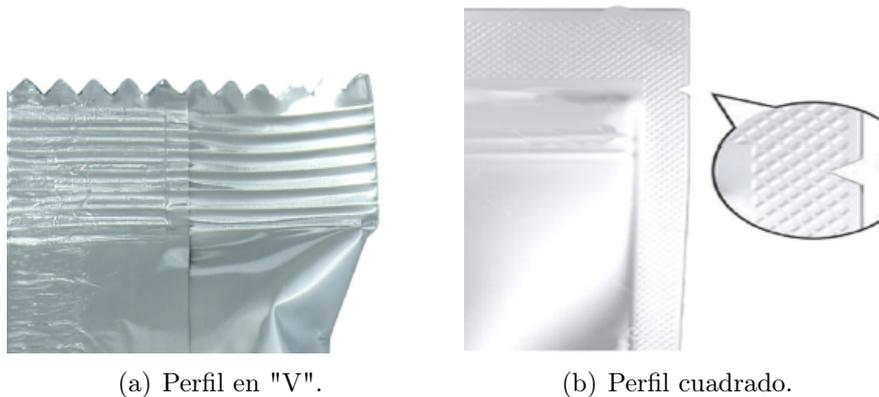


Figura 2.23: Perfiles de huella de sellado [43].

Posteriormente, se realizó un proceso de comparación de la resistencia de sellado de tres mordazas diferentes con las siguientes características [43]:

- Perfil en "V" 1 [mm] de paso.
- Perfil en "V" 3 [mm] de paso.
- Perfil plano.

#### Conclusiones de geometría de la huella de sellado.

Las principales conclusiones obtenidas después del proceso de comparación entre dichos perfiles de sellado fueron las siguientes:

- Las placas con geometrías de superficie de sellado en V presentan mayor resistencia de sellado con respecto a la superficie plana.

- Las geometrías con la medida de paso más pequeñas presentan mayor resistencia.
- La temperatura requerida para obtener valores similares de resistencia cambia según la geometría de la mordaza.
- En la parte central del sello se tiene mayor resistencia, independientemente de la geometría de la huella de sellado [43].

# Capítulo 3

## Proceso de diseño

En este capítulo se definirán las técnicas y herramientas apropiadas. Es decir, queda establecido como se aplicará el método propuesto para alcanzar el diseño solución al reto planteado. Se comenzó a plantear el proceso de diseño desde el conocimiento de la tecnología de sellado por cartuchos y el estudio de los antecedentes de la investigación sobre esta tecnología.

### 3.1 Identificación de oportunidades.

Para identificar las oportunidades de generación de conceptos para el diseño de una mordaza implementada en un banco de pruebas de sellado continuo, se decidió partir de un diseño previo de mordaza. Para lo cual se realizó una lista de fallas de esta versión de mordaza como técnica de generación de oportunidades. Es importante tener en cuenta que todos los problemas pueden verse como una oportunidad de falla [32]. La lista de fallas a continuación se obtuvo a partir de los resultados obtenidos y de la observación del proceso experimental de la mordaza anterior:

- Incorrecta adquisición de datos de temperatura debido a la conducción de corriente eléctrica desde la resistencia (fuente de calor) hacia los termopares.
- Debido al tamaño de la mordaza se observaron algunas dificultades al colocar los termopares en su posición. También se observó falta de volumen para colocar la cantidad adecuada de termopares y así monitorizar la temperatura de la resistencia y la superficie de sellado.

También se hizo uso de la investigación bibliográfica como técnica de adquisición de fallas que impiden garantizar el sellado de la película y así obtener otro tipo de fallas en los diseños de instrumental implementado en la industria. Posteriormente, se generó la lista que se muestra a continuación [54]:

- La interfaz de sellado presenta un fenómeno de gradientes de temperatura debido a la conducción de calor desde la superficie de sellado de la mordaza.
- Existe desgaste en los elementos mecánicos debido a los ciclos de trabajo y esto produce desalineamiento entre las mordazas.
- Contaminación de la interfaz de sellado debido a partículas sólidas entre las películas.

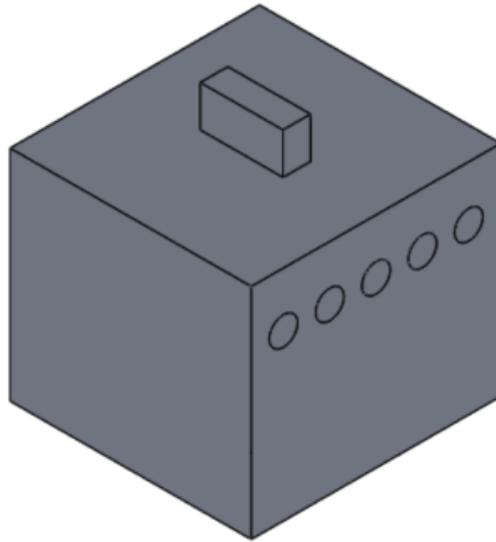


Figura 3.1: **Mordaza v0 en vista isométrica:** Esta versión de mordaza fue fabricada en aluminio 6061. Como se mencionó anteriormente, fue complicado colocar los termopares en su ubicación, así como obtener los gradientes de temperatura debido a al área de sellado correspondiente a 3 [mm<sup>2</sup>].

- Deficiente estandarización del proceso de sellado y así disminuir los sellos fallidos.
- Existe un gran desperdicio en las líneas de producción al no tener el resultado deseado en la adhesión de las capas del polímero al finalizar el proceso.

### 3.2 Planeación del diseño de las siguientes versiones de mordaza.

El plan del proceso de diseño mecánico fue actualizado regularmente para adecuarse a los cambios del ambiente de diseño y las decisiones tomadas sobre otros sistemas en los cuales interactúa la mordaza, basándose en la información continuamente actualizada. El tipo del proceso de diseño a realizar es derivado de un modelo de mordaza ya existente (figura 3.1) y de la cual se adquirió información que permitió definir algunas de las oportunidades de mejora [32].

A partir de la identificación de las oportunidades fue requerido realizar una evaluación de las prioridades. Primeramente, fueron descartadas las oportunidades de mejora que se desvían del diseño de la mordaza, ya que es la restricción de este trabajo de investigación. Por lo que se decidió utilizar las oportunidades que dirijan los siguientes pasos del proceso de diseño de una nueva versión de mordaza implementada en el banco de pruebas de sellado continuo. Y como oportunidades fundamentales de diseño se consideraron: la mejora de eficiencia de la transferencia de calor y obtener una señal de los termopares nítida. Ya que estas oportunidades reúnen dos características relevantes, ambas se encuentran íntegramente involucradas con el diseño de la mordaza y también son parte de una variable crítica del proceso de experimentación, la cual es la temperatura, debido a que este parámetro es esencial para la obtención de muestras y su posterior análisis, el

cual es el fin del banco de pruebas de sellado continuo [32].

Una vez que se decidió priorizar esas oportunidades de diseño, fue posible fijar el rumbo específico del proceso en forma de una visión del modelo [32]. Por lo que se puede definir que el argumento de diseño sea: “Elemento mecánico que permita la conducción de calor de forma homogénea hacia la interfaz de sellado”. Con ello, los usuarios de este elemento lograrán obtener muestras de película sellada y datos de temperatura para su análisis y generación de conclusiones.

Dada esta visión de diseño, es requerido restringir los posibles conceptos de diseño como parte fundamental de la planeación del diseño de la siguiente versión [32]. En primer término, es necesario restringir el concepto solución desde el punto de vista de las dimensiones geométricas con el porta mordaza. Ya que es necesario que la mordaza se mantenga unida al porta mordaza para realizar su función de sellado.

Debido a que el concepto solución fue implementado de forma física en el banco de pruebas de sellado continuo, era necesario evaluar la capacidad de manufactura con la que cuentan las instalaciones del laboratorio [32]. Para ello se seleccionó como método de manufactura el arranque de viruta por máquina fresadora. Por lo que los materiales y la geometría quedan restringidos a la viabilidad de ser manufacturados por este método y dentro de las tolerancias de desplazamiento de los ejes de los carros de la máquina fresadora implementada.

### 3.3 Necesidades de diseño.

Las necesidades de diseño fueron conseguidos mediante una adaptación del proceso de obtención de necesidades del cliente propuesto por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger en el cual proponen en primera instancia obtener datos sin procesar dados por los clientes, que en este caso fueron los compañeros de equipo quienes utilizarán las mordazas para realizar pruebas experimentales [32].

A continuación se utilizaron los datos obtenidos para generar las necesidades requeridas y finalmente jerarquizar y establecer la importancia de dichas necesidades para organizar los requerimientos de diseño [32].

1. **Mejora de eficiencia de la transferencia de calor:** Se precisó asegurar una uniformidad de temperatura sobre la superficie de sellado para evitar errores en el sellado. Así como optimizar la transferencia de calor de la fuente hacia la interfaz de sellado.
2. **Obtener una señal de los termopares nítida:** Debido a la sensibilidad de los termopares a la corriente eléctrica requerida para generar la potencia de la fuente de calor, fue necesario encontrar un método mediante el uso de un material aislante para obtener lecturas correctas de temperatura.
3. **Geometría de superficie de sellado:** Es requerida una tolerancia de planicidad entre las superficies de sellado de la mordaza superior e inferior muy cerrada debido a que durante el proceso de sellado se requiere obtener muestras uniformes de huellas de sellado para poder ser analizado.

4. **Ensamble con el porta mordazas:** Se requirió diseñar la geometría de la mordaza considerando las tolerancias geométricas necesarias para su ensamble con el porta mordazas y la método de unión, para el cual se utilizó una unión con tornillo.
5. **Facilidad de instrumentación:** Dadas las dimensiones del banco de sellado, la mordaza resultó en un elemento mecánico del orden de milímetros, por lo que la instalación manual de los termopares y la fuente de calor se necesitó optimizar, con el fin de disminuir el tiempo de instalación y confirmar la lectura de las señales de temperatura y pulsos eléctricos.
6. **Adecuarse al método de manufactura asignado:** Para la manufactura de este elemento mecánico se utilizó el mecanizado por arranque de viruta, para lo cual se requirió diseñar la geometría considerando el método de sujeción y planos de trabajo requeridos para la operación de maquinado manual o mediante CNC.

### 3.4 Especificaciones de diseño.

En primer lugar, fueron identificadas las especificaciones objetivo, las cuales se obtuvieron a partir de las necesidades previamente identificadas. La identificación de las especificaciones permitió establecer detalles precisos y medibles del diseño. Ya que las especificaciones son el punto de partida sobre el cual se estructuran las características del diseño, fue requerido identificar las métricas y sus valores como método de obtención de las especificaciones del diseño, las especificaciones se encuentran implicadas en la naturaleza del reto a resolver, así como en el ambiente del diseñador [8].

Es requerido vincular las métricas con las necesidades, por lo que se generó la tabla 3.1 en la que se pueden observar las métricas involucradas con las necesidades a cumplir por el diseño. Identificar las métricas permitió plantear las características ingenieriles que debe cumplir el diseño y que tienen la cualidad de ser medibles y valorables mediante un número que puede ser relacionado con una unidad física [32].

Tabla 3.1: Relación entre necesidades y métricas

Necesidad	Métrica	Unidades
1	Evitar la corriente eléctrica de la resistencia hacia los termopares	[A]
2, 3	Atenuación de los gradientes de temperatura sobre la superficie de sellado	[°C]
4	Geometría de ensamble	[mm]
2, 3, 5	Área de la superficie de sellado	[mm <sup>2</sup> ]
5	Distancia entre barrenos de termopares	[mm]
6	Tiempo del proceso manufactura	[s]

Es importante evaluar las especificaciones a la vez que se define las restricciones del diseño para mantener el enfoque en la generación de conceptos viables. A partir de las especificaciones se replantean las decisiones de diseño [32]. Por lo que a continuación se

muestran las principales restricciones identificadas, las cuales son los materiales disponibles para la fabricación de los modelos físicos y la geometría de ensamble. El método de manufactura disponible también fue considerado como una restricción al concepto de diseño, pero será descrito con mayor detalle en el capítulo 4.

### 3.4.1 Selección del material.

Parte importante del proceso de diseño fue seleccionar el material implementado para la manufactura de las mordazas, cuyas propiedades permitan cumplir los requerimientos anteriormente planteados. Se seleccionó un material cerámico para la nueva versión del banco de pruebas. Esto con el fin de lograr observar como funciona la transferencia de calor durante el proceso de sellado, mediante la lectura de una señal de temperatura adecuada, debido a que anteriormente se utilizaba aluminio en contacto con alambre de nicromo, lo cual impedía un correcto análisis de la señal, como se comenta en el punto 2 de requerimientos de diseño.

En la tabla 3.2 y tabla 3.3 se muestran las propiedades de los materiales seleccionados para realizar los experimentos.

Tabla 3.2: Propiedades MACOR [10]

<b>MACOR</b>			
	25°C	125-175 °C	
<b>Propiedades mecánicas</b>			<b>Unidades</b>
<b>Densidad</b>	2.52	2.52	$g/cm^3$
<b>Módulo de elasticidad</b>	66.9	65	GPa
<b>Radio de Poisson</b>	0.29	0.29	1
<b>Esfuerzo de cedencia</b>	0	0	GPa
<b>Propiedades térmicas</b>			
<b>Calor específico</b>	0.79	0.79	$kJ/kgC$
<b>Conductividad térmica</b>	1.46	1.38	$W/mC$
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>	$8.10 \times 10^{-6}$	$9.00 \times 10^{-6}$	$1/^{\circ}C$
<b>Propiedades eléctricas</b>			
<b>Conductividad eléctrica</b>	$1.00 \times 10^{-13}$	1	kHz MS/m

Como parte de la selección de materiales fueron requeridas las diferentes características del alambre de nicromo y se registraron en la tabla 3.4.

Los datos del alambre de nicromo fueron utilizados para obtener el valor de la resistencia del alambre, el cual será requerido en primer lugar para obtener el cambio de la resistencia a diferente temperatura y a continuación se utilizará el efecto Joule descrito en la ecuación (2.3).

Tabla 3.3: Propiedades aluminio 6061 [46]

<b>Aluminio</b>			
	25°C	125-175 °C	
<b>Propiedades mecánicas</b>			<b>Unidades</b>
Densidad	2.7	2.7	$g/cm^3$
Módulo de elasticidad	68.9	63.5	GPa
Radio de Poisson	0.333	0.33	1
Esfuerzo de cedencia	0	0	GPa
<b>Propiedades térmicas</b>			
Calor específico	0.9	0.97	$kJ/kgC$
Conductividad térmica	154	175	$W/mC$
Coefficiente de expansión térmica	$2.40 \times 10^{-5}$	$2.70 \times 10^{-5}$	$1/^\circ C$
<b>Propiedades eléctricas</b>			
Conductividad eléctrica	1		kHz
	37.7		MS/m

Tabla 3.4: Tabla de datos del alambre de nicromo [25]

Datos Nicromo	Unidad
Resistividad	$1.00 \times 10^{-6}$ $\Omega \cdot m$
Conductividad	$1.00 \times 10^6$ $\Omega \cdot m^{-1}$
Diámetro	1 mm
Área transversal del alambre	$0.7854$ $mm^2$ $7.85 \times 10^{-7}$ $m^2$
Longitud del alambre	36 mm 0.036 m
Resistencia	$4.58 \times 10^{-2}$ $\Omega$

### 3.4.2 Diseño de ensamble.

El diseño del ensamble de la mordaza con el porta mordaza fue el mismo para todas las versiones propuestas. Se usarán un par tornillos y tuercas ANSI métricos de nylon para mantener el aislamiento con respecto al porta mordaza ( tabla 3.5, figura 3.2). Estos elementos se utilizaron como método de unión para mantener en su lugar el elemento de sellado como se observa en la figura 3.11. Asimismo, se tiene que tomar en cuenta que para aislar el porta mordaza de la mordaza se implementó una capa de silicón de 0.2 [mm] de espesor.

Tabla 3.5: Descripción tornillería.

	Tornillos	Tuercas
Designación	ANSI	
Tamaño	M2	
Longitud [mm]	15	2
Tipo de avance	Cruz	Hexagonal
Paso [mm]	0.4	

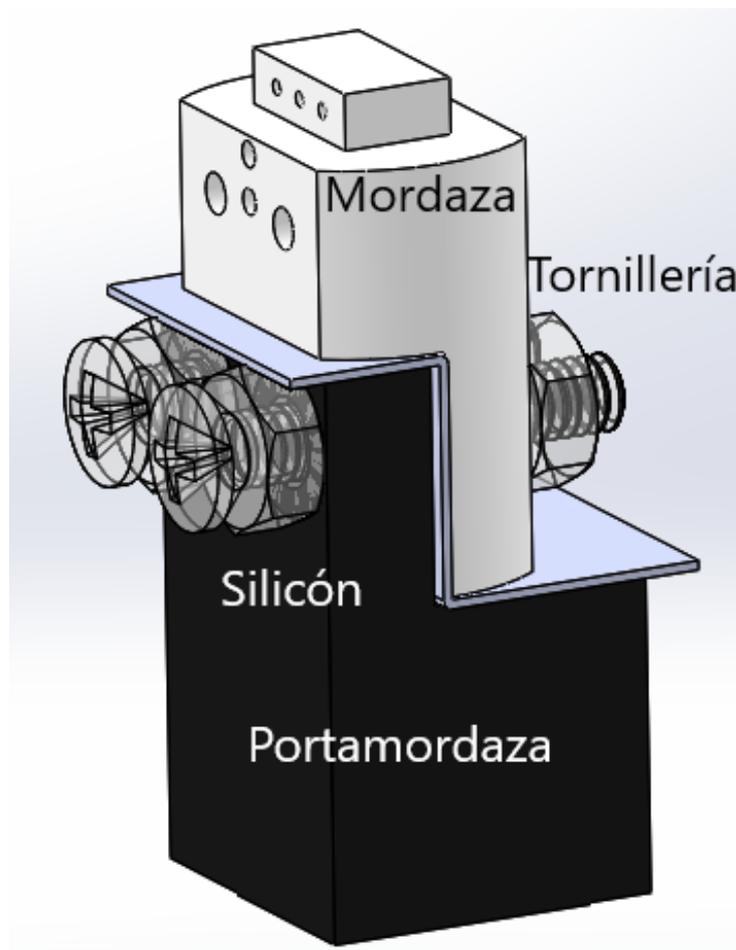


Figura 3.2: Modelo ensamblado con porta mordaza.

Haciendo referencia a lo reportado por la empresa *Green Corporation* [58] la lectura en el controlador usualmente no revela las inconsistencias de calor a todo lo largo de la cara de sello, dado que los termopares toman la temperatura en un solo punto específico en el cuerpo de las mordazas. Por lo que se decidió optar por una configuración de instrumentación para tomar la lectura en múltiples posiciones en el cuerpo de la mordaza. A continuación se describen las diferencias entre las principales características de cada una de las versiones de las mordazas.

Es importante mencionar que para sujetar los termopares en posición fue requerido

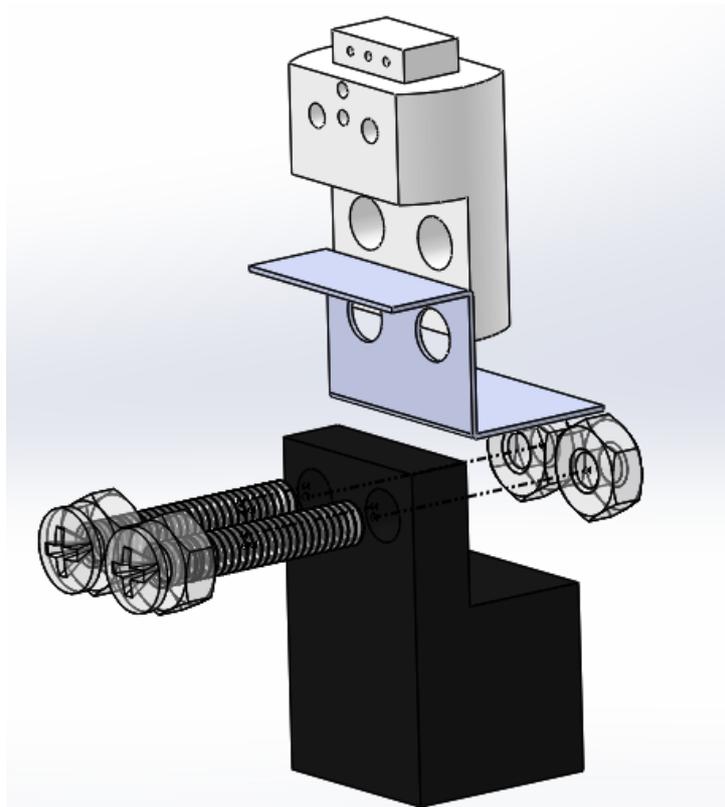


Figura 3.3: Ensamble del subsistema mordaza y porta mordaza (explosionado).

utilizar silicón, lo cual agrega una capa aislante a transferencia de calor por convección en la zona cercana la instrumentación. Se puede observar con claridad en la figura 3.12. Las especificaciones finales se definen después de haber seleccionado los conceptos de diseño. Por lo que un modelo técnico es de gran utilidad para lograr evaluar el concepto en la consecuente fase de validación mediante análisis numérico y proceso de experimentación [32]. En este trabajo de investigación se tomó la decisión de presentar las especificaciones finales de cada versión de mordaza en términos de las dimensiones y material de fabricación en las siguientes secciones.

## 3.5 Generación y selección de conceptos de solución.

Los conceptos desarrollados en este trabajo de investigación fueron seleccionados bajo la idea de que la forma sigue la función, por lo que fue necesario el planteamiento de un diagrama funcional que permita desglosar las funciones y subfunciones de la mordaza. Un concepto puede ser definido a partir de una idea que permita solucionar las necesidades planteadas, esta idea tiene que ser ampliamente desarrollada de tal forma que pueda describir el comportamiento de los principios físicos involucrados [53].

A partir de las necesidades se pueden plantear propuestas de soluciones que permiten satisfacer las necesidades planteadas y que cumplan con las especificaciones derivadas. Esta idea de solución contempla una descripción de la tecnología implementada, su funcionamiento de operación y su geometría, esto con el fin de obtener los parámetros de funcionamiento de los fenómenos involucrados [32].

Las entradas ideales para la generación del concepto conlleva plantear la problemática desde un punto de vista de la misión para el proyecto, contemplando también las lista de necesidades y especificaciones objetivo. Organizar y sintetizar las opciones de solución al explorar sistemáticamente de forma interna y externa al proyecto. Fue necesario estructurar esta fase del proceso creativo con la intención de no excluir posibles soluciones y contemplar la reestructuración de las fases de la generación de conceptos o fases previas a esta, haciendo énfasis en el proceso iterativo de diseño en ingeniería mecánica [32].

Cómo se mencionó en la fase de identificación de oportunidades, el siguiente diseño de mordaza fue obtenido al entender el comportamiento de la primera versión de mordaza en el sistema de sellado, y refinar sus funciones, por lo que este método combinado con análisis de usuario del banco de pruebas fueron los seleccionados para la generación y selección de conceptos. Posterior a la obtención de los conceptos, fue requerido validarlos, para este trabajo, se utilizaron dos métodos, primeramente por análisis numérico y posterior a ello, se realizó un proceso experimental [53].

### 3.5.1 Diagrama funcional.

Este diagrama permite descomponer en entradas y salidas de materia, energía o información. A partir de ello se pudo observar como interactúan las funciones y funciones auxiliares del sistema para obtener las salidas requeridas. De esta forma se puede tener claro los elementos críticos que tienen que tomarse en cuenta para generar el concepto de diseño. En el diagrama de la figura 3.4 se observa en el lado izquierdo las entradas al sistema, se muestran las funciones y funciones auxiliares limitadas por una línea punteada y para este proceso de diseño solo existe una salida, la cual es la película multicapa sellada. Como se puede observar, todas las entradas después de realizar sus funciones en diferentes procesos convergen en una sola función, la cual es generar el cambio de fase en la película multicapa debido a la interacción con la superficie de sellado y depende en gran medida de la temperatura [44].

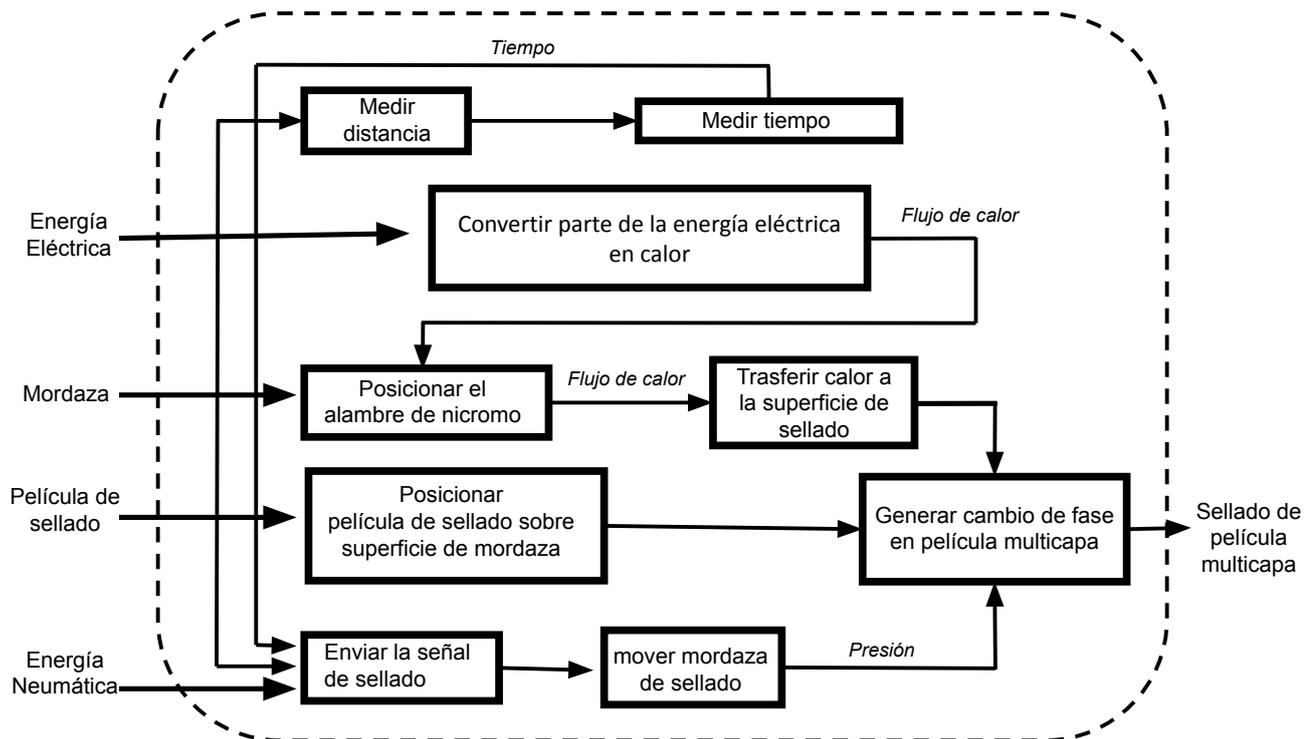


Figura 3.4: Funciones y subfunciones del sistema.

Como se mencionó previamente, el diseño de la siguiente versión es derivado de una versión ya existente. Por lo que los conceptos solución no se alejaron de la versión inicial, así que los conceptos generados se enfocaron en solucionar las deficiencias que se encuentran enlistadas en la sección de identificación de oportunidades. Ya que la misión del proyecto fue disminuir la variación de la transferencia de calor y la correcta monitorización de la temperatura, los conceptos solución se concentran en estas especificaciones, a continuación se enlistan los seleccionados:

- Aislamiento térmico de las paredes que interactúa con el efecto de transferencia de calor por convección.
- Reorientación de la fuente de calor en el cuerpo de la mordaza.
- Incrementar de 3 a 15 [mm] el área de sellado.
- Reconfiguración de la posición y cantidad de los termopares.
- Utilizar material cerámico eléctricamente aislante que permita a los termopares obtener una señal nítida considerando posibles deficiencias de la transferencia de calor.
- Utilizar un material con alta conductividad térmica y un material cerámico dieléctrico que cubra la resistencia, en el caso de que el cuerpo de la mordaza se fabrique de un material conductor.

- Si el cuerpo de la mordaza se manufactura en un material que posea propiedades conductoras, se puede hacer uso de un barniz dieléctrico sobre la resistencia que funciona como fuente de calor.

La combinación de los conceptos solución seleccionados se describen con mayor detalle en las siguientes secciones en forma de versiones de modelo de mordazas.

Para el trabajo actual, el análisis de los datos de experimentación servirán como validación del diseño de la mordaza. Antes de analizar los resultados obtenidos por los termopares, mediante una prueba rápida se midió la conductividad del alambre de nicro-mo hasta la superficie de sellado con el fin de detectar posible corriente eléctrica a través del cuerpo de la mordaza, del cual se pudo concluir la existencia de un completo aislamiento eléctrico. Para la experimentación fueron requeridos los equipos descritos en la figura 3.8, en la cual también se detalla la configuración requerida. En primera instancia se mencionan los equipos que fueron utilizados para medir las variables de interés, las cuales son descritas a continuación.

## 3.6 Variables críticas

El propósito general del proceso de experimentación es validar los conceptos de diseño al generar pruebas de sellado y analizar los datos adquiridos por los sensores incorporados en el banco de pruebas. Se detectaron que las principales variables críticas a analizar son: el tiempo de permanencia en la interfaz de sellado, la presión ejercida sobre la película y la temperatura sobre la superficie de sellado [54].

A continuación se definirán las principales variables que fueron registradas durante el proceso de sellado con el fin de estudiar el efecto de adhesión en la película multicapa. Para el análisis del comportamiento de las variables en el proceso se realizaron pruebas de pelado en T y observación mediante microscopio óptico de barrido.

### 3.6.1 Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia fue una variable que se cuidó escrupulosamente, ya que el experimento se diseñó con tiempos de permanencia muy cortos, es decir, 0.2, 0.3 y 0.4 [s]. Por lo cual fue utilizado un sensor láser ZX2-LDA de la marca OMRON® (figura 3.5) con una precisión de  $1.5 - 5 [\mu\text{m}]$  el cual permite medir la posición real del cilindro de la mordaza superior [42]. De tal manera que al determinar el tiempo de la posición del cilindro se logró determinar el tiempo de permanencia de contacto de la superficie de sellado con la película.



Figura 3.5: Sensor Láser ZX2-LDA [42].

### 3.6.2 Presión

La presión transmitida mediante energía neumática fue una variable esencial a censar debido a que dicha presión tiene que garantizar el contacto entre interfaz de sellado, pero tampoco puede exceder el esfuerzo de fluidez de la película a la temperatura requerida, ya que se generarían errores en el sellado, como se mencionó en la sección apartado 2.4.2.

El instrumento que nos permitió cambiar la presión para los diferentes experimentos fue un regulador de presión marca Festo®. Como se puede ver en la figura 3.6 el regulador de presión es alimentado por un compresor que mantuvo constante la presión del aire en 220 [psi], posteriormente el regulador disminuye la presión a 80, 90 y 100 [psi] y a su vez al considerar las especificaciones del cilindro de doble efecto y el área de sellado, se ejercerá una presión de 160, 180, 200 [psi] a la película, esto dependerá de la versión del experimento a [19].



Figura 3.6: Regulador de presión Festo® MS6-LFR-1/4-D7-ERM-AS.

### 3.6.3 Temperatura

Se utilizaron diferentes números de termopares según la configuración y versión de la mordaza. Pero siempre se utilizó el termopar mostrado en la figura 3.7. el cual es un termopar 5SRTC-TT-K-40-36 distribuido por OMEGA®. Del modelo SRTC (enchufe termopar tamaño miniatura y alivio de tracción del cable del termopar), TT que hace referencia al tipo de aislante PFA (*Perfluoralkoxy*), K que hace referencia al tipo de calibración, el número es 40, referente al calibre del alambre y por último 36 que es la longitud del alambre en pulgadas [41].

Mientras las terminales de los termopares se encontraban ubicadas monitorizando las diferentes zonas de la mordaza, el extremo contrario se conectó a la tarjeta de NI9213, el cual es módulo de entrada de termopares.

Para determinar las temperaturas del experimento fue requerido conocer la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del material de la película multicapa. Con ayuda del instituto de investigación de materiales de la Universidad Nacional Autónoma De México se realizó una calorimetría diferencia del barrido con el equipo DSC Q2000 TA instruments, se obtuvo 121.32 [°C], con este dato se pudieron fijar los 3 valores para los niveles experimentales de la temperatura, los cuales fueron: 125, 150, 175 [°C] [22].



Figura 3.7: Termopar 5SRTC-TT-K-40-36.  
[41]

### 3.7 Cálculo del calor implementado en el análisis numérico.

Como se mencionó con anterioridad, como parte de la validación del proceso de diseño, se realizaron simulaciones numéricas. Para ello fue requerido proponer la energía transferida mediante calor. Por lo que se realizaron cálculos utilizando diferentes leyes físicas enunciadas en el marco teórico referentes al cálculo de la energía transferida mediante conducción y convección.

Para iniciar el proceso de cálculo primero se analizaron los resultados del balance de energía mediante el mecanismo de transferencia de calor por conducción en estado estacionario, ya que para este trabajo solo es requerido conocer la distribución de la temperatura en un instante antes de que sea realizado el proceso de sellado. A continuación se realizaron los cálculos referentes a la transferencia de calor por el mecanismo de convección.

#### 3.7.1 Proceso de cálculo de la transferencia de calor por el método de conducción.

En primera instancia se presenta la tabla 3.6 que proporciona las especificaciones físicas de las diferentes versiones de mordazas. Estas especificaciones fueron obtenidas mediante el modelado geométrico 3D y cada una de las dimensiones cuidadosamente seleccionadas con el fin de cumplir los requerimientos de diseños. Y por último, el volumen y masa fueron obtenidos mediante la herramienta de “calcular” en el *software SolidWorks 2019*. Mientras que el calor específico ( $C_p$ ) es proporcionado por el fabricante de cada material en su hoja de datos.

Mediante la ecuación (2.1) se realizó un balance de energía que permitirá estimar el calor requerido para incrementar la temperatura de la masa de la mordaza (tabla 3.7)

Tabla 3.6: Especificaciones mordazas.

Versión	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Material	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Masa [g]	C <sub>p</sub> [J/g · °C]	A <sub>t</sub> [mm <sup>2</sup> ]
v0	666.94	Aluminio	2.7	1.801	0.97	60.48
v1	415.99	Macor	2.52	1.048	0.79	40.98
v2	685.61	Aluminio	2.7	1.851	0.97	29.69
v3	592.8	Aluminio	2.7	1.601	0.97	29.69
v4	564.53	Aluminio	2.7	1.524	0.97	28.04

Tabla 3.7: Calor requerido para elevar la temperatura de la mordaza.

Versión	Calor requerido			Unidades
	125	150	175	°C
v0	183.405	227.073	270.741	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$
v1	86.956	107.66	128.364	
v2	188.539	233.43	278.32	
v3	163.017	201.831	240.644	
v4	155.243	192.206	229.168	

Una vez alcanzada la cantidad necesaria de calor para incrementar la temperatura de la mordaza a cada una de las temperaturas requeridas en el proceso de experimentación, se calculó el calor generado por el alambre mediante el efecto Joule, sin olvidar considerar el cambio de la resistencia según la temperatura de operación como se describe en la ecuación (2.2). Lo cual se puede observar en las tablas a continuación.

En la tabla 3.8 se obtuvieron los diferentes valores de la resistencia eléctrica a las diferentes temperaturas a las cuales se realizó el proceso experimental. Se logra observar que los valores de la resistencia eléctrica y la temperatura incrementan a la par.

Tabla 3.8: Cambio de la resistencia del alambre de nicromo.

	Resistencia a diferentes temperaturas.			Unidades
	125	150	175	°C
Nicromo	$4.78 \times 10^{-2}$	$4.82 \times 10^{-2}$	$4.87 \times 10^{-2}$	$\Omega$

A continuación, usando la ecuación (2.3) se determinó el calor generado mediante el efecto Joule, el cual tiene como objetivo ser transferido a la mordaza y mediante conducción distribuirse por su geometría obteniendo la temperatura requerida. La cual será

detectada por los termopares y realizará el proceso de sellado por cartuchos.

Tabla 3.9: Calor generado en la resistencia durante 60[s].

	Calor generado			Unidades
	125	150	175	°C
Fuente de Calor	642	651	657	J
	10.7	10.85	11	W

Una vez conocido el valor del área de contacto en cada una de las versiones de mordaza diseñadas (tabla 3.6) y el valor del calor generado por el efecto Joule a diferentes temperaturas (tabla 3.9) se obtiene el calor trasferido del alambre de nicromo a la mordaza mediante el mecanismo de conducción de calor y los resultados se observan en tabla 3.10.

Tabla 3.10: Calor trasferido por el método de conducción.

Calor trasferido a través del área de contacto				Unidades
Versión	125	150	175	°C
v0	0.178	0.179	0.181	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{mm}^2} \right]$
v1	0.262	0.265	0.267	
v2	0.362	0.365	0.369	
v3	0.362	0.365	0.369	
v4	0.383	0.387	0.391	

### Proceso de cálculo de la trasferencia de calor por el método de convección.

A continuación se requirió obtener el flujo de calor de la mordaza al ambiente con el fin de sumarlo a la energía intercambiada por conducción y así obtener un flujo de calor aproximado, el cual será utilizado como un valor de entrada en la simulación numérica. Con el fin de realizar un proceso de validación optimizado, se optó por idealizar el proceso de los cálculos de convección y el proceso de simulación numérica como convección libre, es decir, con una velocidad del fluido igual a 0. Los demás datos presentados en tabla 3.11 fueron obtenidos mediante las herramientas de medición del *software Solidworks 2019* en el cual fueron diseñadas todas la versiones de mordaza.

En la tabla 3.12 se muestran los valores investigados del aire a una atmósfera de presión, y temperatura ambientes de 25[°C], estos valores fueron requeridos para los consecutivos cálculos de los números adimensionales involucrados en la trasferencia de calor por convección.

Enseguida se utilizaron las ecuaciones presentadas en el marco teórico para obtener los números adimensionales, comenzando por el número de Reynolds, que al analizar las

fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, las cuales dependen de la velocidad del fluido, pero al ser un análisis de convección libre la velocidad es cero y también el número de Reynolds.

Posteriormente, se obtuvo el número de Grashof el cual relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas de inercia ecuación (2.6), para obtener el número de Nusselt también es requerido obtener el número de Prandtl el cual relaciona viscosidad de un fluido con la conductividad térmica del mismo (ecuación (2.7)). Por último se obtuvo el número de Nusselt que se menciona de manera más apropiada como el coeficiente de transferencia de calor adimensional, por lo que es necesario para obtener el coeficiente convectivo (ecuación (2.8)) [9].

Después, se calculó el número de Grashof, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales, según ecuación (2.6). Para determinar el número de Nusselt, también es necesario calcular el número de Prandtl, que vincula la viscosidad de un fluido con su conductividad térmica, como se muestra en ecuación (2.7). Por último, se determinó el número de Nusselt, más apropiadamente denominado como el coeficiente de transferencia de calor adimensional, que es esencial para calcular el coeficiente convectivo.

Por último, se obtiene el calor transferido de la mordaza al aire, es decir, el calor que se pierde por convección en el momento inmediatamente anterior a que la mordaza ejerza presión sobre la película multicapa, antes de realizar el proceso de sellado. Esto se obtiene mediante la ecuación de la Ley de enfriamiento de Newton (tabla 3.14).

Al analizar los resultados del flujo de calor mediante convección (tabla 3.14) y compararlos con el flujo referente a la conducción (tabla 3.10) se observa que el flujo de convección es  $3.10 \times 10^{-3}$  veces más pequeño que el flujo transferido mediante conducción.

En la ecuación (3.2) se tomó el valor de la conducción para la mordaza  $v_1$  a  $125\text{ }^\circ\text{C}$  y se demuestra que al sumar los valores del flujo de calor no es relevante para el análisis por lo que para el análisis numérico que se muestra en la siguiente sección solo se tomó en cuenta el calor transferido mediante conducción.

$$[h]Q_t = \text{Conducción} + \text{Convección} = \text{Flujo de calor total} \quad (3.1)$$

Tabla 3.11: Datos obtenidos del planteamiento del fenómeno de convección.

Datos del planteamiento		
		Unidades
Velocidad ( $v$ )	0	[mm/s]
Tempertaura de la superficie ( $T_s$ )	125	[ $^\circ\text{C}$ ]
Temperatura del fluido ( $T_\infty$ )	25	[ $^\circ\text{C}$ ]
Área de contacto ( $A_s$ )	123.77	[ $\text{mm}^2$ ]
	$1.24 \times 10^{-4}$	[ $\text{m}^2$ ]
Longitud característica ( $L$ )	60	[mm]
	0.06	[m]

Tabla 3.12: Propiedades del aire a 1 atmosfera de presión y 25[°C] [9].

Propiedades del aire.		
		Unidades
Temperatura de la superficie ( $T_f$ )	125	[°C]
Densidad ( $\rho$ )	0.9535668	[kg/m <sup>3</sup> ]
Calor específico ( $C_p$ )	1.011384	[kJ/kg · K]
Viscosidad dinámica ( $\mu$ )	$2.16 \times 10^{-5}$	[Pa · s]
Conductividad térmica ( $\kappa$ )	$3.09 \times 10^{-2}$	[W/m · K]
Coefficiente volumétrico de expansión térmica ( $\beta$ )	$2.74 \times 10^{-3}$	[1/K]

Tabla 3.13: Cálculo de números adimensionales.

Cálculo del coeficiente convectivo		
		Unidades
Re	0	[1]
Pr	0.70781	[1]
Gr	$1.13 \times 10^6$	[1]
Nu	15.8175713	[1]
h	8.13	[W/m <sup>2</sup> ·K]

$$Q_t = 0.262 + 8.13 \times 10^{-4} = 2.63 \times 10^{-1} \left[ \frac{W}{mm^2} \right] \quad (3.2)$$

### 3.8 Configuración del sistema de control.

En la figura 3.8 se muestran los sistemas que conformaron el banco de pruebas, así como los equipos que fueron conectados en la configuración requerida para obtener las diferentes variables. La estructura principal hace referencia a la estructura que se diseñó en perfil de aluminio de diferentes dimensiones en la que se ubican todos los subsistemas. Se decidió instalar los actuadores neumáticos, en los puentes de soporte, de tal forma que se genere la línea de producción del sellado a lo largo de la estructura principal, del banco de pruebas.

El subsistema de sellado engloba las principales partes involucradas en generar el sellado sobre la película multicapa, como se ha mencionado con anterioridad, las mordazas se diseñaron considerando que en su interior tendría una fuente de calor (alambre de nichromo), y también se consideró una geometría particular para registrar la temperatura en diferentes puntos específicos del cuerpo de la mordaza. El pistón de doble efecto utilizado para mover la mordaza superior hacia la inferior, fue controlado mediante una electroválvula neumática.

El sistema de alimentación hace referencia al conjunto de instrumentos utilizados para desplazar y posicionar la tira de película multicapa. El funcionamiento consistió en presionar la películas entre dos pares de rodillos de goma con los que se logró tensar el material y sujetarlo para realizar el sellado. El funcionamiento de desplazamiento se consiguió mediante un sistema de banda y poleas con los que se relacionó mecánicamente al

Tabla 3.14: Cálculo del calor convectivo.

Flujo de calor trasferido mediante convección		
		Unidades
$Q_{conv}$	$1.01 \times 10^{-1}$	[W]
	813.475549	[W/m <sup>2</sup> ]
	$8.13 \times 10^{-4}$	[W/mm <sup>2</sup> ]

eje de un servomotor con uno de los rodillos de goma.

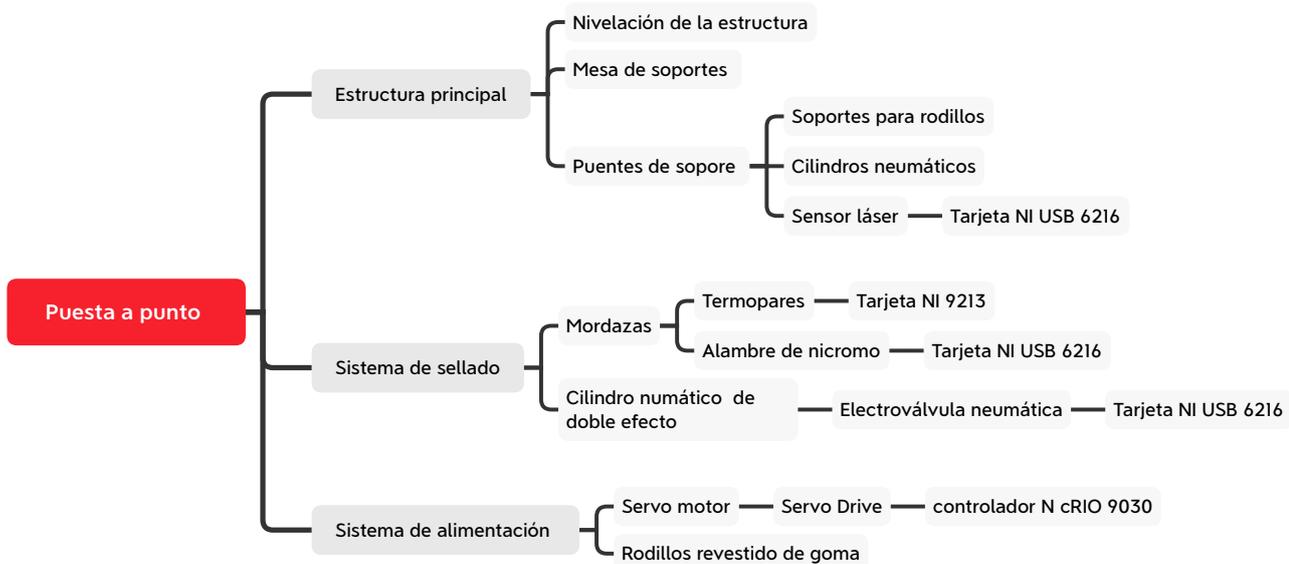


Figura 3.8: Puesta a punto del banco de pruebas.

En la figura 3.9 se muestra la configuración en la que se conectaron los sistemas eléctricos y los sistemas neumáticos. Como se puede observar, el módulo PXIe-6363 es el dispositivo de adquisición de datos que se decidió utilizar para conectar las demás tarjetas del sistemas de control. Esto, debido a la gran versatilidad de puertos de entrada, se utilizó para medir y adquirir señales analógicas y digitales. También es importante destacar su velocidad de muestreo que es de 1 [ms/s] [4].

Fue requerido utilizar un módulo de entrada de temperatura de la Serie C (tarjeta NI-9213) para poder adquirir la señal referente a la temperatura de la mordaza adquirida por los termopares [3]. Así mismo se conectó al módulo PXIe-6363 el dispositivo DAQ multifunción aislado (PXIe-6363), el cual fue utilizado para generar la señal que proporciona la energía eléctrica necesaria al alambre de nicromo, se utilizó la entrada analógica para recibir la información referente a la posición del cilindro de doble efecto y por último se utilizó la salida digital para controlar el sensor láser y la tarjeta de relés que a su vez controla la electro válvula neumática [5].

Retomando la electroválvula, este equipo permite accionar, mediante el control previamente mencionado, la posición del cilindro de doble efecto, cuya presión de funcionamiento

se encuentra configurada mediante el regulador de presión.

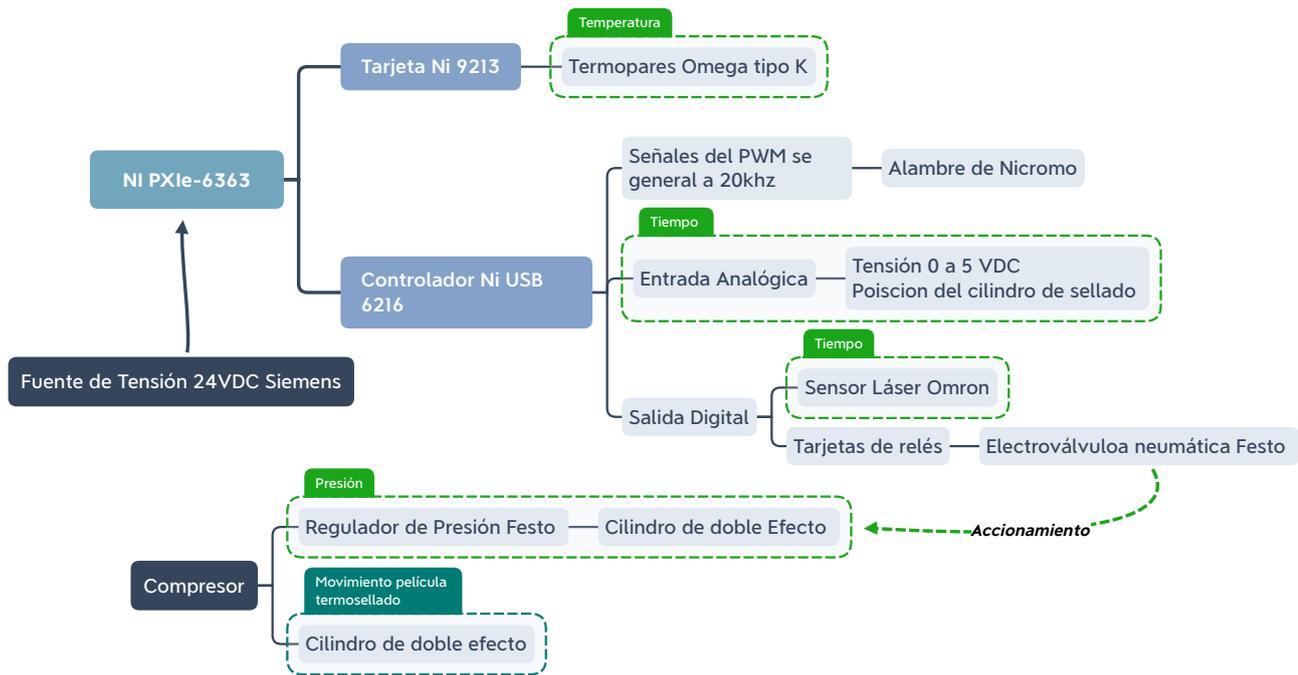


Figura 3.9: Funcionamiento del sistema eléctrico y neumático.

## 3.9 Proceso iterativo de versiones de mordaza.

Una vez cimentados las especificaciones de diseño y propuestos los conceptos solución, así como las variables críticas a analizar fueron identificadas y se obtuvo la energía de la fuente de calor utilizada en el análisis numérico, fue posible realizar las siguientes iteraciones de las diferentes versiones de mordaza en las que se obtuvieron consideraciones de rediseño a partir de los datos obtenidos por el análisis numérico y el análisis experimental.

### 3.9.1 Proceso de diseño de la mordaza v1.

Esta es la mordaza que fue diseñada en el material MACOR. El primer paso para realizar el diseño geométrico de la mordaza v1 fue realizar mediciones de los termopares y seleccionar la configuración más adecuada que permitió generar la siguiente iteración del banco de pruebas automatizado. Por lo tanto, fue necesario garantizar que la variación de la temperatura sobre la superficie de sellado fuera la mínima registrada antes de realizar el proceso de experimentación requerido.

Para tomar las decisiones en cuanto a la configuración de la posición de los sensores de temperatura y de la fuente de calor, se consideraron las especificaciones presentadas en [28], en la que se menciona que se requieren sensores adyacentes a la fuente de calor para prevenir sobre calentamientos y también se requieren sensores cercanos a la superficie de sellado con el fin de conocer la temperatura del proceso.

El espacio de los termopares fue diseñado tomando en cuenta que se requiere tomar la temperatura en el centro de la mordaza. Para lo cual fue requerido hacer dos tipos de barrenos. El de primer tipo se diseñó para introducir los termopares sin considerar la zona del aislante y fueron requeridos 3 barrenos ubicados en la parte más cercana a la superficie de sellado. Mientras que se requirieron 2 barrenos del segundo tipo, el cual considera el aislante del termopar, ubicados entre los espacios para el alambre de Nicromo (figura 3.11).

Se decidió dicha configuración para la mordaza v1 con el fin de tener un mayor número de termopares que registren la temperatura en puntos específicos con el objetivo de estudiar el comportamiento de la temperatura durante el proceso de sellado y al mismo tiempo tener más datos útiles en el proceso de automatización y control del banco de pruebas. Por lo que se obtuvieron las dimensiones de la superficie de sellado ilustrado en la figura 3.10. Este tamaño de superficie solo es usado en esta versión de mordaza, ya que en la búsqueda de incrementar la instrumentación utilizada, las siguientes versiones implementarán una configuración distinta.

### Validación numérica de la mordaza v1

Siguiendo el diagrama del proceso de diseño (figura 2.1) en el cual se destaca la fase de evaluación para el cual se realizó un proceso de experimentación para posteriormente validar la mordaza de sellado. Este proceso de validación se realizó primeramente mediante simulaciones numéricas por el método de elementos finitos con el fin de analizar los resultados obtenidos y tomar decisiones de diseño. En las siguientes secciones se menciona el método de manufactura implementado y finalmente se planeó un proceso de experimentación con el fin de validar el modelo físico utilizado y así obtener conclusiones de los objetivos planteados.

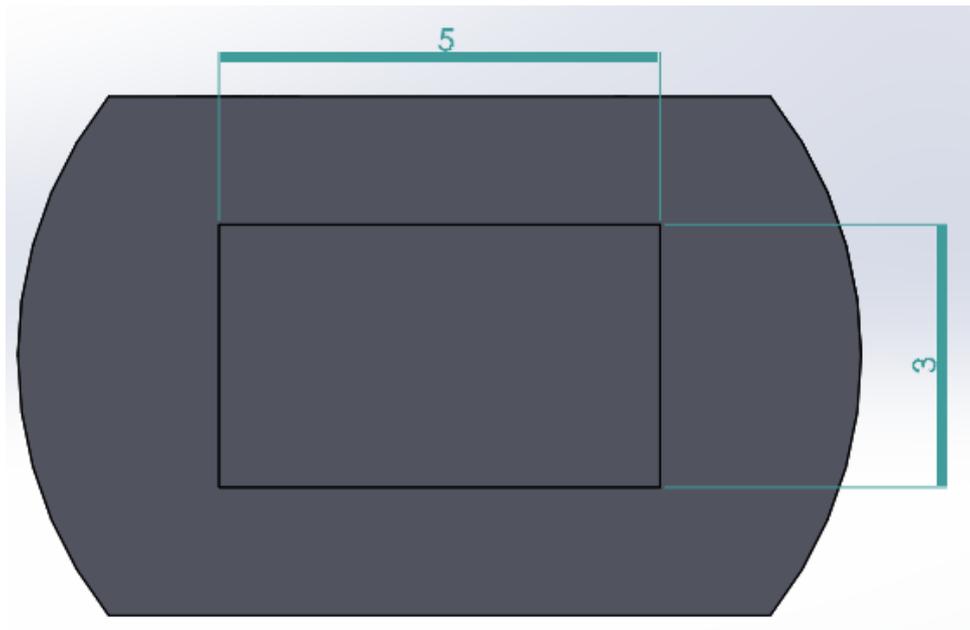


Figura 3.10: Dimensión en milímetros de la superficie de sellado v1 (vista de planta).

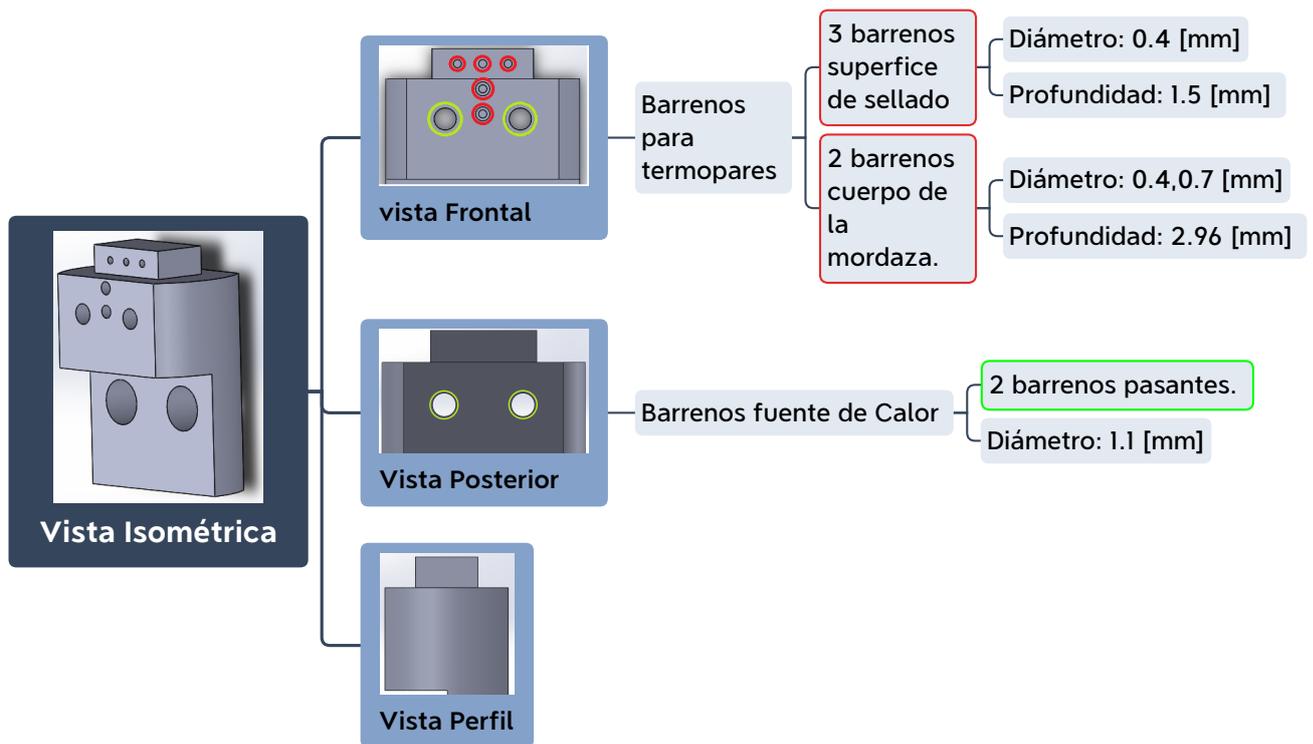


Figura 3.11: Especificaciones mordaza v1.

### Análisis térmico de la Mordaza v1.

Como se mencionó previamente, se realizó un análisis térmico en estado estable. Ya que solo se requiere validar la distribución de temperatura, los gradientes de temperatura y el flujo de calor en la superficie y el cuerpo de la mordaza para comparar los materiales y geometrías de las versiones de mordazas entre sí.

En la figura 3.12 se destacan en color azul las superficies de la mordaza que no tienen aislante, es decir, las paredes que tienen interacción con el medio ambiente, y tienen transferencia de calor mediante convección.

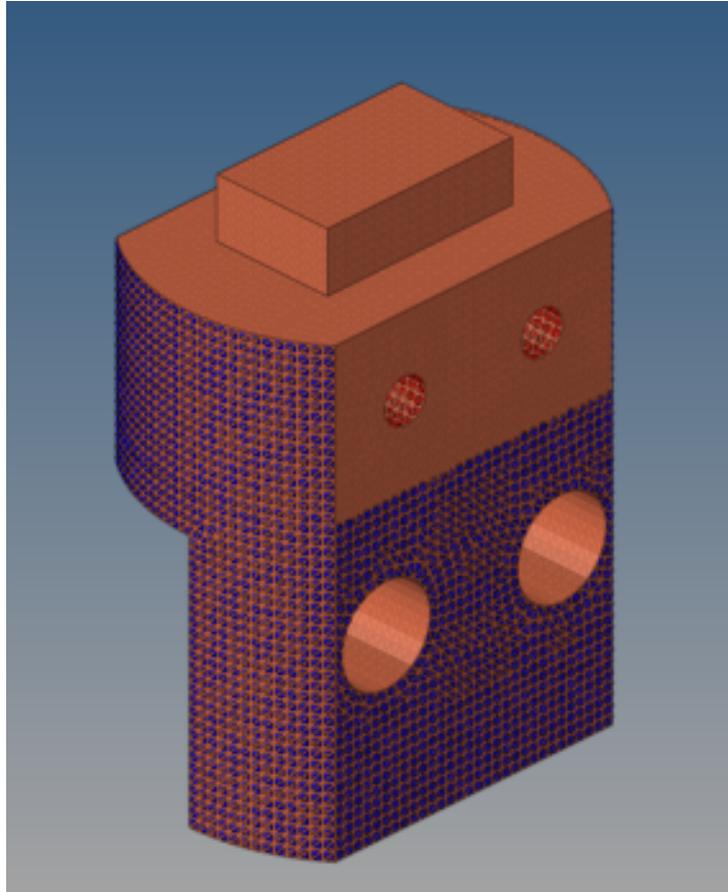


Figura 3.12: Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección mordaza v1.

En la figura 3.13 se observa la distribución del flujo de calor en la que se puede observar la cantidad de calor que pasa a través de cada elemento en el modelo de análisis, esta energía es suministrada por la fuente de calor, que en este caso es el alambre de nicromo. La versión 1 de la mordaza se diseñó pensando en tener una optimización energética, debido a ello se optó por tener mayor superficie de transferencia de calor, por lo que fue necesario realizar dos barrenos por los cuales pasará el alambre de nicromo.

Los resultados sobre el flujo de calor permitió observar la tasa de transferencia de calor mediante el mecanismo de conducción a través de cada uno de los elementos en los que se dividió el modelo, en la figura 3.13 se observa el flujo de calor utilizando un gráfico de contorno, con el cual podemos identificar que las zonas con un mayor flujo de calor corresponden a las cercanías de la fuente de calor. De la figura 3.14 se pueden apreciar la visualización de los vectores con las componentes X, Y y Z del campo de flujo de calor, de la misma forma que el gráfico por contorno, los vectores se encuentran diferenciados por el color de magnitud del flujo, pero la información extra que proporciona este tipo de gráficas es la dirección de los vectores, en dónde se logra observar que el flujo de calor se aleja radialmente buscando converger en la esquina inferior del cuerpo superior de la

mordaza alejándose de la zona central y superior.

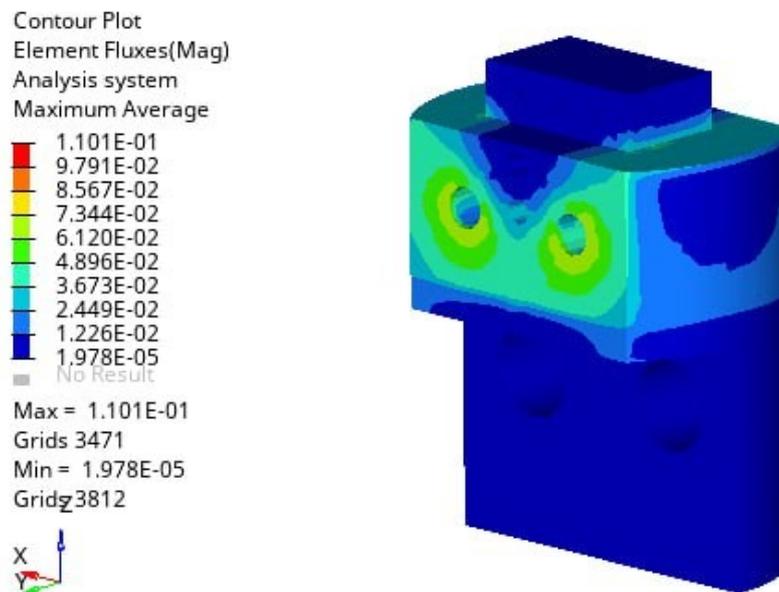


Figura 3.13: Distribución del flujo de calor de la mordaza v1.

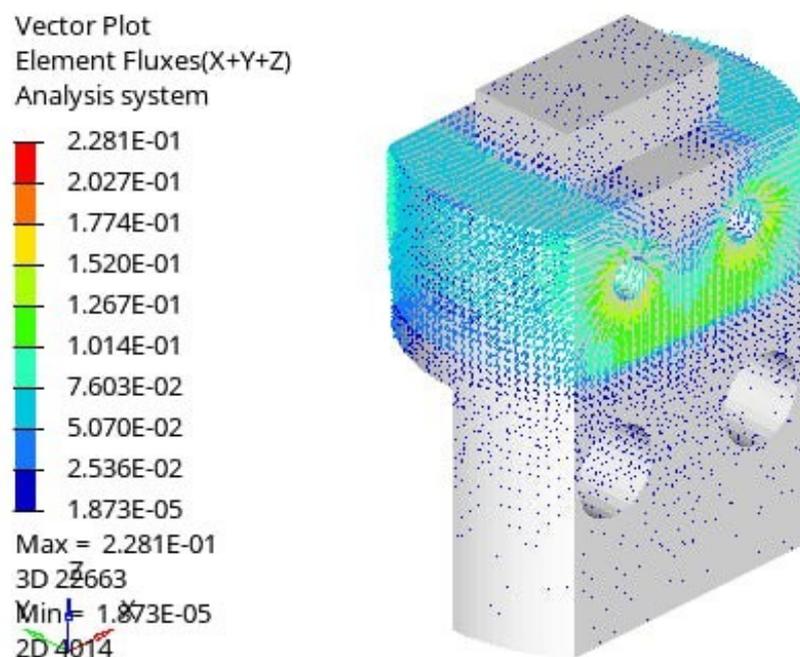


Figura 3.14: Distribución del flujo de calor representado con vectores de la mordaza v1.

La distribución del gradiente de temperatura permite observar la variación de la temperatura con respecto a la geometría del componente. Como se puede observar en la figura 3.15 la distribución es la misma que el flujo de calor, ya que el gradiente de temperatura sigue el patrón de la dirección del flujo de calor. Pero el gradiente de temperatura nos permitió observar un aspecto en particular, ya que como se mencionó con anterioridad,

un problema importante fueron los altos gradientes de temperatura sobre la superficie de sellado, los cuales provocaron distorsiones en el sellado de las películas y no permite un estudio correcto de la huella. Para esta versión se tiene un gradiente de temperatura de  $6.194 \times 10^{-3}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ] sobre la superficie de sellado.

Por último se obtuvo el resultado de la distribución de temperatura (figura 3.16), la cual, a diferencia del gráfico de gradientes de temperatura, muestra la distribución general de la temperatura sobre el cuerpo de la mordaza, mostrando las zonas de mayor y menor temperatura. En el que se puede observar que la mayor temperatura de  $135$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] se ubica en la zona de contacto de la fuente de calor (alambre de nicromo) con el cuerpo de la mordaza. La temperatura sobre la superficie de sellado en la parte central fue  $122.3$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

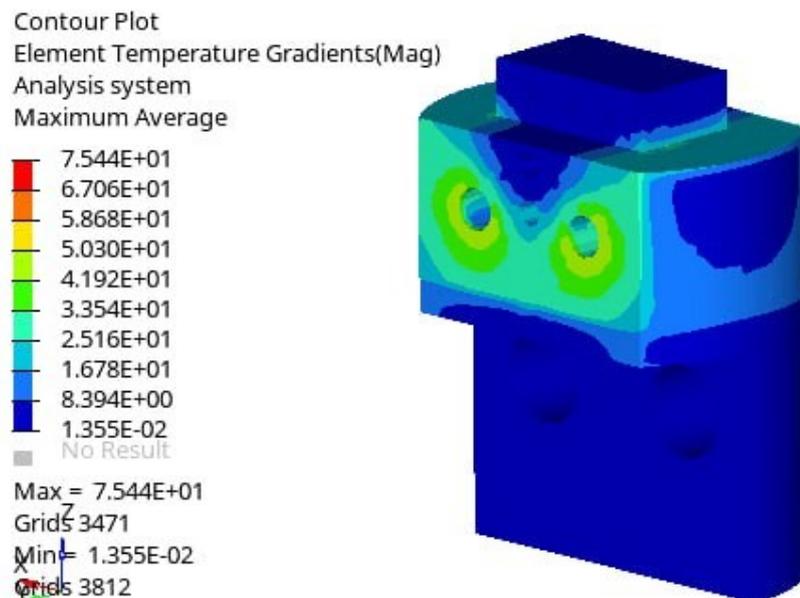


Figura 3.15: Gradiente de temperatura de la mordaza v1.

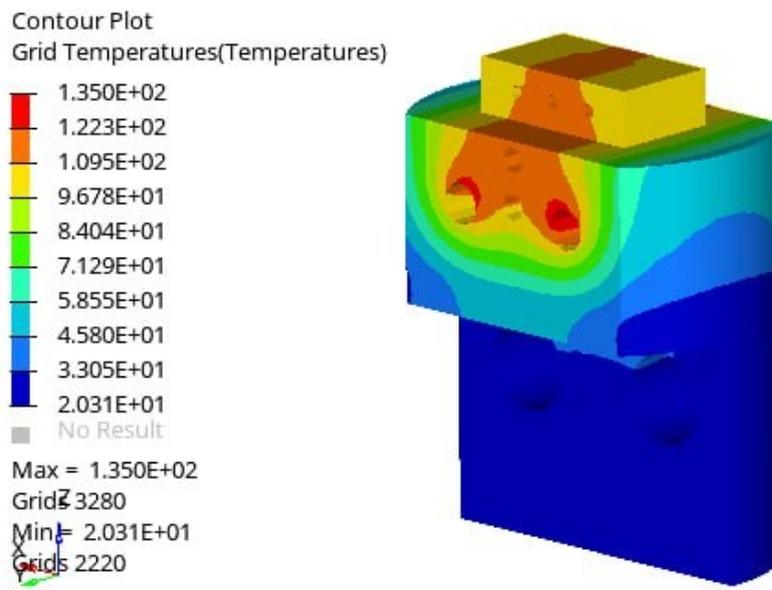


Figura 3.16: Distribución de temperatura de la mordaza v1.

### Validación experimental de la mordaza v1.

Para esta versión de mordaza se decidió realizar una fase de validación del diseño, en el que era requerido un sellado continuo de 120 sellados por minuto, con una temperatura en la superficie de sellado fijada en 150 [°C]. Para el cual se usaron diversos instrumentos de medición, como se detallará en el Capítulo 5.

En la figura 3.17 se observa una fotografía de un acercamiento del banco de pruebas, en donde se puede apreciar de forma detallada las mordazas cerámicas (v1) momentos antes de comenzar el proceso de sellado, se logra ver el silicón aislante implementado para aislar térmicamente la mordaza del porta mordaza. En la parte central entre las mordazas se puede ver la película multicapa tensa por los rodillos de goma en ambos extremos.

La variable más importante para esta investigación es la temperatura de la interfaz de sellado. Así que se registró la temperatura sobre diferentes puntos del cuerpo de la mordaza y a continuación, en el gráfico 3.1 y gráfico 3.2, se muestran las gráficas de la señal registrada por los termopares durante el calentamiento de la mordaza inferior de dos diferentes procesos de experimentación.

En el gráfico 3.1 se observa un proceso de calentamiento de la Mordaza v1 inferior, existen dos principales características de esta gráfica, en primer lugar se observa la señal obtenida por los termopares en las posiciones central y resistencia, existe una oscilación de la temperatura durante el proceso de calentamiento, obteniendo los picos más altos de temperatura, este comportamiento se repite en las demás posiciones, pero se ve atenuado debido a que los termopares sobre la superficie de sellado se alejan de la fuente de calor y existe mayor interacción de transferencia de calor por convección con el ambiente. También es necesario resaltar que la temperatura correspondiente a la posición lateral de la superficie de sellado siempre permaneció 11[°C] menor con respecto a las demás.

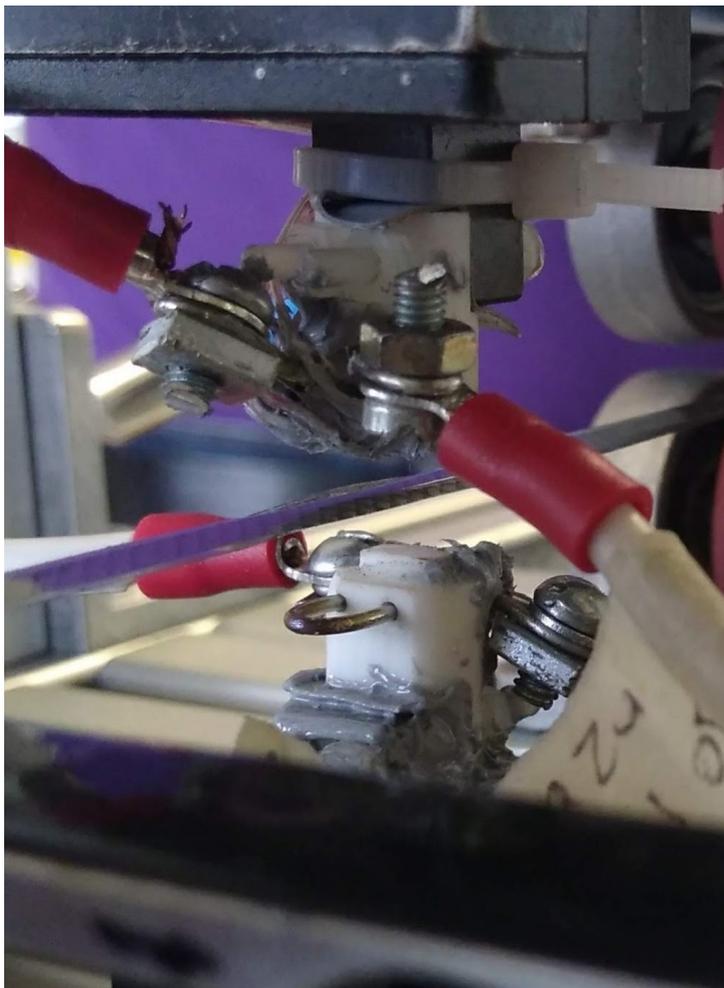


Figura 3.17: Proceso de validación experimental de la mordaza v1.

El comportamiento de la temperatura en el gráfico 3.2 se muestra de forma similar con la diferencia que con respecto al gráfico 3.1 la oscilación de la temperatura se ve atenuada en gran medida después del minuto 2. La generación de ambas gráficas servirá como comparación respecto a los resultados del proceso de validación experimental de las siguientes versiones de mordaza.

## Temperatura en la mordaza de MACOR 1

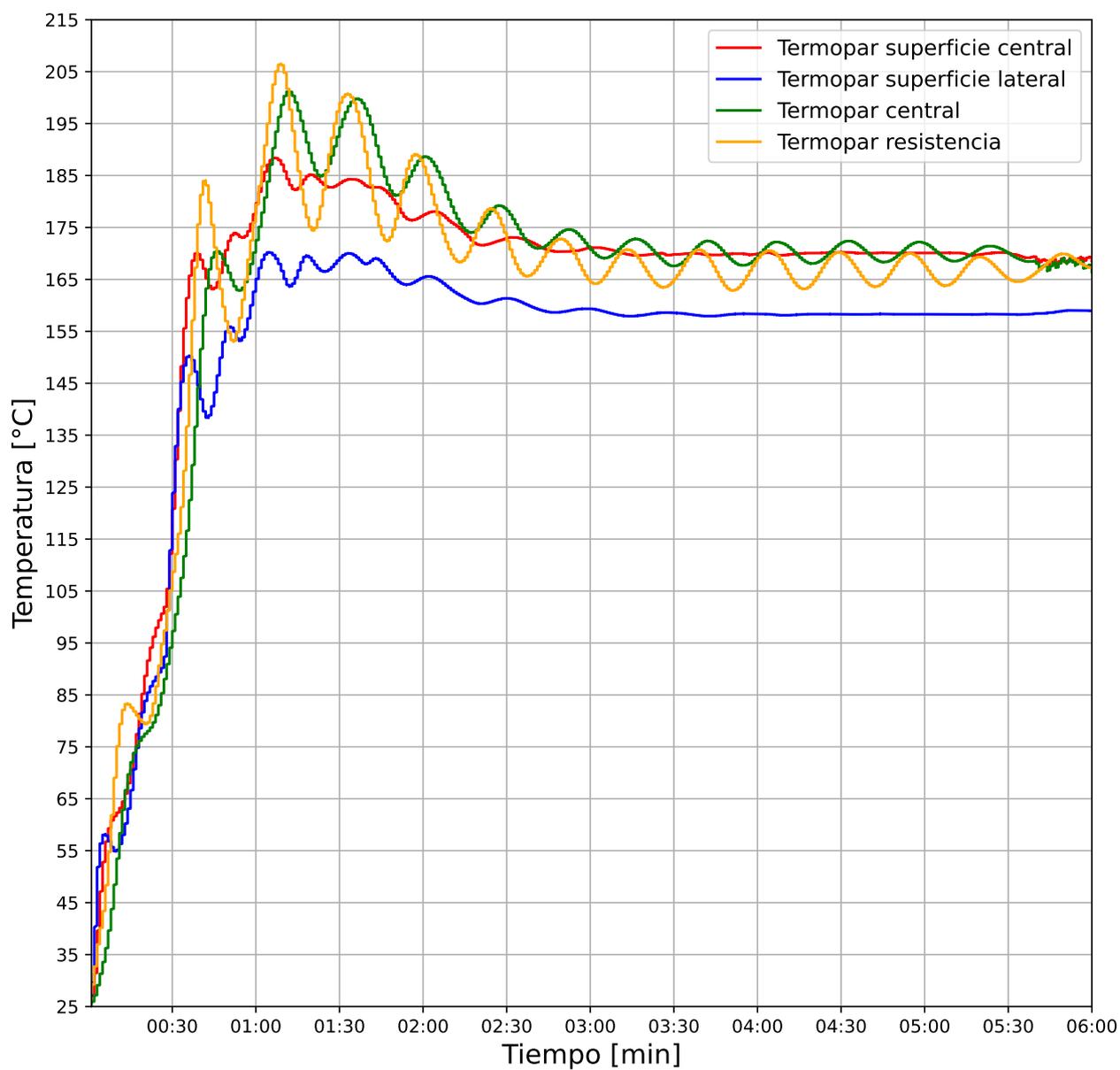


Gráfico 3.1: Comportamiento de la temperatura en la mordaza v1 a 175 [°C].

## Temperatura en la mordaza de MACOR 2

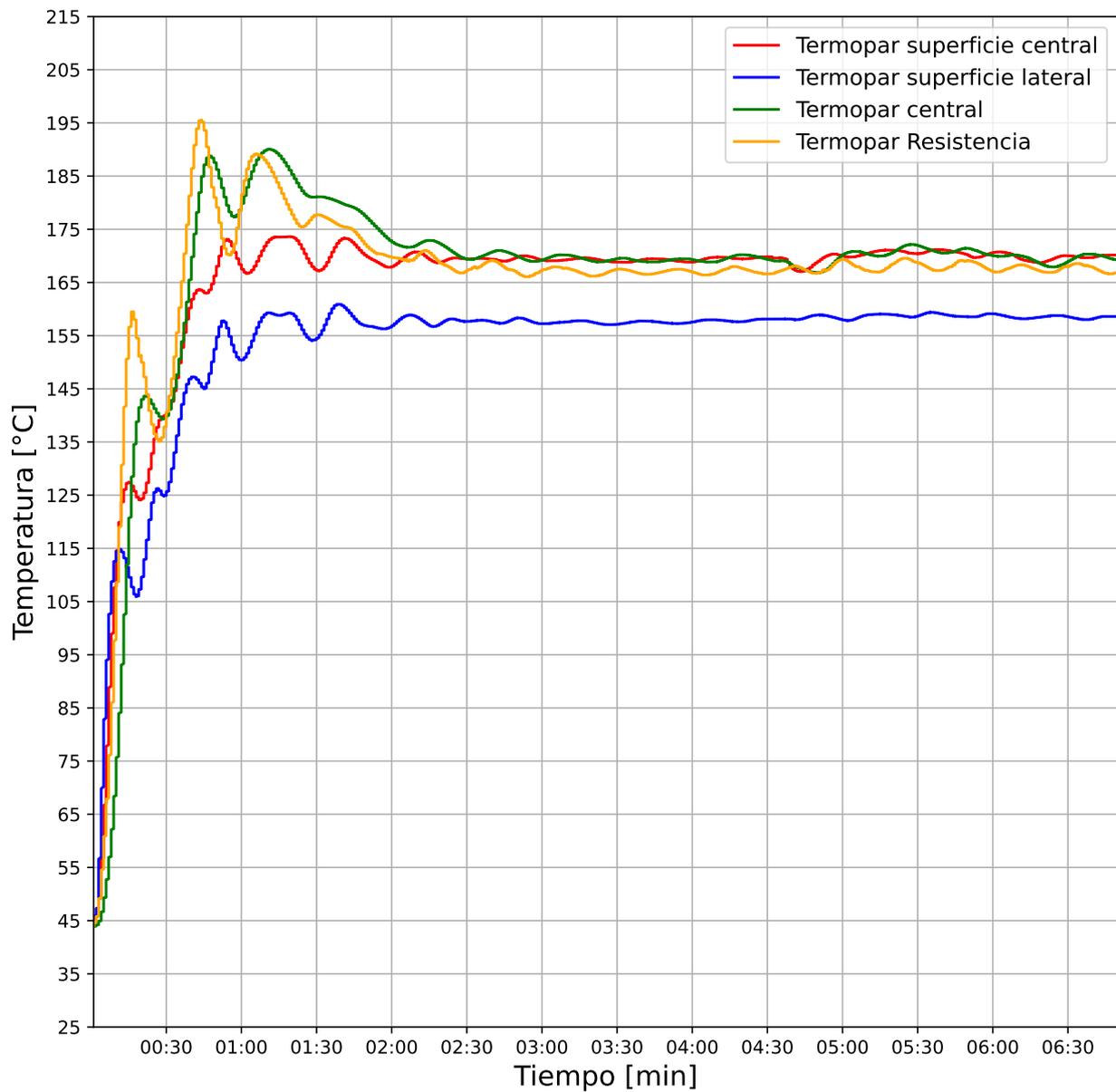


Gráfico 3.2: Comportamiento de la temperatura en la mordaza v1 a 175 [°C].

### Consideraciones de rediseño de la mordaza v1.

- Los barrenos destinados para la colocación de los termopares sobre la superficie de la mordaza se encontraban muy cerca uno del otro, por lo que su colocación manual fue compleja.
- A pesar de que los dos barrenos utilizados para hacer pasar el alambre de nicromo aumentan el área de transferencia de calor por conducción, también resultaron en una configuración compleja para instrumentar la mordaza, ya que dicha configuración no permite suficiente espacio entre los cables de los termopares y el alambre de nicromo incrementando el riesgo de contacto, lo cual quemaría el aislante de los termopares.
- El MACOR al ser un material cerámico, cuenta con propiedades térmicas particulares para este tipo de materiales, como un bajo valor de conductividad térmica, por lo que actúa como aislante o un escudo de transferencia de calor mediante conducción.
- La dirección del flujo de calor se dirige a la zona con mayor masa del cuerpo de la mordaza, para posteriormente dirigirse a la parte superior. Esto siguiendo la segunda ley de la termodinámica.
- A partir del proceso experimental se concluyó que el uso de un material cerámico es viable para sellar las muestras y aislar la corriente eléctrica, por lo que se obtuvo una señal nítida. Esto permitió analizar el fenómeno desde el punto de vista de la temperatura durante el calentamiento y a su vez generar retroalimentación hacia el controlador PID para así regular la energía implementada a la fuente de calor.

De la misma forma, durante el proceso de validación experimental se lograron obtener sellados cuya resistencia de adhesión de la película multicapa fueron estudiados por otros proyectos enfocados en analizar las variables críticas del proceso.

- Se obtuvo a partir del proceso experimental, el gráfico 3.1, en donde se puede observar que los termopares más cercanos a la fuente de calor lograron describir el comportamiento del controlador PID. Ya que el controlador intenta ajustar el valor de salida de los pulsos eléctricos que suministran la fuente de calor, pero la retroalimentación de los termopares es demasiado lenta debido a la baja conductividad térmica del material cerámico.

Este fenómeno puede confirmarse al observar el comportamiento de la temperatura en la superficie de sellado. Puesto que esta posición se encuentra alejada de la temperatura de la fuente de calor y solo describe el proceso de calentamiento de una región a la cual el flujo de calor incrementa la temperatura después de transportarse por el cuerpo de la mordaza.

- En el gráfico 3.2 se puede observar un cambio con respecto a las fluctuaciones debido a que el MACOR al ser un material cerámico puede almacenar energía en forma de calor durante mayor tiempo con respecto a materiales metálicos, debido a ello las fluctuaciones mayormente observadas en los termopares cercanos a la fuente de calor, se ven atenuadas debido a un proceso de calentamiento previo.
- Como ya se ha analizado con anterioridad, existe una variación de temperatura sobre la superficie de sellado durante el proceso de calentamiento. En la figura 3.16

se observó en la gráfica de colores por contorno que representa la distribución de la temperatura, existen dos regiones, una representa la temperatura central en color naranja correspondiente a 122 [°C] y los laterales de la mordaza en color amarillo que se observó menor temperatura correspondiente a 109.5 [°C].

Este comportamiento se ve repetido en las gráficas correspondientes a los resultados de la validación experimental, en donde se encuentra una diferencia de temperatura, coincidiendo con los resultados de la validación mediante análisis por elemento finito.

### 3.9.2 Proceso de diseño de la mordaza v2.

Siguiendo los aprendizajes de la mordaza v1, después de haber realizado la fase de evaluación, se generaron conceptos de solución, para las versiones siguientes se agregaron nuevos requerimientos, ya que a partir de los datos adquiridos durante la fase de validación o la interacción con el usuario en la fase de puesta a punto del banco de pruebas se describieron oportunidades de mejora.

Cómo primer punto se incrementó el área de superficie de sellado en un 62.5 %, es decir de 15[mm<sup>2</sup>] a 40[mm<sup>2</sup>] como se puede ver al comparar la figura 3.10 y la figura 3.18. Esto con el fin de tener un mayor espacio para lograr colocar los termopares manualmente. La configuración de la posición de los termopares también fue modificado como otro método para facilitar la colocación de los termopares.

Para esta versión se consideró el uso de un cople cerámico manufacturado en MACOR, y el cuerpo de la mordaza fabricado en aluminio, generando una mordaza “compuesta”. Debido a las propiedades dieléctricas del MACOR se obtuvieron señales de salida nítidas adquiridas por los termopares en las posiciones requeridas sobre el cuerpo de la mordaza v1. Por lo que se planteó unir las mejores características de ambos materiales, la alta conductividad térmica del aluminio y la baja conductividad eléctrica del MACOR, ambas propiedades se pueden observar en la sección selección de material (tabla 3.2 y la tabla 3.3). Las especificaciones geométricas para esta versión se encuentran sintetizadas en la imagen figura 3.19.

En este concepto de solución hubiera sido requerido un análisis térmico entre la interacción de las superficies de aluminio y MACOR, para observar el comportamiento del flujo de calor entre el ensamble de ambos componentes. Así como una pieza cilíndrica del material cerámico. Para obtener este elemento mecánico dieléctrico, se analizó implementar operaciones de torneado. Durante la fase de disponibilidad del equipo de la planeación del proceso de maquinado, se detectó que no se contaba con las dimensiones del material de partida suficiente.

Por lo que se decidió finalizar el desarrollo del proceso de diseño para esta versión, a pesar de haber generado diferentes propuestas de diseño geométrico para el mismo concepto solución, se decidió generar una nueva versión con un concepto distinto para la mordaza v3.

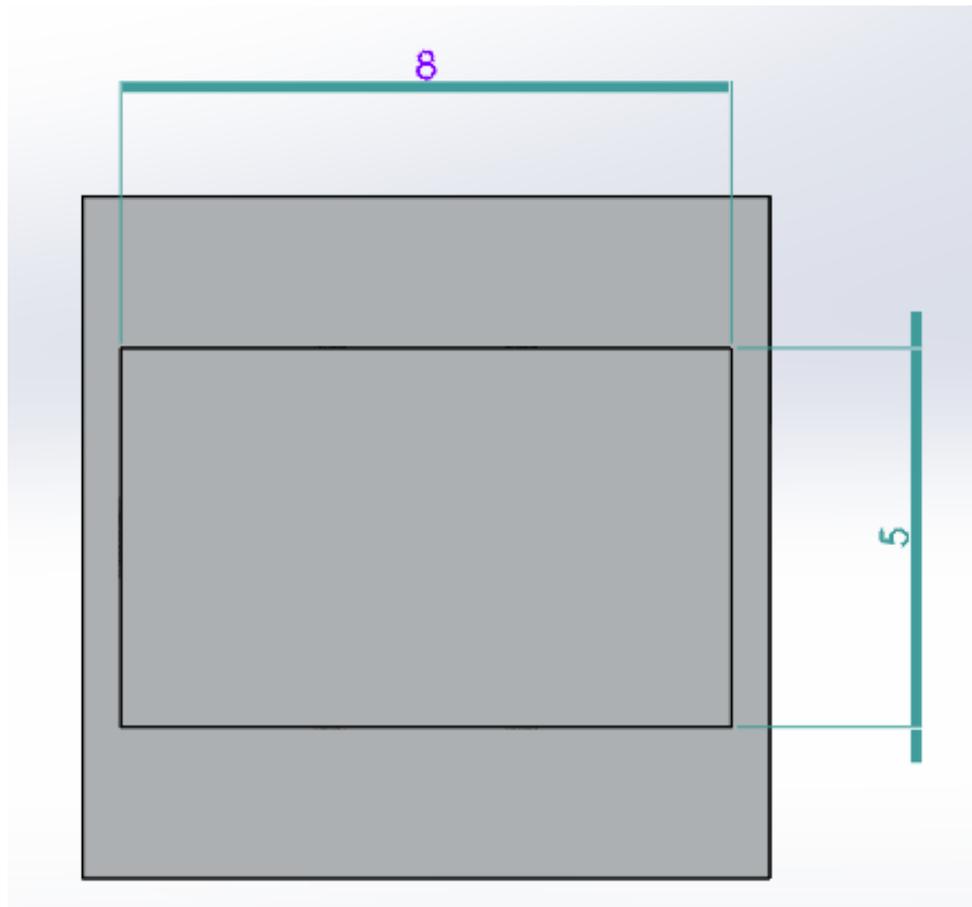


Figura 3.18: Dimensión en milímetros de la superficie de sellado de las mordazas v2 y v3 (vista de planta).

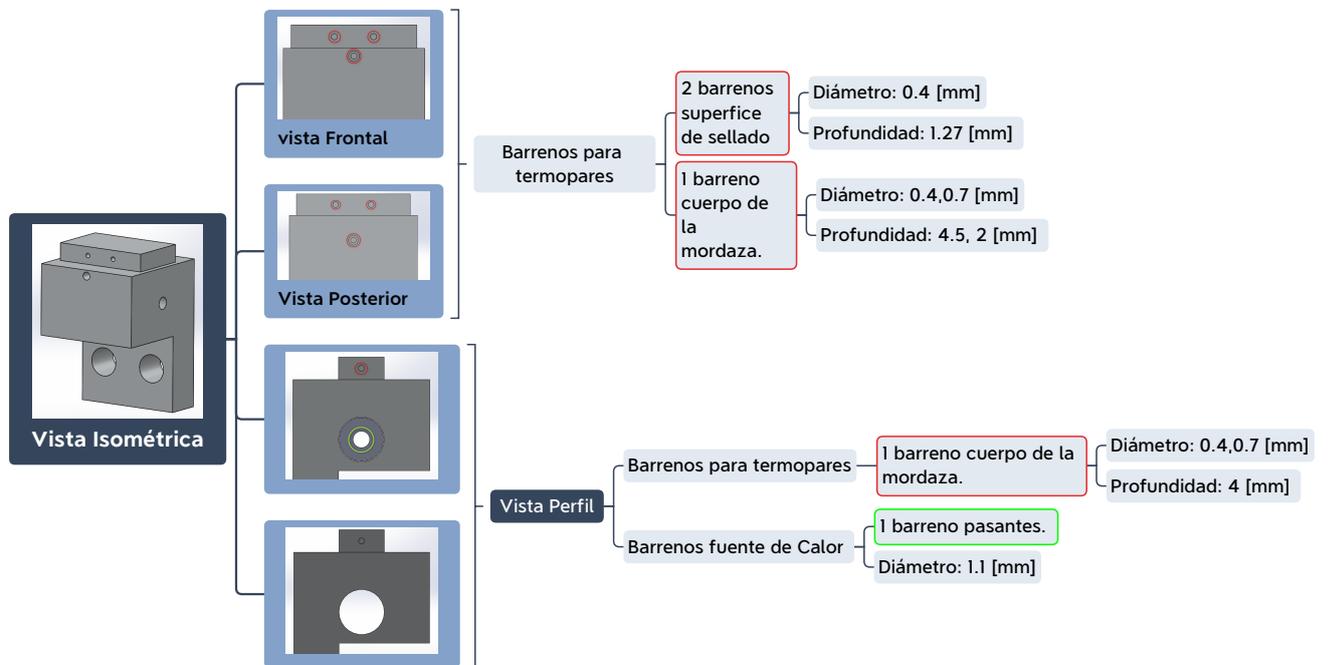


Figura 3.19: Especificaciones geométricas mordaza v2.

### 3.9.3 Proceso de diseño de la mordaza v3.

Partiendo de las consideraciones de rediseño obtenidas después de la fase de validación de la mordaza v1 y del concepto planteado para el diseño de la mordaza v2. Se generó un concepto de solución para la mordaza v3. Para ello se decidió utilizar aluminio por sus propiedades térmicas, las cuales se pueden observar en la tabla 3.3, como principal diferencia se puede observar la conductividad térmica, la cual es más de 100 veces mayor a conductividad térmica a las temperaturas de sellado con respecto al MACOR.

Otro tema importante que se tuvo que abordar al regresar al aluminio como material para la fabricación de mordaza, fue el ruido en la señal adquirida por los termopares debido a los pulsos de la resistencia eléctrica que se utiliza como fuente de calor. Ya que el aluminio al ser un material metálico es un buen conductor eléctrico (tabla 3.3) y tomando en cuenta uno de los errores de los termopares mencionado en el marco teórico, es importante que no existan campos eléctricos que perturben la señal de temperatura obtenida por los termopares. Fue requerido encontrar una forma de aislar la corriente eléctrica hacia los termopares.

Para ello se decidió utilizar el barniz marca *Royal-Diamond*® el cual es un barniz de impregnación para metal, dieléctrico utilizado en motores y transformadores. El tipo de secado es el horno y tiene una resistencia térmica de 180[°C]. Por lo que fue necesario sumergir el alambre de nicromo a implementar como resistencia y a su vez como fuente de calor para el sistema en el barniz de poliuretano y posteriormente llevarlo a un proceso de secado en un horno a 150[°C] por aproximadamente una hora hasta lograr la impregnación correcta sobre el metal [16].

En la figura 3.20 se muestran las especificaciones geométricas de la mordaza v3. En la vista frontal se pueden observar 2 barrenos correspondientes a la posición de los termopares, los cuales registrarán la temperatura de la superficie de sellado colocado a una distancia de 2.5[mm] entre sí, para permitir registrar la diferencia de temperatura entre estos dos puntos. En esta vista también se muestra un barreno de termopar sobre el cuerpo de la mordaza, el cual se encuentra en el centro de la mordaza. En la vista posterior se decidieron colocar los termopares de la superficie de sellado de forma simétrica con respecto al plano generado por la vista lateral. Con la diferencia de que el barreno central se encuentra 1.25 [mm] abajo del barreno central mostrado en la vista frontal.

En la vista de perfil se puede observar una barreno que permite ubicar el termopar en el centro de la superficie de sellado. Para facilitar la colocación de los termopares se tomó la decisión de colocar este termopar desde un lado de la mordaza. De esa forma solo existen máximo dos termopares a colocar en cada superficie, con una distancia suficiente entre cada barreno, lo cual permite una instrumentación sencilla. En esta misma vista se logra apreciar el barreno que permite colocar el alambre de nicromo, cuya función es suministrar el flujo de calor al sistema.

#### Validación numérica de la mordaza v3.

Como fase del proceso de diseño, fue requerido realizar un proceso de validación numérica. Para lo cual se hizo uso, al igual que para la validación de la mordaza v1, el software especializado en simulación mediante elementos finitos *Hyperworks*® mediante su com-

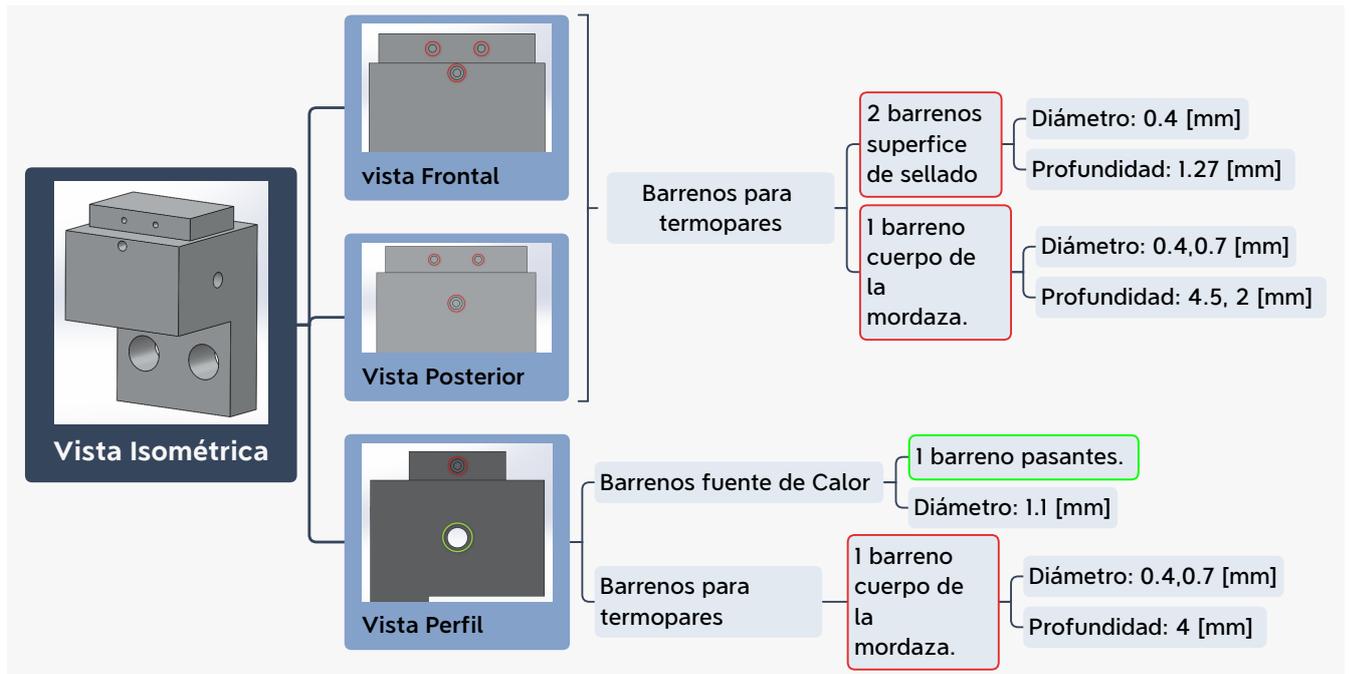


Figura 3.20: Especificaciones geométricas de la mordaza v3.

plemento *Hypermesh*® para realizar la malla de los elementos, y se utilizó el solucionador *Optistruc*®, principalmente implementado para análisis estructurales, modales, de optimización y por supuesto análisis térmicos.

De la misma forma que para la mordaza v1, se decidió realizar un análisis térmico en estado estable en el que se involucra la transferencia de calor mediante conducción y convección. Para lo cual fueron requeridas las propiedades del aluminio registradas en la tabla 3.3 y las propiedades del aire registradas en la tabla 3.12. al realizar este análisis se busca obtener los resultado de la distribución del flujo de calor, de temperatura y del gradiente de temperatura sobre el cuerpo de la mordaza y la superficie de sellado.

### Análisis térmico de la mordaza v3.

En la figura 3.21 se observa una fase del proceso de simulación térmica de la mordaza, la cual consistió en seleccionar las superficies de la geometría de la mordaza que tendrían transferencia de calor mediante mecanismo de convección. Esto debido a que algunas de las superficies de la mordaza se cubrieron con silicón cuya función fue aislar térmicamente la mordaza (figura 3.3) con respecto al porta mordaza mediante una película de silicón y silicón líquido para sujetar los termopares en su posición, estas superficies se comportaban térmicamente aisladas con respecto a la transferencia de calor por convección.

El flujo de calor distribuido en el cuerpo de la mordaza se observa en la figura 3.22. Como se mencionó con anterioridad, esta gráfica permite observar el contorno de las zonas con mayor flujo de calor, es decir, el comportamiento del flujo de calor siguiendo la segunda ley de la termodinámica, de la zona de mayor temperatura hacia las zonas más frías. Para este análisis, las zonas con mayor flujo de calor se presentan en los alrededores del barreno de la fuente de calor sobre las superficies laterales del cuerpo de la morda-

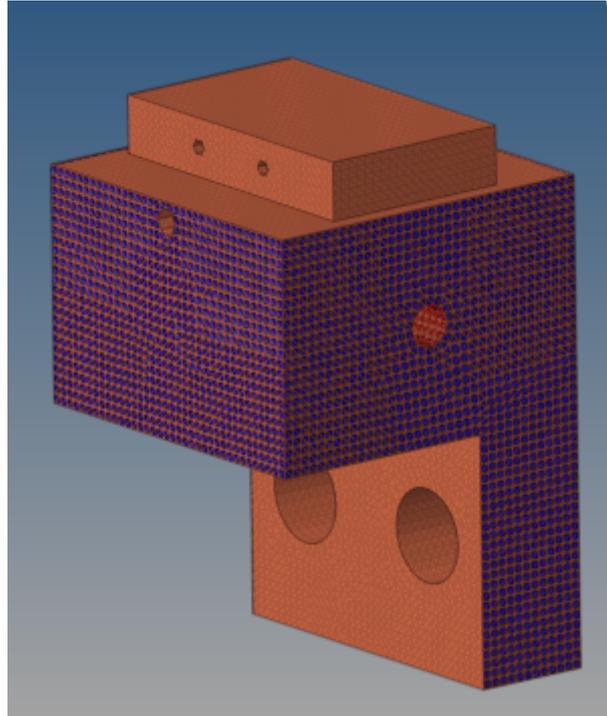


Figura 3.21: Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección de la mordaza v3.

za. Así como en los cambio de geometría, aristas, vértices y barrenos. Para la geometría propuesta, los mayores cambios de geometría se encuentran en el ensamble con el porta mordaza.

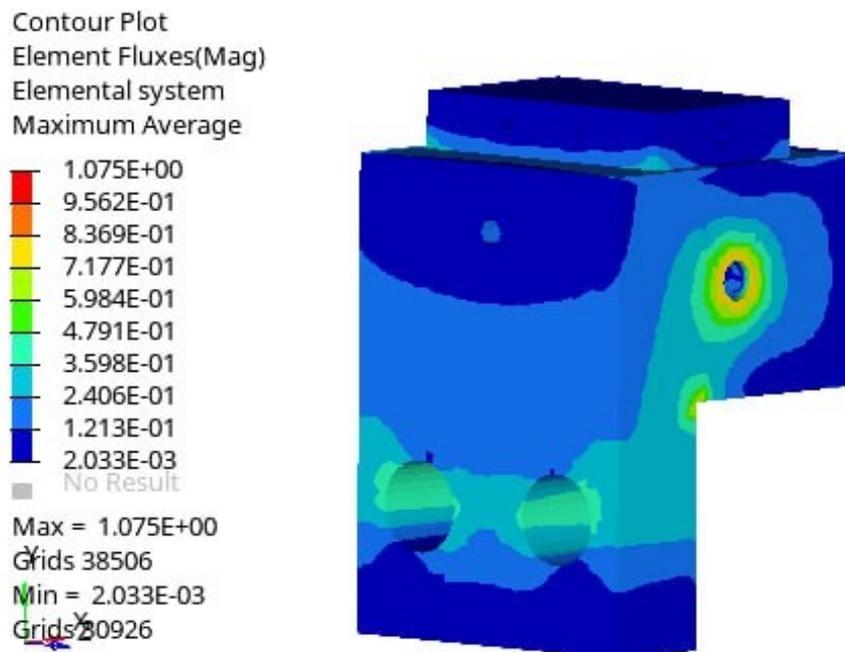


Figura 3.22: Distribución del flujo de calor de la mordaza v3.

La gráfica de la distribución de calor en su modalidad de vectores nos permite observar

la dirección del flujo de calor. En la figura 3.23 se aprecia que el flujo de calor se distribuye de forma radial al barreno de la resistencia en los primeros milímetros más cercanos a la fuente de calor, y al alejarse se concentra en la zona del ensamble con el porta mordaza, para posteriormente dirigirse hacia la superficie de sellado disminuyendo su valor.

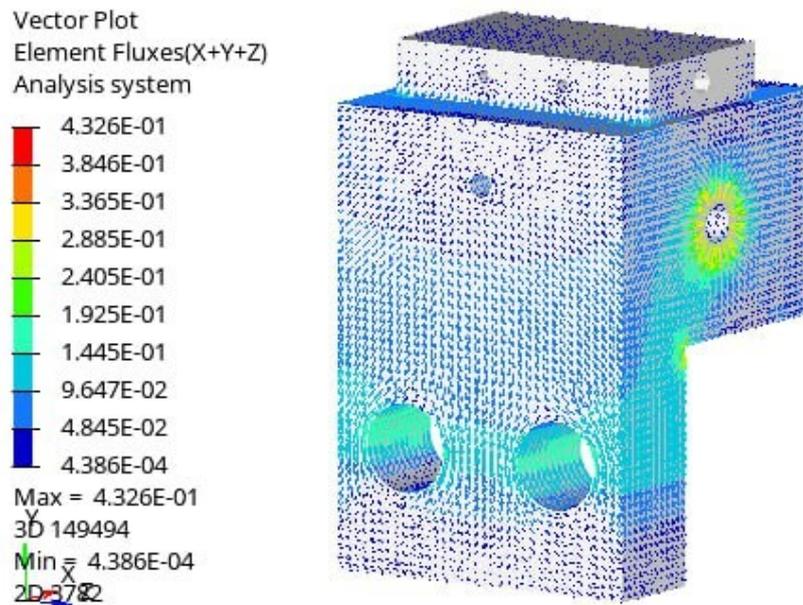


Figura 3.23: Distribución del flujo de calor representado con vectores de la mordaza v3.

La gráfica de gradientes de temperatura (figura 3.24) muestra las zonas en dónde existe un mayor cambio de temperatura con respecto a la distancia. Y se observa que sigue el mismo patrón que los contornos del flujo de calor. Es importante resaltar el valor del gradiente de temperatura sobre la superficie de sellado, el cual corresponde a  $1.016 \times 10^{-2}$  [°C/mm].

Por último, fue requerido obtener el resultado que representa la distribución de la temperatura sobre el cuerpo de la mordaza y la superficie de sellado, la figura 3.25 muestra que la temperatura se distribuye a lo ancho de la mordaza debido a la posición del alambre de nicromo. Las temperaturas más altas se ubican en los primeros milímetros de forma radial al barreno de la fuente de calor. De acuerdo con ese comportamiento, se observa una franja color amarillo que lateralmente abarca la zona central del cuerpo de la mordaza. Con el flujo de calor suministrado en este estudio, se obtuvo un instante del proceso de calentamiento en el que la superficie de la mordaza se encontraba en 111.5 [°C].

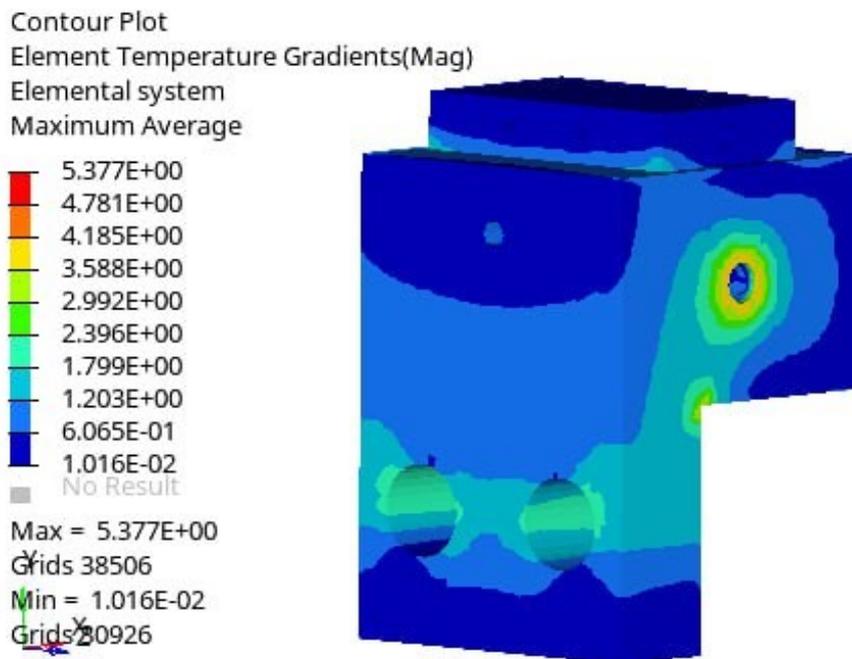


Figura 3.24: Gradiente de temperatura de la mordaza v3.

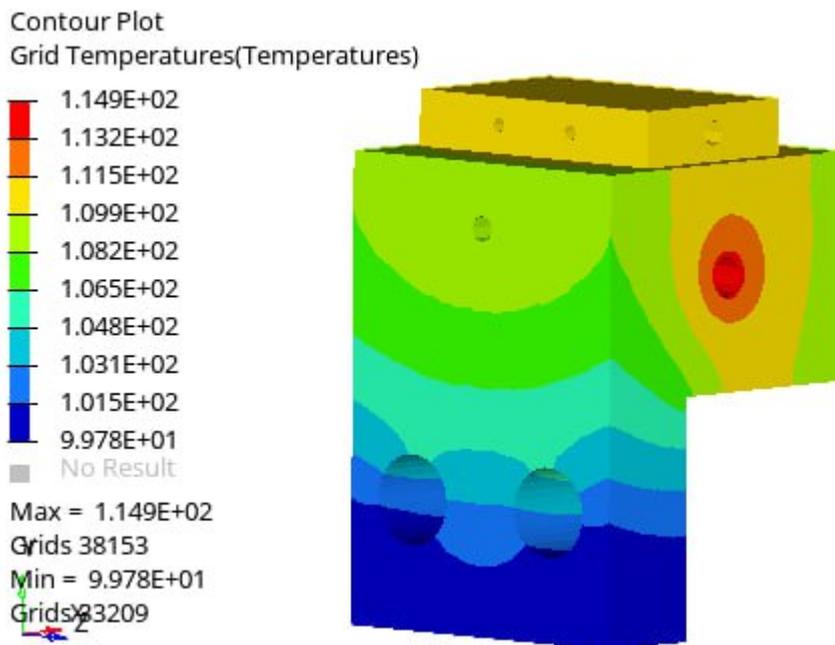


Figura 3.25: Distribución de temperatura de la mordaza v3.

### Consideraciones de rediseño de la mordaza v3.

Para la siguiente versión de mordaza se decidió mantener como material de manufactura el aluminio con el uso del barniz como método aislamiento eléctrico, debido a las ventajas observadas en los resultados del análisis térmico. Las principales conclusiones se listan a continuación:

- Al analizar la distribución del flujo de calor de ambas versiones de mordazas, los cuales se pueden observar en la figura 3.22 y la figura 3.13. Con referencia a la mordaza v3 se observa una distribución que involucra un volumen mayor a diferencia de la mordaza v1. Esto debido a la conductividad térmica de los materiales, ya que el MACOR posee una conductividad térmica muy pequeña a comparación del aluminio, no permite que el flujo de calor se distribuya por todo el volumen de mordaza y a pesar de que se mueve a las zonas más frías, el flujo de calor se mantiene concentrado en la parte media del cuerpo de la mordaza.
- La dirección de los vectores del campo de flujo de calor se comporta de forma similar, ya que en ambos análisis los vectores primeramente se dirigen a la zonas más frías, para posteriormente dirigirse a la superficie de sellado con las diferencias comentadas en el punto anterior.
- Con respecto a los gráficos de distribución de la temperatura (figura 3.22 y figura 3.13), se puede concluir que la posición del alambre de nicromo permitió tener una mejor distribución de temperatura a lo largo de la superficie de sellado. Ya que a diferencia de la mordaza v1, la mordaza fabricada en aluminio, con la modificación de la orientación del alambre de nicromo, permite distribuir la temperatura a lo largo de la parte inferior de la superficie de sellado. Mientras que en la mordaza fabricada en MACOR, existe una concentración de la máxima temperatura solamente en la zona central de la superficie de sellado, ocasionando segmentos de diferente temperatura en la parte superior de del cuerpo de la mordaza.

Para el trabajo actual, el análisis de los datos de experimentación servirán como validación del diseño de la mordaza. Antes de analizar los resultados obtenidos por los termopares, mediante una prueba rápida se midió la conductividad del alambre de nicromo hasta la superficie de sellado con el fin de detectar posible corriente eléctrica a través del cuerpo de la mordaza, del cual se pudo concluir la existencia de un completo aislamiento eléctrico. Para la experimentación fueron requeridos los equipos descritos en la figura 3.8, en la cual también se detalla con configuración requerida. En primera instancia se mencionan los equipos que fueron utilizados para mediar las variables de interés.

# Capítulo 4

## Proceso de manufactura

### 4.1 Proceso de manufactura.

El método de fabricación empleado para producir las mordazas de sellado utilizadas en el banco de pruebas fue el mecanizado por arranque de viruta. A continuación, se detallarán los conceptos clave de este proceso, lo que facilitará la propuesta de una planificación para el fresado manual y CNC en este capítulo.

En la bibliografía se propone un proceso de planificación de las operaciones de maquinado que se puede adaptar a un proceso de fresado o torneado con el objetivo de obtener la cantidad de piezas necesarias (lote), cumplir con el plazo de entrega, con la calidad exigida y con el precio más adecuado. Como primer paso es requerido conocer sobre los recursos con los que se cuentan para realizar el proceso, maquinaria, utillajes, herramientas de corte, procesos y operaciones disponibles [23].

También es requerido contar con los datos de partida como pueden ser:

- Planos de diseño del producto (dibujos, tolerancias geométricas y dimensionales, etc.)
- Especificaciones del proyectista (materiales, post procesado).
- Programa de fabricación (lote, frecuencia).
- Medios disponibles (máquinas, herramientas, utillajes, etc.).

Los pasos a seguir propuestos por [23] que e implementaron para generar el plan de mecanizado se enumeran a continuación:

1. Análisis de la información geométrica del plano.
2. Alternativas de procesos de operación.
3. Selección de máquinas.
4. Agrupación de operaciones.
5. Secuenciación de máquinas.
6. Secuenciación de amarres.

7. Selección de utillajes de amarre.
8. Secuenciación de procesos de operación.
9. Determinación de costes.

Se puede concluir de estos 9 pasos que la planeación del proceso de mecanizado es fundamental para realizar un proceso de maquinado basado en los objetivos previamente planteados. En las siguientes secciones se verá como fue utilizada esta metodología de planeación para el desarrollo de las piezas a manufacturar.

#### 4.1.1 Proceso de maquinado por fresado.

El proceso de fresado es un proceso de maquinado que consiste en usar herramientas rotatorias para remover material mediante el avance del cortador en una pieza de trabajo, esto implica que las dimensiones y ángulos de corte están definidos con precisión y son fácilmente repetibles. Es uno de los procesos más utilizados para mecanizar piezas personalizadas con tolerancias precisas [31], [47].

El proceso combina el uso de un cortador de dientes múltiples, girando a alta velocidad y desplazando la pieza de trabajo. Para lograr estandarizar las variables utilizadas en el procesos, se utilizan conceptos como velocidad de avance, esta variable puede depender de la velocidad del giro o el número de filos de la herramienta [31].

El proceso de mecanizado permite generar geometrías como superficies curvas, planas o inclinadas, así como generar el corte de chavetas, así mismo mediante el uso de brocas o machuelos se pueden generar barrenos y roscas. La selección de la herramienta correcta es fundamental para obtener los resultados deseados, así como el método de fijación[26].

El proceso de fresado se puede aplicar de dos formas:

- **Fresado frontal:** Se efectúa cuando la superficie resultante tiene contacto con la base de la fresa. Se utiliza para cortar superficies planas en la pieza de trabajo o para cortar cavidades de fondo plano.
- **Fresado periférico:** Se efectúa cuando la superficie que queremos obtener es de la que se extrae la viruta. Es adecuado para cortar ranuras profundas, roscas y dientes de engranajes [23, 31].

#### 4.1.2 Proceso de maquinado mediante Control Numérico por Computadora (CNC).

El maquinado por CNC es un proceso computarizado de manufactura en el que un software dicta el movimiento de las herramientas y la maquinaria de la fábrica. Las fresadoras CNC se caracterizan por su capacidad para rotar herramientas de corte mientras mantienen estacionario el bloque/pieza de trabajo de material [30].

Las máquinas CNC son esencialmente la actualización de los dispositivos de la "vieja escuela" que se controlan manualmente con volantes o palancas, o se automatizan mecánicamente solo con levas [30]. Anterior al control numérico era posible automatizar el

proceso, mediante el avance lineal a lo largo de uno o varios ejes de la máquina fresadora [47].

Generalmente, los software de CNC son complementados con una versión del software CAD (*computer-aided design*) de esta forma el usuario puede dibujar lo que desea cortar. Por lo que se parte de un modelo 3D previamente diseñado mediante CAD y que siguiendo el flujo de trabajo propuesto por el software se logra obtener un código que puede ser leído por el control numérico de la herramienta [30].

El lenguaje implementado en las máquinas de fresado CNC se denomina código G (GCODE), el código generado mediante el software otorga información referente al comportamiento de la máquina, como selección de la herramienta, la velocidad del giro de la herramienta, la velocidad de avance, implementación del lubricante y la coordinación. Todo ello siguiendo la geometría de la pieza final y los operaciones propuestas por el usuario [30].

De forma cotidiana, los maquinistas CNC combinan elementos de diseño mecánico, dibujos técnicos, matemáticas y habilidades de programación informática para producir una variedad de piezas de metal y plástico [30].

### 4.1.3 Herramientas disponibles en el fresado.

Para completar el proceso de fresado es requerido hacer uso de herramientas auxiliares, principalmente se puede dividir en herramientas de sujeción y herramienta de corte (fresa).

Como parte de las herramientas de sujeción se tienen dispositivos genéricos disponibles para el proceso como las mordazas que permiten sujetar piezas prismáticas y el plato de tres garras que permite sujetar piezas de revolución. Y dispositivos más específicos como las bridas que permiten sujetar piezas irregulares y los bloques en "V" que permiten sujetar piezas de revolución en posición horizontal. Cada uno de estos dispositivos tienen una utilidad en particular y compatibilidad con la operación de maquinado a realizar [23].

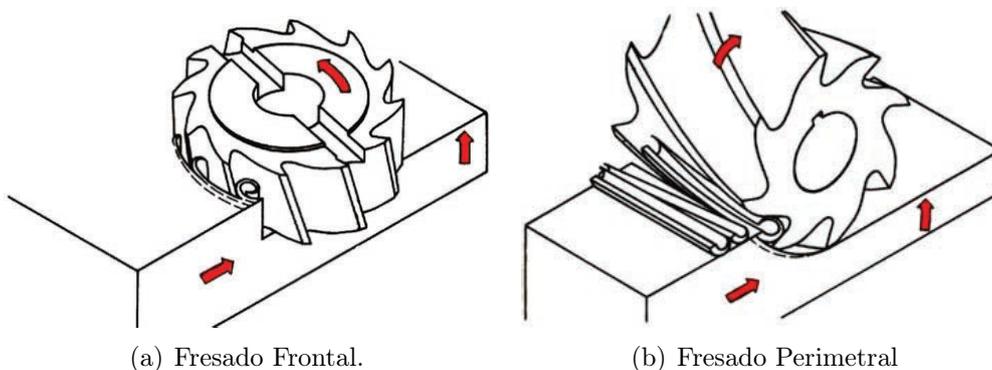


Figura 4.1: Tipos de fresado [23].

### Fresas para metal

Algunos de los puntos importantes en la selección y uso de cortadores para el procesos de fresa están enfocados en las propiedades mecánicas de ambos materiales involucrados (material del cortador y material de la pieza a maquinar), así como las herramientas disponibles (máquina fresadora, cortadores, método de anclaje).

Esto se puede analizar en el blog dedicado al maquinado, cuyas recomendaciones para el maquinado se enlistan a continuación [18]:

- Es requerido conocer la dureza del material a ser maquinado y de esa forma seleccionar un cortador de un material con una mayor dureza.
- Materiales con dureza baja requieren un menor número de filos (1 o 2) en la fresa para desalojar correctamente la viruta, debido a la maleabilidad del material, el cual genera viruta de gran tamaño.
- Para materiales de alta dureza se recomienda utilizar fresas de 6-8 filos.
- Es recomendable conocer la distancia que existe entre una punta y otra del cortador, y de esa forma configurar la profundidad de corte del proceso. Para garantizar que el cortador esté en contacto en todo momento con la pieza y así disminuir vibraciones.
- Fresa para mecanizado de Aluminio
  - En cuanto al material se recomiendan herramientas de corte fabricadas en carburo de tungsteno.
  - La hélice de los filos de corte suele ser de  $45^{\circ}$ .
  - Fresas de 1, 2 o 3 filos de corte.
  - Para conocer el avance del corte en mm/min es requerido conocer las RPM recomendadas y el avance por filo, algunas veces son datos proporcionados por el fabricante de la herramienta.
  - Longitudes en relación con el diámetro de 1:2 suelen funcionar bien en el mecanizado de aluminio.

### Bloques en “V”

Los bloques en “V”, junto con las bridas, se puede utilizar para sujetar piezas cilíndricas. Las superficies de referencia son las caras inclinadas del bloque en “V”, donde apoya la pieza (figura 4.2) [23].

Como se describirá en apartado 4.1.5, el material MACOR parte de una pieza cilíndrica, por lo que se requirió utilizar una mordaza que también tuviera la geometría de un bloque en “V” y se obtuvo la versatilidad necesaria para todas las operaciones del proceso de manufactura por arranque de viruta usando una fresadora manual como se describirá en la sección de proceso de manufactura.

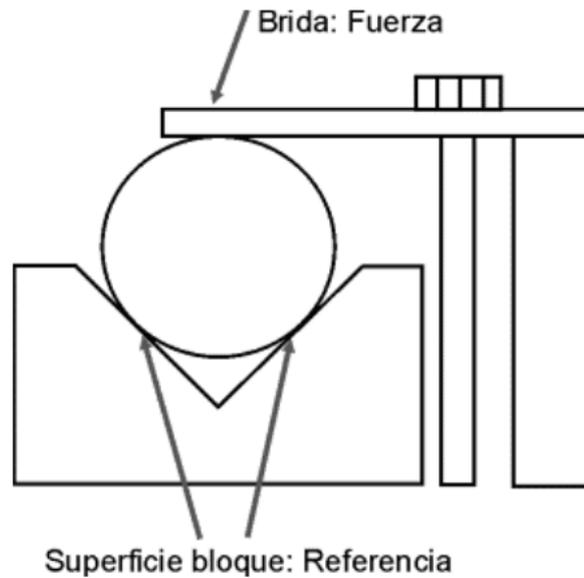


Figura 4.2: Esquema del principio de funcionamiento Bloque en “V”

#### 4.1.4 Proceso de manufactura implementado en la fabricación de las mordazas v1 y v4.

El proceso de manufactura implementado para la fabricación de las versiones de la mordaza fue mediante arranque de viruta, el cual consiste en el desbaste de material mediante una herramienta rotativa, en conjunto con el desplazamiento de la mesa de trabajo a lo largo de los ejes, en el caso del fresado, con el objetivo de obtener la geometría necesaria.

Existen diferentes equipos implementados en método de arranque de viruta. En el caso de manufactura de la mordaza v1, fue utilizado una máquina fresadora vertical manual, la cual se encuentra en la zona de prototipado en el laboratorio del Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, UNAM.

Para el caso del las siguientes versiones de Mordaza se tuvo la oportunidad de manufacturarlas en un centro de maquinado CNC, para el cual fue requerido generar el código de control numérico y conocer el controlador del equipo, lo cual se describirá a continuación.

El centro de mecanizado implementado fue DOOSAN de la serie DEM, la cual es una de las máquinas más pequeñas de esta marca, y unas de las que por su tamaño de área de corte más pequeña estaba disponible para ser utilizada en la manufactura de las mordazas.

Las operaciones de maquinado por arranque de viruta, son el conjunto de técnicas de fabricación que con el uso de herramientas de corte retira material de la geometría base y así se produce la forma deseada de la pieza. Se observan las operaciones de maquinado por fresado implementadas para las piezas manufacturadas (mordaza v1 y mordaza v4). Se describieron las operaciones según el plano de trabajo utilizado.

### 4.1.5 Operaciones del proceso de maquinado de la mordaza v1.

Para este proceso de manufactura se usó como referencia el proceso de planeación de maquinado propuesto por [23]. Primeramente, se analizaron los planos de la mordaza, para a continuación lograr planear las operaciones. Para la mordaza 1, solo se tenía material disponible para realizar un par de mordazas de sellado. La máquina fresadora disponible para realizar el maquinado fue una fresadora de banco manual, a la que se le adaptó una mordaza con un surco en "V", para sujeción de piezas cilíndricas.

En el plano de la mordaza v1 figura 4.3 se observan las dimensiones requeridas de la pieza final a maquinado. También se observan la numeración de las superficies. Así mismo, se aprecian las numeraciones de las superficies del material de partida, (B1, B2, ..., Bn).

Este tipo de plano son muy útiles para cualquier tiempo de proceso de manufactura por maquinado de arranque de viruta, ya que en un mismo documento permite observar las dimensiones finales de la pieza, y el orden de las operaciones de maquinado, resaltadas en números azules. Las operaciones fueron planteadas pensando en los diferentes planos de trabajo que se tendrán que utilizar para realizar las operaciones de maquinado.

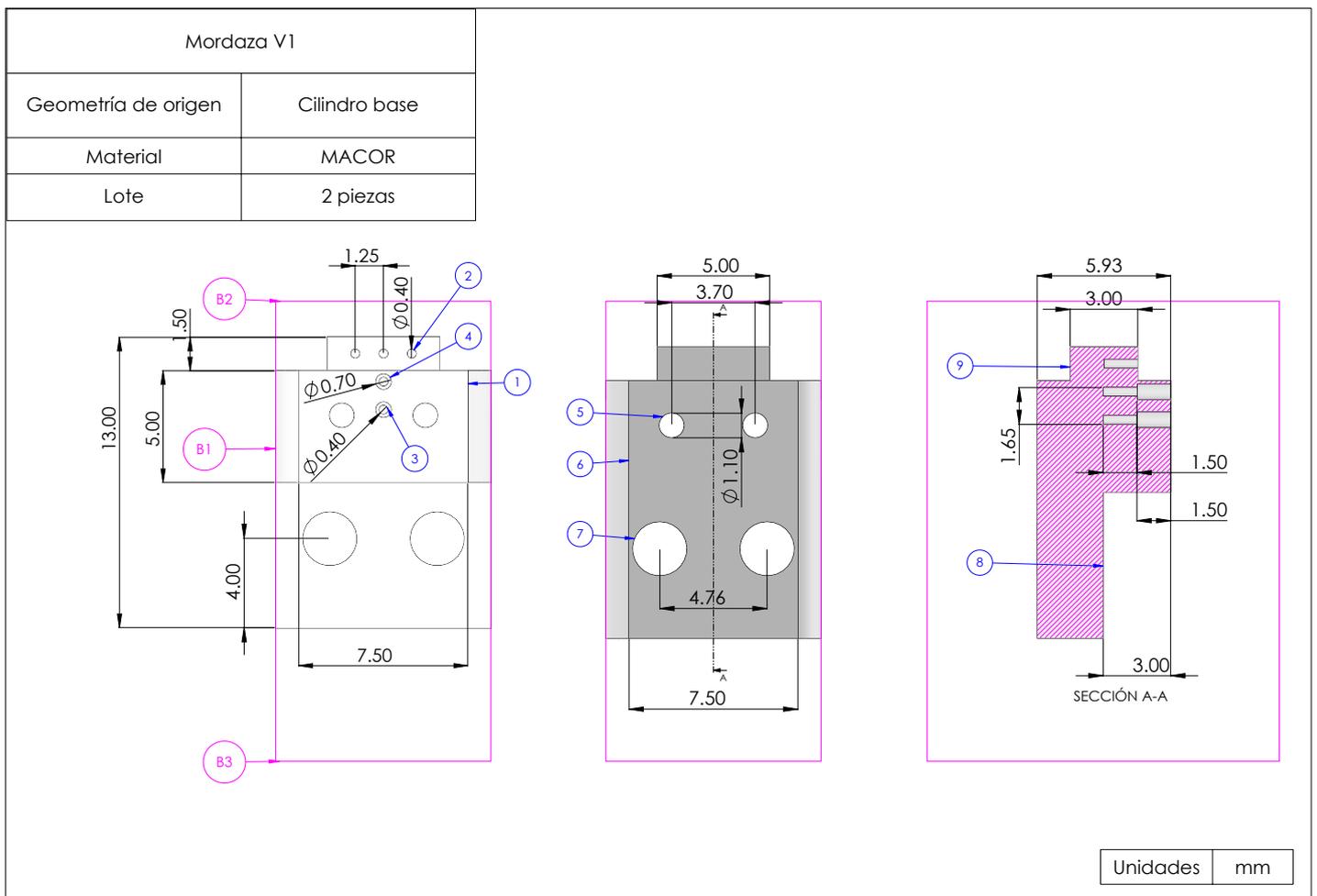


Figura 4.3: Plano de manufactura de la mordaza v1.

La información aglomerada en el plano de la mordaza figura 4.3, fue útil para realizar

una simulación mediante un software de fabricación asistida por computadora (CAM), por sus siglas en inglés. Para esta investigación se continuó con el software utilizado para el modelado (*SolidWorks 2019*) y su complemento integrado de manufactura asistida por computadora *CAMWorks 2019*. Con el cual se logró previsualizar los pasos y las posiciones de la pieza para su fabricación manual en la máquina fresadora. Mediante este *software* se obtuvieron las imágenes mostradas en el flujo de trabajo que se muestra a continuación (figura 4.4).

En la figura 4.4 se observa el flujo de trabajo que se siguió para manufacturar en la máquina de fresado manual ubicada en el Centro de Diseño. Las operaciones de fresado se dividieron según el plano de trabajo implementado, es decir, el plano superior de la pieza o tocho. Para el caso de la Mordaza 1 (figura 3.11), se comenzó con un tocho de geometría cilíndrica de MACOR con un diámetro de 9.565 [mm] y altura de 20.6 [mm] previamente refrentado para tener una sujeción correcta en la mordaza de sujeción, la cual contaba con un surco en "V".

En el plano de trabajo 1 se realizaron 5 operaciones de maquinado, se realizó un planeado utilizando un cortador plano de 4 [mm] de diámetro para generar una superficie plana, en la cual se realizaron los barrenos para colocar los termopares que permitieron registrar las temperaturas sobre el cuerpo de la mordaza durante el proceso. Así mismo se realizaron los barrenos para colocar el alambre de nicromo, que se utilizó como fuente de calor.

Para el siguiente plano de trabajo fue necesario girar la pieza 180° y generar otra operación de planeado y posteriormente se generó la operación de barrenado y generar la geometría para lograr colocar los tornillos de sujeción. Para los últimos dos planos de trabajo se colocó la pieza de forma vertical. La siguiente operación fue realizar 3 operaciones para generar la geometría necesaria para lograr el ensamble correcto con el porta mordazas. Por último, se giró 180° para obtener el plano de trabajo 4 y se generó la geometría de la superficie de sellado.

En la figura 4.5 se observa una fase del proceso de maquinado de la mordaza v1, en la imagen se muestra el rectificado del avance de la operación de maquinado mediante la medición de la longitud de la superficie, con el uso de un vernier.

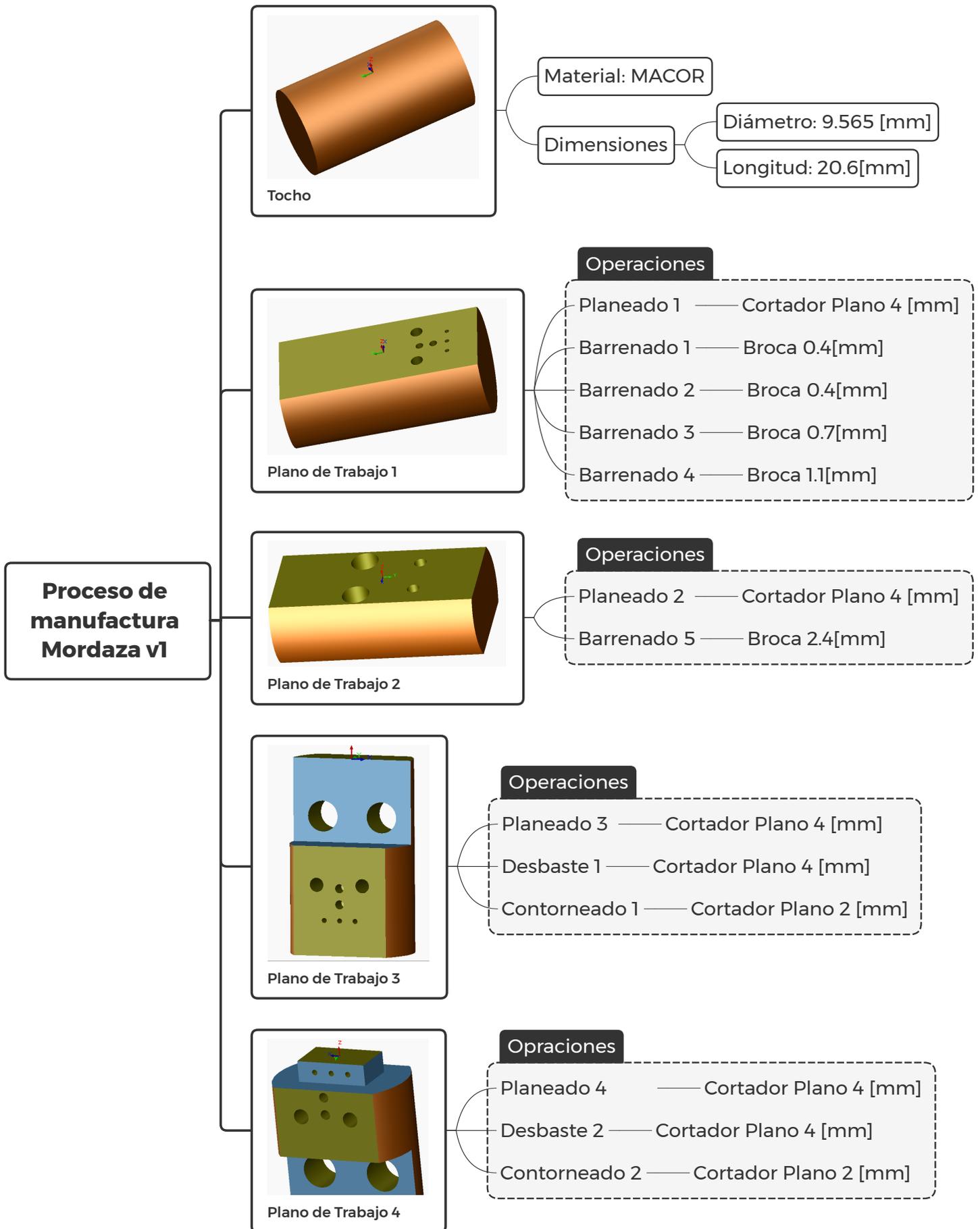


Figura 4.4: Flujo de trabajo de la mordaza v1.

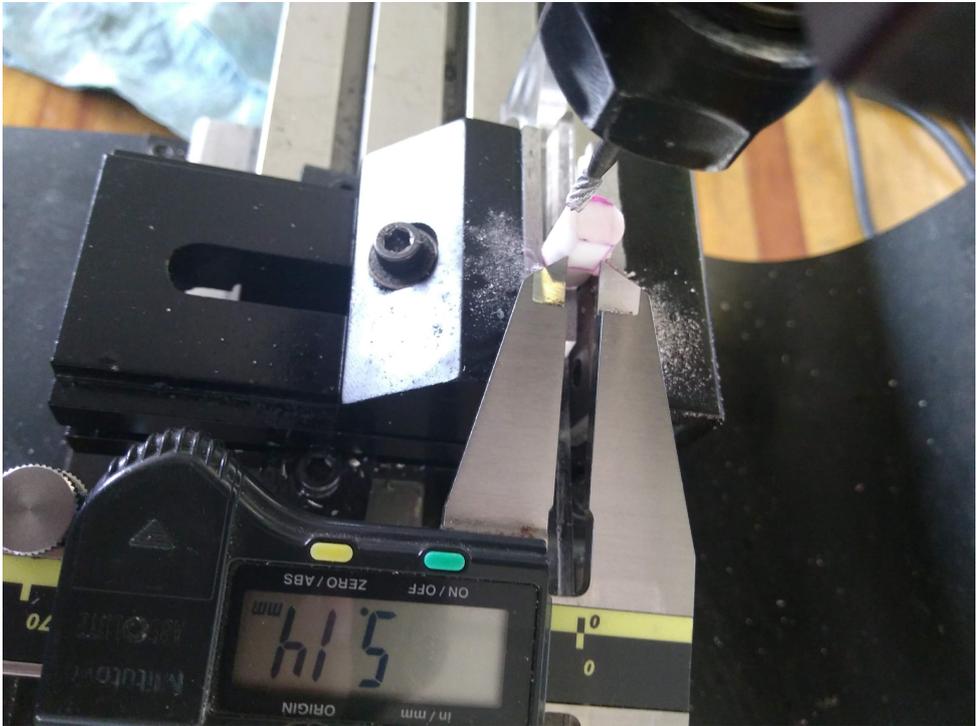


Figura 4.5: Proceso de fresado de la mordaza v1.

### 4.1.6 Operaciones del proceso de maquinado de la mordaza v4.

Para la siguiente versión de la mordaza a manufacturar nuevamente se utilizó como referencia el proceso propuesto en [23]. Durante la fase de planeación se analizó la posibilidad de manufacturar más de un par de mordazas, lo cual dio pie a utilizar el control numérico como método de manufacturar para esta versión de mordaza.

Independientemente de la máquina a utilizar, se siguieron los mismos pasos que para la versión 1. Para este proceso se consideró el modelo y el plano de la mordaza v4 y se utilizó como material de partida, un prisma de aluminio de 11 x 16 x 11 [mm]. Se planeó la fabricación de 3 pares de mordazas y como se mencionó con anterioridad, se hizo uso de un centro de mecanizado DOOSAN de la serie DEM.

Fue necesario generar el plano de la pieza figura 4.6, en dónde se condensa la información referente a las dimensiones de la mordaza, así como la numeración de las operaciones a realizar, resaltado en color azul y el número de la superficie del material de partida.

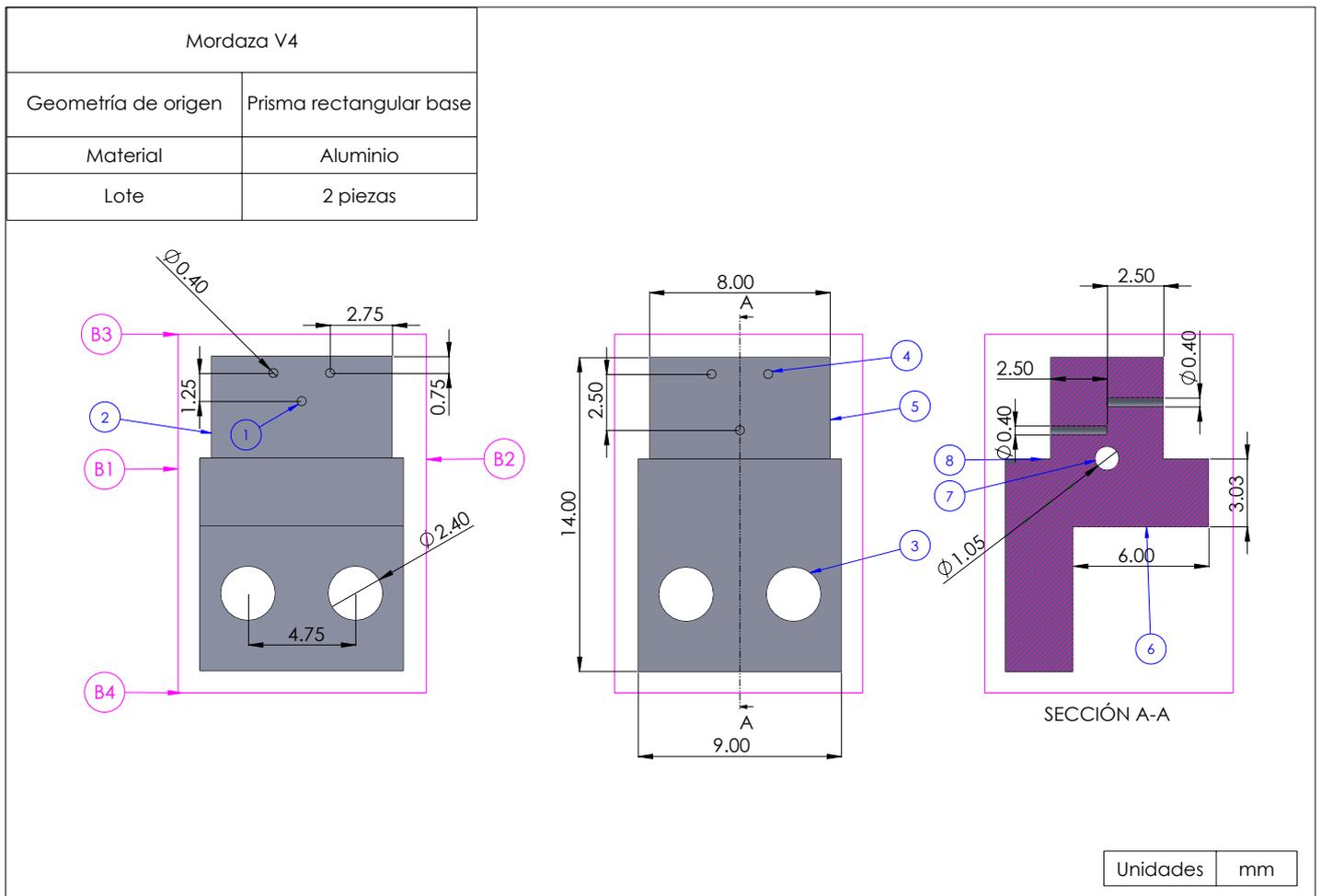


Figura 4.6: Plano de manufactura de la mordaza v4.

De la misma forma que con la versión 1 de mordaza, se utilizó el software CAM, *CAM-Works 2019* en el que se simularon las diferentes operaciones a realizar en cada uno de

los planos de trabajo utilizados, las cuales serán descritas a continuación.

En la figura 4.8 se observa el flujo de las operaciones de maquinado divididas por los planos de trabajo. En el plano de trabajo 1 se realizaron las operaciones de barrenado para generar los orificios utilizados, para colocar los termopares. También se generó una operación de contorneado y así producir la superficie frontal del cuerpo de la mordaza. En el plano de trabajo 2 se realizaron las mismas operaciones, pero se agregó una operación de barrenado que permitió manufacturar los barrenos utilizados para colocar los tornillos que sujetan la mordaza al porta mordaza.

En el plano de trabajo 3 se aprecia la operación que permitió retirar el material necesario para formar la geometría requerida para lograr el ensamble entre mordaza y porta mordaza. Primero fue necesario una operación de desbaste con un cortador plano de 4 [mm] de diámetro y posteriormente fue requerido refinar el desbaste con un contorneado haciendo uso de un cortador plano de 2 [mm] de diámetro.

Por último, en los planos de trabajo 4 y 5, se realizaron los barrenos correspondientes a la posición del alambre de nicromo y el termopar posicionado en la zona central de la superficie de sellado. También se realizaron las operaciones de contorneado del cuerpo de la mordaza y lograr las dimensiones de la superficie de sellado de 5 x 8 [mm].

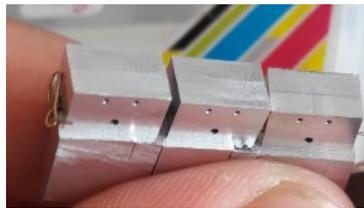


Figura 4.7: Resultado del proceso de manufactura mediante CNC [22].

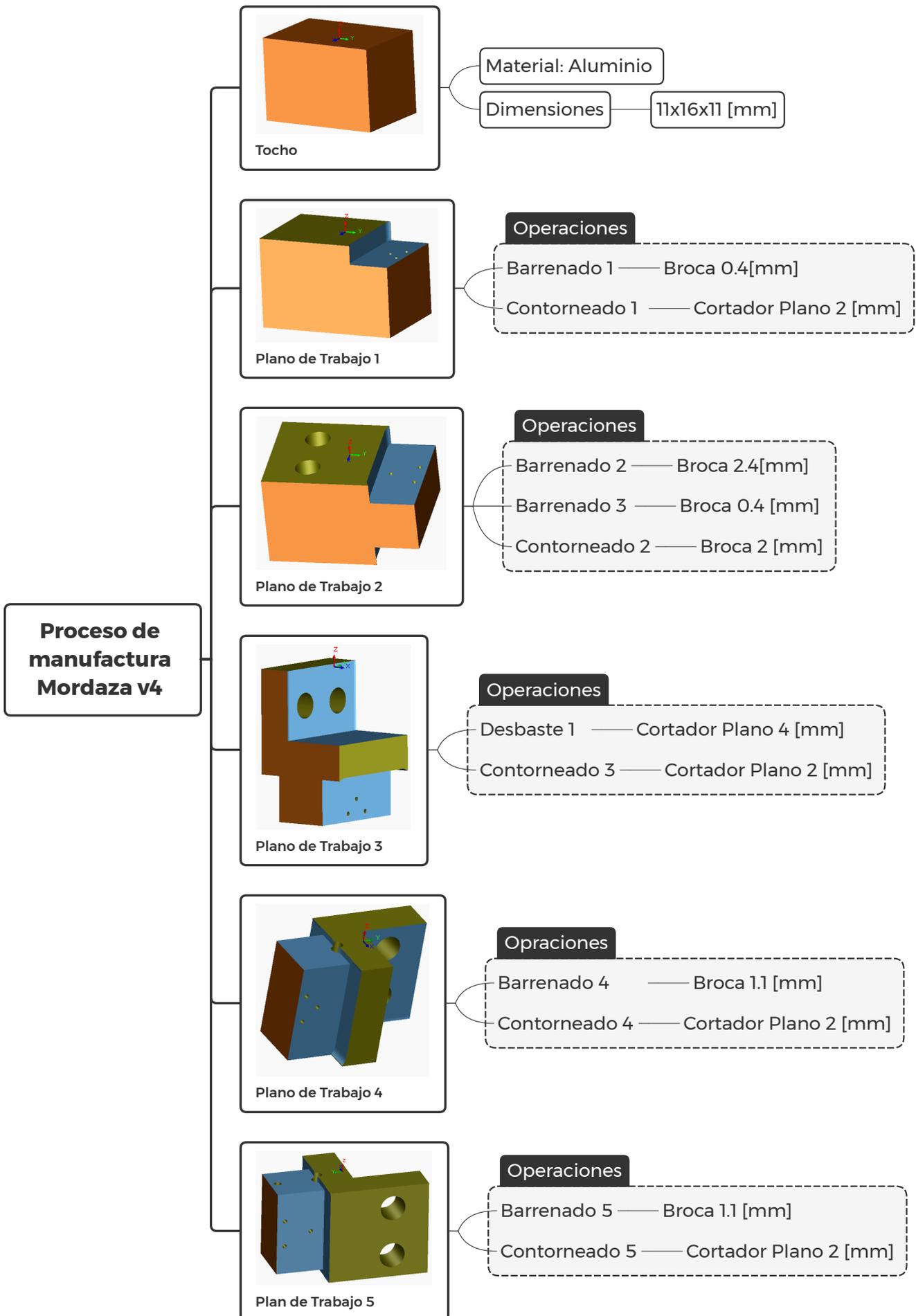


Figura 4.8: Planos de trabajo mordaza v4.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Resultado del proceso de diseño.

En la imagen figura 5.1 se muestra el resultado del proceso de diseño que fue implementado para converger en un concepto de solución final, el cual es la mordaza v4. Como se mencionó, el proceso de diseño partió de una v0 de mordaza, de la cual se realizó un proceso de validación experimental. A partir de ello se comenzó a iterar y se generó la versión 1, la cual se trató de un concepto que permitió aislar eléctricamente los termopares de la resistencia mediante el uso de MACOR, a partir de esta versión se realizó un proceso de validación numérico y experimental.

Las últimas 3 iteraciones se generaron a partir de las necesidades obtenidas del proceso de diseño de la v1. La versión 2 se obtuvo por el concepto de un aislamiento mediante un buje de MACOR, pero se descartó debido a que se observó un mejor funcionamiento del sistema de mordaza al aislar la resistencia con el uso de un barniz, por lo cual se generó la versión 3. Por último, el resultado de la geometría de la mordaza v4, se obtuvo al realizar un proceso de validación numérico y compararlo con los resultados de la v3. A pesar de que la versión 3 presenta una distribución de una sola temperatura en la superficie de sellado, como se mencionó en apartado 3.9.3, se decidió usar la v4 para la experimentación, ya que su geometría permite que las altas temperaturas se distribuyan en la superficie de sellado. Así mismo, los resultados de la distribución de los gradientes de temperatura por elemento sobre la superficie de sellado permitieron observar que la v4 tiene una menor magnitud correspondiente a  $4.535 \times 10^{-4}$  [°C/mm] a comparación de la v3 cuya magnitud del gradiente de temperatura por elemento fue correspondiente a  $5.453 \times 10^{-3}$  [°C/mm].

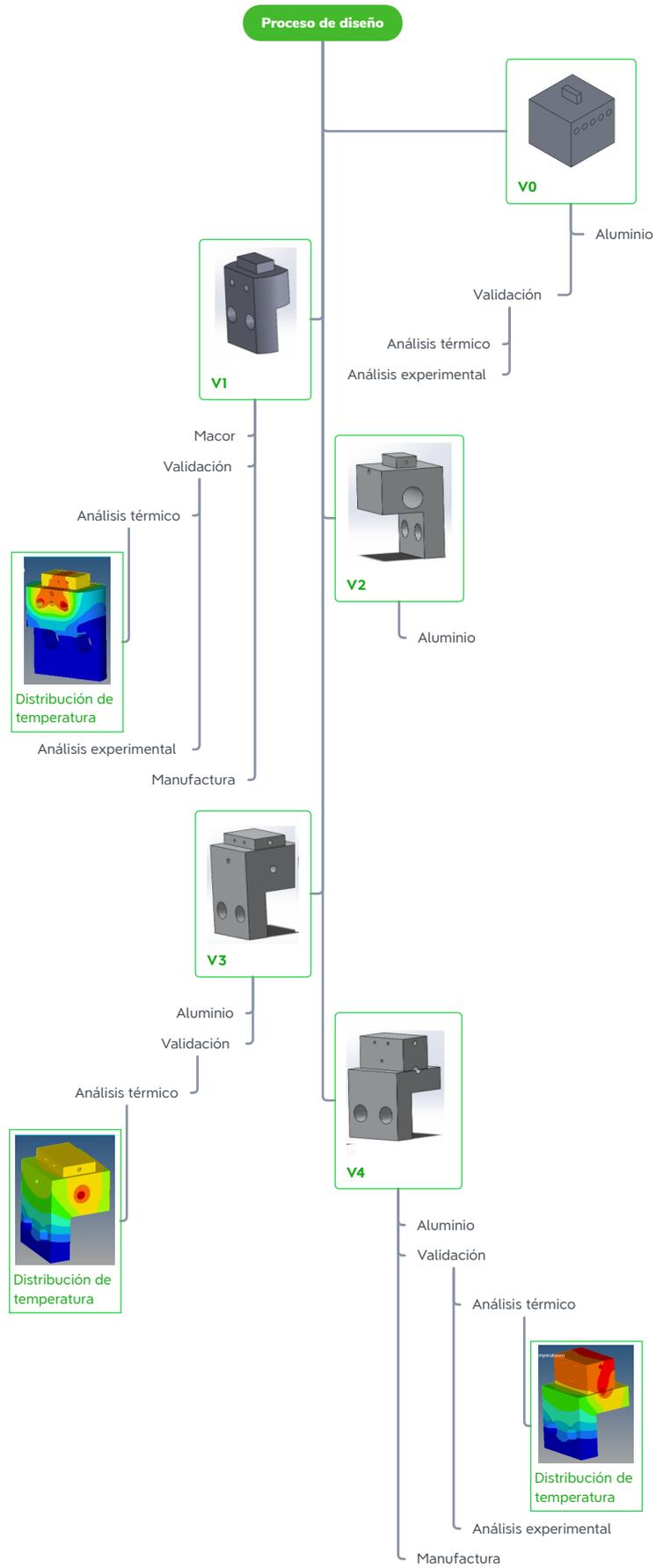


Figura 5.1: Línea de tiempo del proceso de diseño de las versiones.

## 5.2 Especificaciones del diseño geométrico.

En la figura 5.2 se muestra las diferentes características geométricas resultantes del proceso de diseño, a partir del análisis y optimización se generó una versión final de mordaza con las dimensiones geométricas y modelado requerido para la versión final del banco de prueba de sellado automatizado, con los diferentes sistemas de instrumentación mencionado con anterioridad.

En la vista frontal se muestran 3 barrenos para insertar los termopares, los cuales se encuentran cercanos a la superficie de sellado. Dos de los barrenos se encuentran a una profundidad de 1.2 [mm] con un diámetro de 0.4 [mm] los cuales permitieron conocer la diferencia de la temperatura registrada a lo largo de la superficie de la mordaza y la señal obtenida en esta posición se conoció como "termopar lateral".

El tercer barreno mostrado en la vista frontal fue requerido para registrar la temperatura central de la mordaza y con una profundidad total de 2 [mm]. Para lograr esta profundidad fue requerido tomar en cuenta el polímero aislante del termopar, por lo que se requirió manufacturar el barreno con dos diámetros, 0.4 [mm] para la parte expuesta del termopar y un diámetro de 0.7 [mm] para la zona con aislante del termopar, lo cual permite mantener en su posición el termopar y obtener la diferencia de la temperatura con respecto a la altura de la mordaza y la señal obtenida se renombró como "termopar central".

En la vista posterior se muestra 3 barrenos muy similares con la mayor diferencia de que el barreno central se colocó lo más cercano posible (distancia). Por lo cual es un barreno fundamental para la investigación y la señal obtenida en esta posición se renombró como "termopar resistencia".

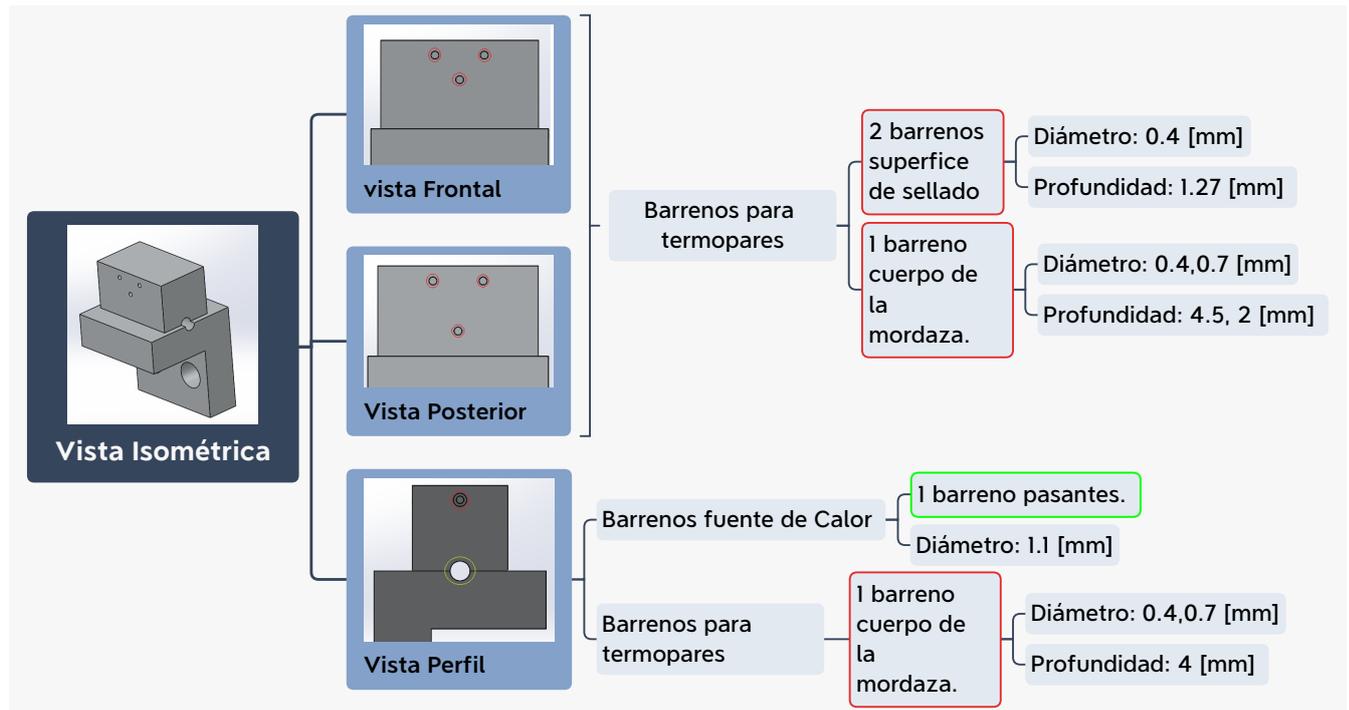


Figura 5.2: Especificaciones mordaza v4.

### 5.3 Proceso de validación de la mordaza v4.

Como parte del proceso de diseño mecánico, se requiere una fase de evaluación y así conocer a qué nivel cumple esta versión de mordaza con los requerimientos de diseño que fueron propuestos mediante las conclusiones que se obtuvieron a través de las iteraciones.

#### 5.3.1 Validación numérica de la mordaza v4.

Se realizó un análisis térmico en estado estable para el modelo de la mordaza v4, mediante el método de análisis numérico por elemento finito, en el *software Hyperworks®* 2017. Se obtuvieron los mismos resultados que para las versiones anteriores, la distribución del flujo de calor, las zonas con mayores gradientes de temperatura y la distribución de la temperatura sobre el cuerpo de la mordaza.

#### Análisis térmico de la mordaza v4.

En la figura 5.3 se observa las superficies que tiene interacción por el mecanismo de convección con el aire. Las áreas que no se encuentran resaltadas es debido a que se encuentran aisladas con el silicón utilizado para mantener los termopares en su lugar o es debido a que se encuentran aisladas debido a la capa de silicón utilizada en el ensamble con el porta mordaza.

Para comenzar con el análisis de los resultados, se presenta la distribución del flujo de calor mediante un gráfico de contorno (figura 5.5). El flujo de calor que se reparte desde la fuente y se concentra en las arista y vértices que dividen la parte superior del cuerpo de la mordaza de la parte inferior.

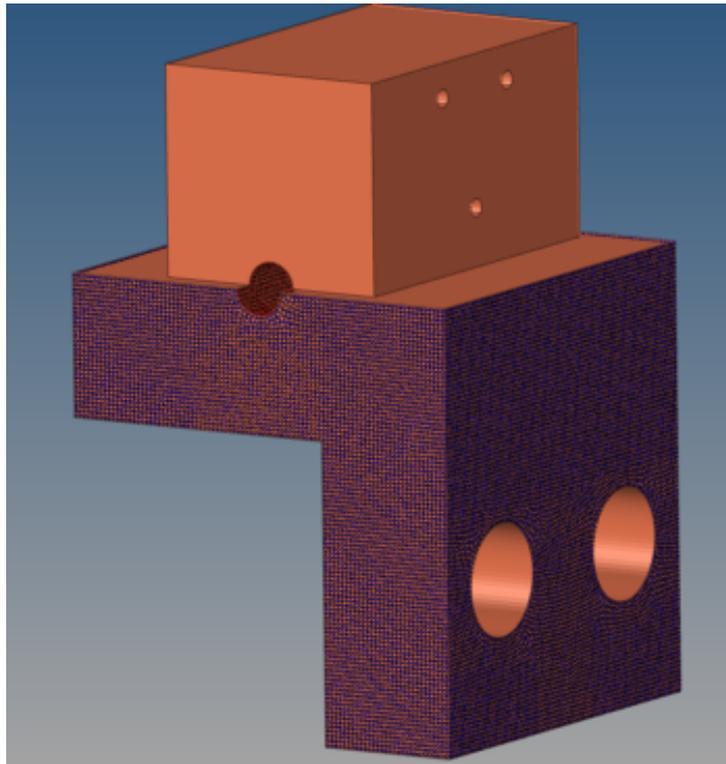


Figura 5.3: Superficies que interactúan mediante el mecanismo de transferencia de calor por convección mordaza v4.

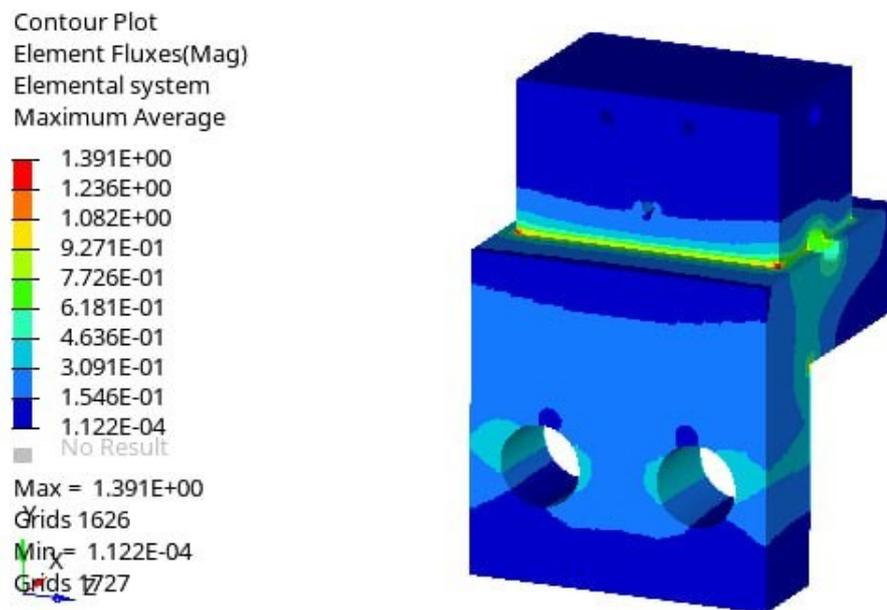


Figura 5.4: Distribución del flujo de calor mordaza v4.

En la figura 5.5 se observa el flujo de calor en la forma de gráfico de vectores. En el que se puede observar el flujo salir de la fuente de calor en forma radial al barreno, dirigiéndose a las zonas más frías, las cuales se ubican en la zona inferior que tiene contacto con el porta mordaza, para después redirigirse a la zona superior.

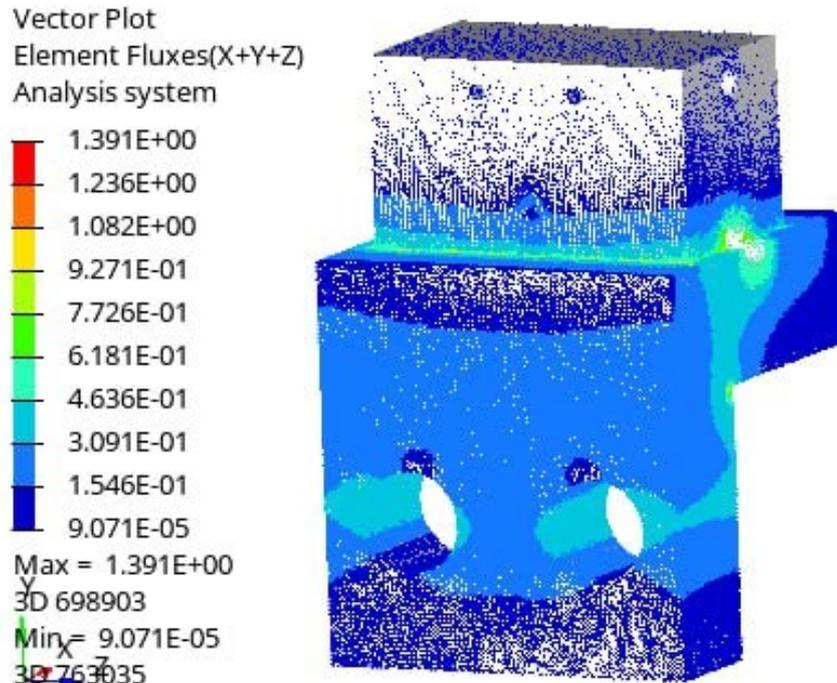


Figura 5.5: Distribución del flujo de calor con vectores mordaza v4.

A continuación, en la figura 5.6 se analiza el gradiente de temperatura, en el cual se calculó el gradiente para cada uno de los elementos del modelo. En la gráfica se observa la zona de menor gradiente en color azul, el cual se ubica primordialmente sobre la superficie de sellado, con un valor de  $1.122 \times 10^{-4}$  [°C/mm].

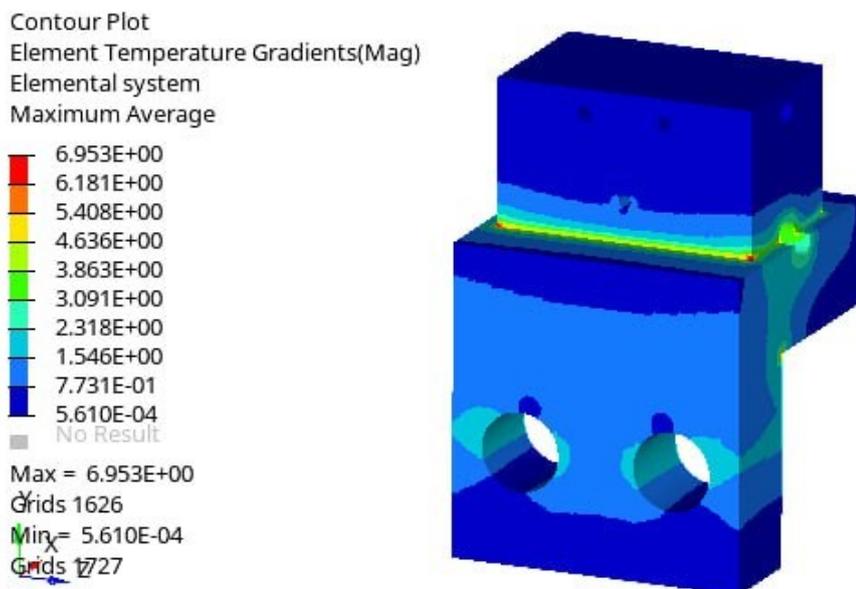


Figura 5.6: Gradiente de temperatura mordaza v4.

Por último, figura 5.7 en la se muestra el resultado de la distribución de la temperatura sobre el cuerpo de la mordaza. Se observa que las mayores regiones de temperatura se

ubican en la zona superior. Se sitúan dos regiones con diferentes temperaturas, en color naranja y color rojo, entre 112.6 y 114.3 [°C].

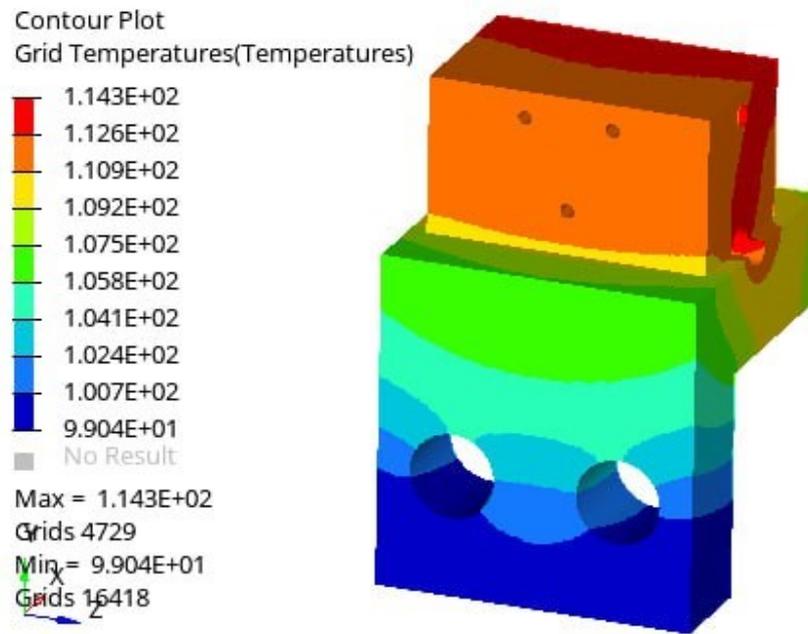


Figura 5.7: Distribución de temperatura mordaza v4.

### 5.3.2 Validación experimental de la mordaza v4.

En esta sección se presentarán las gráficas que permiten describir la distribución de la temperatura sobre el cuerpo de la mordaza durante el proceso experimental de la mordaza de sellado versión 4. En el proceso experimental se realizaron 27 experimentos, cuya variación de parámetros puede observarse en la figura B.1 en el apéndice B.

#### Gráficas del comportamiento térmico de la mordaza V4.

A continuación se muestran las gráficas que fueron generadas a partir de la señal térmica de los termopares colocados en la configuración de la mordaza necesaria para observar la distribución de la temperatura sobre la mordaza v4 (figura 5.7).

A pesar de que en la versión final para esta investigación (figura 5.2) fueron utilizados 7 termopares, en las gráficas que se presentan en la siguiente sección se mostrarán las señales de la temperatura necesarias para la interpretación del comportamiento de la distribución de la temperatura, pero todos los termopares fueron implementados para el control del sistema de sellado con la configuración mostrada en la imagen figura 3.9 de la sección apartado 3.8.

También se debe tomar en cuenta que para la visualización de los datos que se muestran a continuación se utilizó la señal generada por los termopares ubicados en la mordaza inferior, la cual se encuentra fija al banco de sellado, a diferencia de la mordaza superior, la cual se desplaza debido al accionamiento del actuador neumático.

La temperatura que se ubica a la altura de la resistencia (fuente de calor), en todas las gráficas siempre presenta una mayor temperatura con respecto a las demás curvas. Este comportamiento se analizó mediante las tablas 5.1 y 5.2 en las cuales se pueden observar los promedios de la temperatura de cada uno de los termopares.

En las tablas 5.1 y 5.2 se observa el gradiente de las temperaturas promedio entre las posiciones 1,2 y 3 de los termopares sobre la superficie de la mordaza, es decir, la diferencia de temperatura entre la posición 1 y 2 se denota mediante:  $\Delta_{12}$  .

La temperatura en la zona central de la mordaza se comporta de la misma forma que la temperatura de la fuente de calor, pero se observa una disminución en la temperatura. El porcentaje de la disminución de la transferencia de calor mediante conducción se observa  $\Delta_{12}[\%]$  columna de la tabla 5.2.

Respecto a la temperatura del termopar lateral se puede observar el comportamiento correspondiente a la transferencia de calor mediante conducción y los efectos de la transferencia de calor mediante convección. Por lo que existe un decaimiento con respecto a los termopares centrales. el porcentaje de error después de haberse estabilizado la temperatura se puede observar en las columnas  $\Delta_{13}[\%]$  y  $\Delta_{23}[\%]$  de tabla 5.2.

Tabla 5.1: Promedio de temperatura registrado por termopares en las gráficas.

<b>Promedio de temperatura.</b>		
		<b>Promedio [°C]</b>
<b>Gráfica 1</b>	Termopar 1	126.847
	Termopar 2	126.202
	Termopar 3	124.069
<b>Gráfica 2</b>	Termopar 1	126.814
	Termopar 2	126.140
	Termopar 3	124.006
<b>Gráfica 17</b>	Termopar 1	139.742
	Termopar 2	138.636
	Termopar 3	136.343
<b>Gráfica 20</b>	Termopar 1	161.803
	Termopar 2	160.425
	Termopar 3	157.704

Tabla 5.2: Cambio de temperatura entre la ubicación de los termopares.

<b>Cambio de temperatura</b>			
	$\Delta_{12}[\%]$	$\Delta_{13}[\%]$	$\Delta_{23}[\%]$
<b>Gráfica 1</b>	0.509	2.190	1.690
<b>Gráfica 2</b>	0.532	2.214	1.691
<b>Gráfica 17</b>	0.792	2.433	1.654
<b>Gráfica 20</b>	0.852	2.533	1.696

## Temperatura registrada en mordaza de aluminio 1

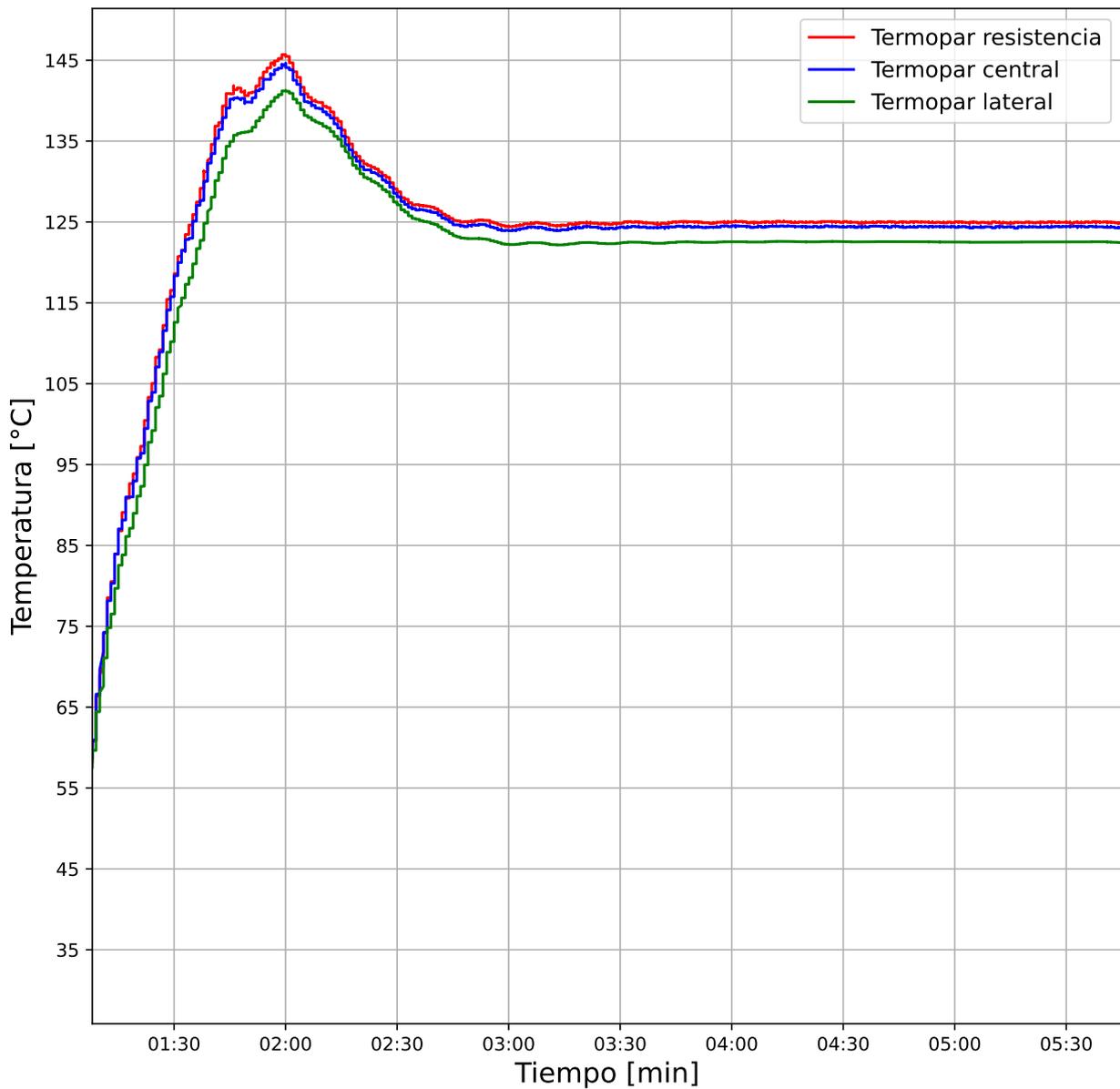


Gráfico 5.1: Comportamiento temperatura mordaza v4 a 125 [°C].

## Temperatura registrada en mordaza de aluminio 2

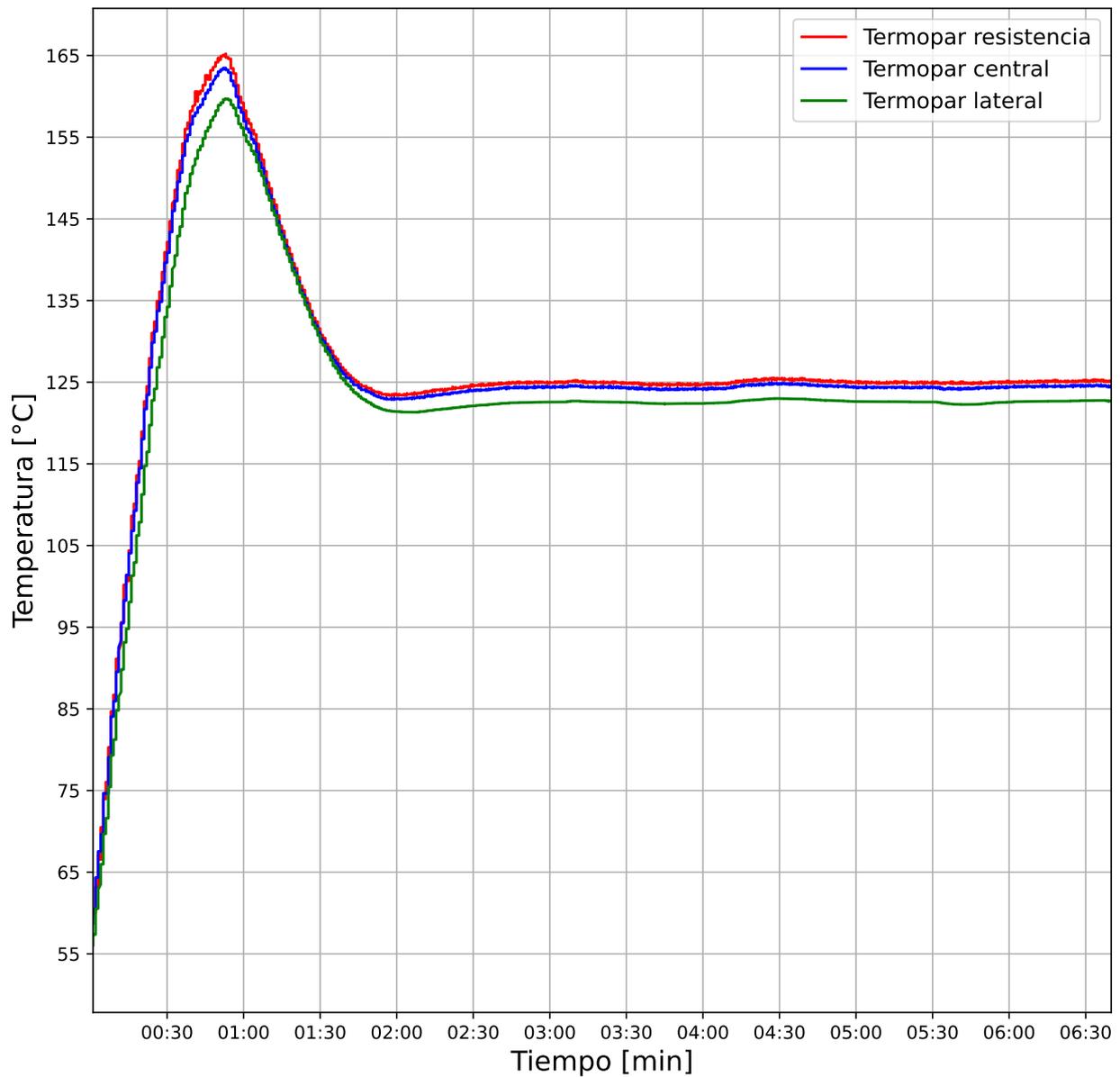


Gráfico 5.2: Comportamiento temperatura mordaza v4 a 125 [°C].

## Temperatura registrada en mordaza de aluminio 17

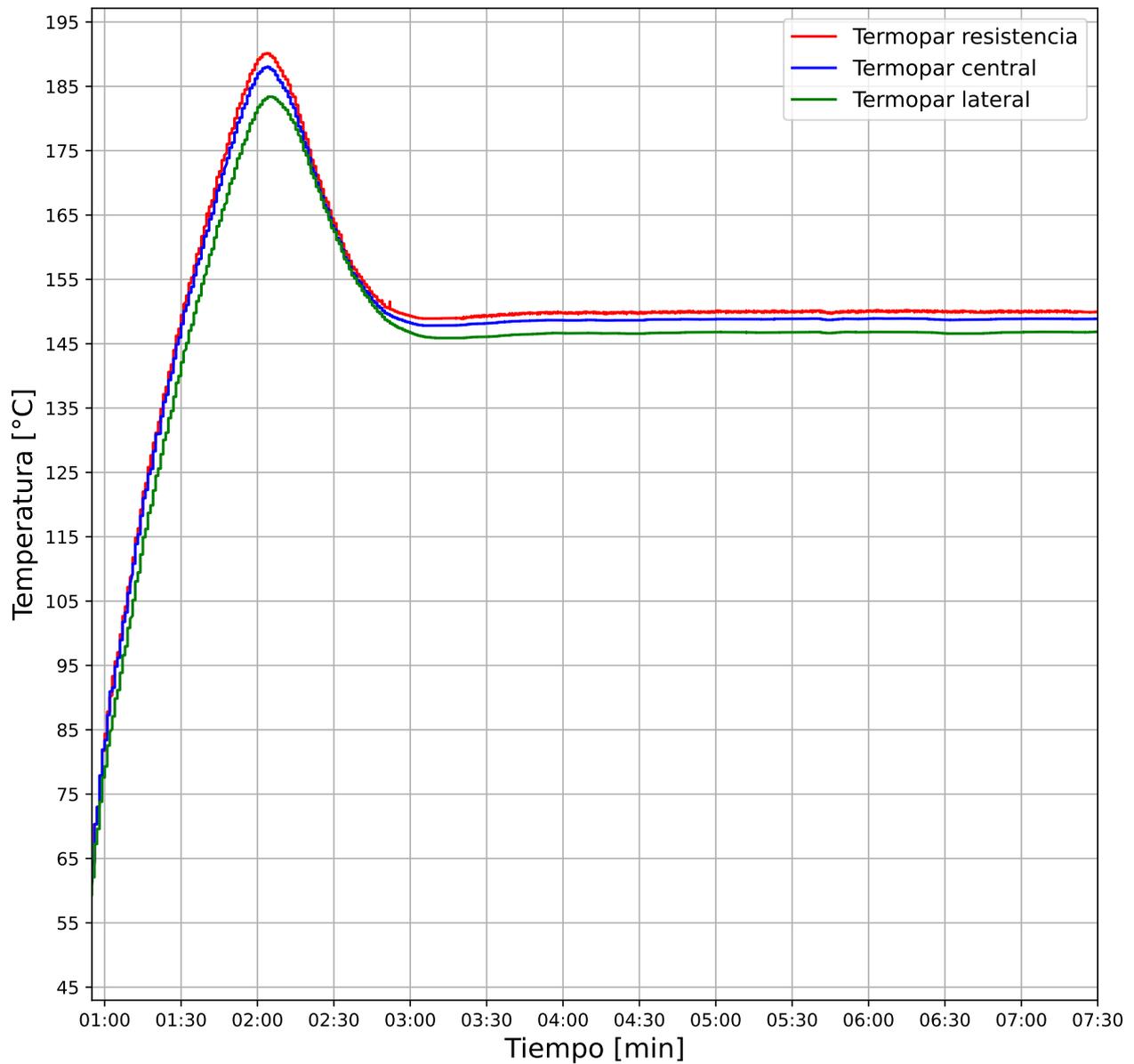


Gráfico 5.3: Comportamiento temperatura mordaza v4 a 150 [°C].

## Temperatura registrada en mordaza de aluminio 20

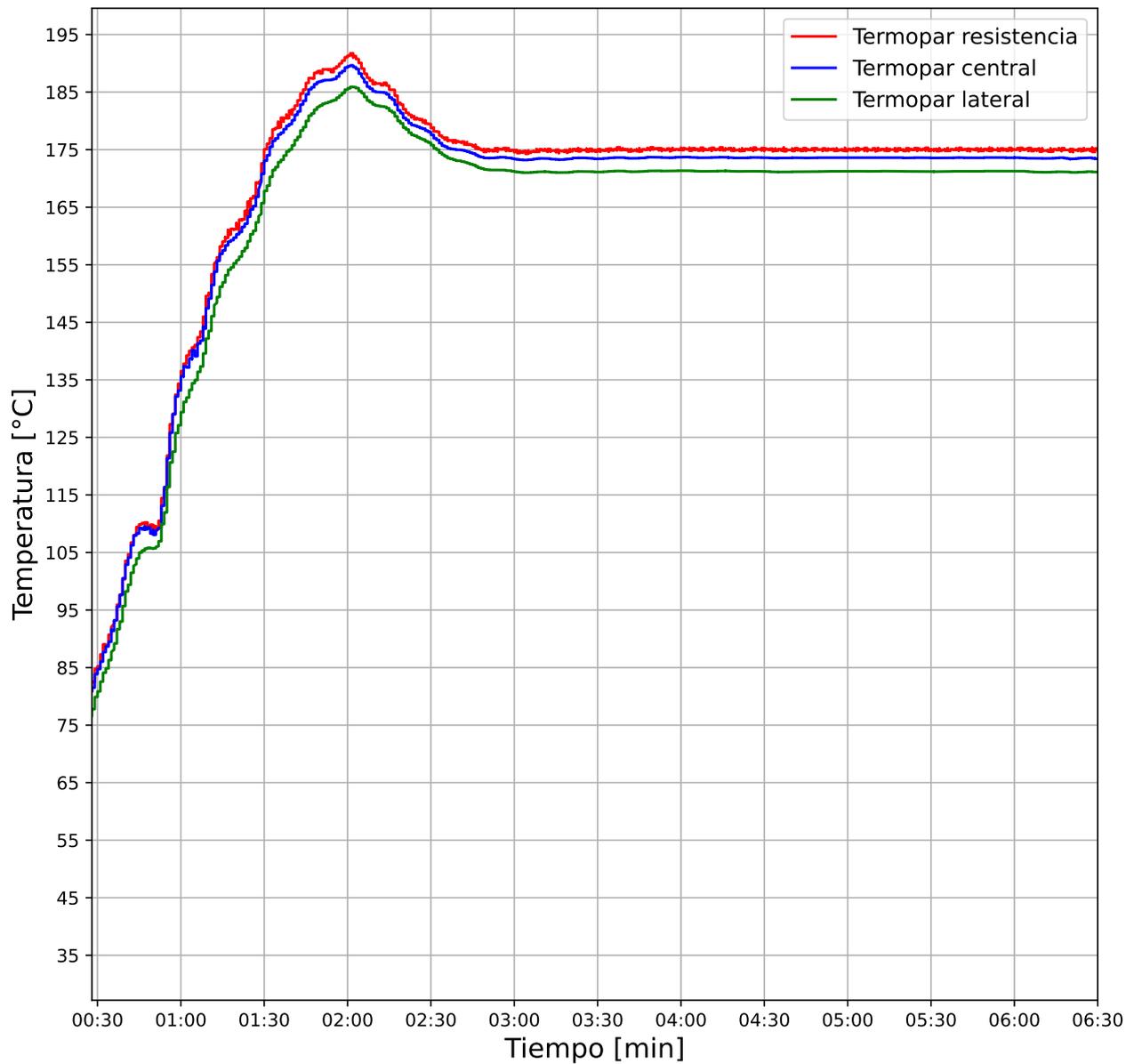


Gráfico 5.4: Comportamiento temperatura mordaza v4 a 175 [°C].

# Capítulo 6

## Conclusiones

Las conclusiones que se presentan a continuación demuestran el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de la investigación, así como se explica la relevancia de los hallazgos y se realizan propuestas útiles a los diferentes sectores involucrados en esta tecnología de sellado de películas multicapa.

- El proceso de diseño implementado permitió obtener criterios de selección de material, geometría y configuración de la instrumentación sobre el cuerpo de la mordaza.
- Es importante resaltar que las mordazas fabricadas en MACOR y aluminio demostraron una eficaz capacidad para sellar muestras de película multicapa. Se identificaron ventajas significativas en el uso de MACOR, como la facilidad de maquinado y su capacidad de aislamiento eléctrico. Sin embargo, el empleo de este material también presentó complicaciones durante el proceso, como una señal oscilatoria proveniente de los termopares, lo que dificultó su análisis, como se evidenció en las gráficas correspondientes.

En contraste, el aluminio reveló ventajas notables para el experimento gracias a su propiedad de alta transferencia de calor, una característica común en los metales. Además, la facilidad de maquinado del aluminio lo posicionó como un material más práctico en comparación con el MACOR. La única desventaja asociada al aluminio fue la necesidad de utilizar un proceso de aislamiento eléctrico para el alambre de nicromo. No obstante, esta dificultad pudo superarse mediante el uso de un barniz, tal como se mencionó anteriormente.

- En cuanto al material de la mordaza v1, se implementó un material cerámico llamado MACOR, con él se logró obtener muestras de sellado. El proceso experimental realizado con las mordazas de MACOR da acceso a nuevas investigaciones del uso de materiales poco convencionales en diseños de elementos mecánicos. Debido a las propiedades de los materiales cerámicos, como una baja conductividad térmica y eléctrica, en esta aplicación se analizaron las propiedades de aislamiento térmico y eléctrico de la mordaza durante el proceso de calentamiento.

Este es un hallazgo importante debido a que en la industria actual de fabricación de mordazas para sellado por cartuchos, solo son usados elementos mecánicos manufacturados en materiales metálicos. Por lo que se recomienda el uso de MACOR

en elementos mecánicos que requieran ser maquinados mediante desbaste de viruta y poseer las propiedades de un material cerámico.

- A partir del estudio de los resultados del comportamiento de la temperatura obtenidos mediante análisis numéricos y experimentales, se concluyó que la variable más relevante para obtener resultados interpretables es la conducción térmica de los materiales.

Desde el punto de vista de los resultados del análisis experimental, se observó que los termopares colocados en un material con baja conductividad eléctrica solo logran describir el comportamiento de los pulsos eléctricos usados para incrementar la temperatura del sistema. Mientras que los termopares colocados en un material con una alta conductividad térmica permiten adquirir los datos del comportamiento de la temperatura sobre la mordaza.

En términos de los análisis numéricos realizados por elemento finito, se observó que en los materiales con baja conductividad térmica el flujo de calor se queda encapsulado en volúmenes, específicamente cercanos a la fuente de calor, obteniendo así contornos de gradientes de temperatura elevados en zonas volumétricas específicas. Por lo que lo ideal para la aplicación es una transferencia de calor alta, propia de un material metálico.

Dada esta conclusión se hace énfasis en la necesidad de implementar materiales con una alta conductividad térmica y considerar el uso de un método para aislar eléctricamente la resistencia de los termopares. Esto con el fin de fabricar mordazas utilizadas en el proceso de sellado de películas multicapa. Esta idea coincide con el material *Dura-Therm*® reportado en el marco teórico.

- Como resultado del proceso de diseño se generaron criterios de selección de materiales, por lo que se concluyó que las versiones de mordazas manufacturadas en aluminio permitieron obtener mejores resultados con respecto a la versión realizada en MACOR debido a la diferencia de variación sobre la superficie de la mordaza. Desde la perspectiva de los resultados del proceso numérico y experimental, la conductividad térmica del aluminio permite una distribución de calor suficientemente homogénea y constante en la superficie de sellado para obtener sellados repetibles.

El proceso que se llevó a cabo es recomendado para ser implementado en la obtención de criterios de diseño de elementos mecánicos. Para esta aplicación se requirió un concepto de diseño enfocado en la transferencia de calor, pero es adaptable a conceptos de diseño de elementos mecánicos utilizados en la industria actual y futura.

Los siguientes hallazgos son relevantes, ya que permiten generar criterios de diseño a nivel geométrico para elementos mecánicos que como requerimiento de diseño se considera mantener una temperatura homogénea en alguna de sus superficies o volumen en particular.

- Una distribución homogénea y simétrica de la masa en la mordaza de sellado permite una disminución de gradientes de temperatura sobre la superficie de sellado. Esta

conclusión se obtuvo a partir de los resultados del análisis numérico por elemento finito. Se compararon los resultados de los contornos de distribución de temperatura de las mordazas v3 y v4, ambas fabricadas en aluminio, y se detectó que existen 2 temperaturas diferentes de 114.3 y 112.6 [°C] sobre la superficie de sellado en el caso de la mordaza v4 mientras que en la mordaza v3 se observa solamente una temperatura de 111.5 [°C] sobre la superficie de la mordaza . Esto se debe a que la mordaza v3 cuenta con mayor masa distribuida homogéneamente en la geometría con respecto a la mordaza v4.

Para las mordazas diseñadas en este trabajo de investigación se tuvo una limitación importante en cuanto al diseño geométrico, debido a forma en L del porta mordaza, lo cual significó que para obtener el ensamble se tuvo que considerar una geometría en L de la mordaza, obteniendo una geometría no simétrica. Se recomienda que las base en la que la mordaza será montada proporcione un ensamble de acuerdo a una pieza simétrica, así como un método de sujeción simétrico.

- En cuestión de la configuración de la instrumentación sobre el cuerpo de la mordaza se tienen dos tipos de elementos, resistencia como fuente de calor y termopares. Se concluyó que al ubicar la resistencia lo suficientemente cerca a la superficie de sellado de tal forma, que los contornos que representan el mayor flujo de calor del resultado del análisis numérico consideren la zona de superficie de sellado, de tal manera que obtenga un flujo de calor consistente hacia la zona de interés. Se tiene que tomar en cuenta que el resultado dependerá de la geometría y orientación de la resistencia, así como la cantidad de energía suministrada al sistema. Fue importante tener en cuenta que la geometría cilíndrica de la resistencia de nicromo, así como su diámetro y el material de fabricación, fueron restricciones de diseño.
- Como parte de los hallazgos obtenidos a partir de la fase de validación de las geometría de las mordazas, específicamente como una consideración de rediseño de la mordaza v1. Se concluyó que es necesario orientar la resistencia de forma paralela a la arista de mayor longitud de la superficie de sellado. Esta configuración es la adecuada con el propósito de obtener una distribución de temperatura de acuerdo a la geometría de la superficie de sellado, ya que el flujo de calor seguirá la orientación de ambos elementos, obteniendo así una distribución de temperatura paralela.
- Desde la perspectiva del proceso de validación experimental, se concluyó que el uso de barniz de impregnación para metal, dieléctrico utilizado en motores y transformadores para aislar eléctricamente la resistencia con respecto a los termopares puede ser utilizado para esta aplicación, debido a que la señal de temperatura obtenida por los termopares pudo ser correctamente interpretada y así se evitó la falla al involucrarse la corriente eléctrica de la resistencia y entrar en contacto con el cuerpo metálico de la mordaza.

Se recomienda colocar los termopares prioritarios a lo largo de toda la resistencia para así detectar discontinuidades de temperatura a lo largo de la mordaza. También es necesario colocar termopares que registren gradientes de temperatura sobre la interfaz de sellado y lograr obtener los gradientes con respecto a la fuente de calor, generado así una matriz de puntos de temperaturas conocidas.

## 6.1 Trabajo futuro

Los puntos listados a continuación son recomendaciones de actividades o estudios que se pueden realizar si es necesario continuar generando iteraciones de mordazas para el banco de pruebas o consideraciones para las próximas iteraciones de un banco de pruebas de sellado para películas multicapa.

- Realizar un análisis térmico que ilustre el instante justo en que la mordaza tiene interacción con la película multicapa y a su vez con su correspondiente mordaza superior o inferior. Se podría visualizar los resultados de distribución de temperatura, gradientes de temperatura y distribución de flujo de calor en su versión de contorno y de vectores, sobre ambos cuerpos de mordaza. Basándose en estos resultados sería posible generar una nueva iteración de mordaza.
- Correlacionar el comportamiento observado en la simulación térmica con los gráficos de las señales de los termopares, sería recomendable generar un proceso experimental con esta versión de mordaza. De esta forma se podría relacionar con los resultados de la mordaza v1 y v4.
- Rediseñar el porta mordaza implementado en el banco de pruebas con una geometría que haga posible ensamblar una mordaza que sea simétrica a lo largo de la superficie de sellado. Esto con el fin, como fue comentado en las conclusiones, de obtener una distribución de masa homogénea.

# Apéndice A

## Anexos del marco teórico.

### A.1 Inercia térmica.

La inercia térmica es gradiente de rapidez con el que la temperatura de un cuerpo se acerca a la del ambiente. Como se verá en la ecuación siguiente, la inercia térmica puede ser definida por la combinación de las propiedades del material del cuerpo:

$$I = \sqrt{k \rho C_p} \quad (\text{A.1})$$

- I: Inercia térmica [ $J/m^2 s^{\frac{1}{2}} \text{ } ^\circ\text{C}$ ].
- k: Conductividad térmica del material de la mordaza [ $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ].
- $\rho$ : Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].
- $C_p$ : Calor específico [ $J/\text{kg } ^\circ\text{C}$ ] [36].

La inercia térmica se define como la cantidad de energía calorífica que un cuerpo puede almacenar y liberar en un período específico, y esto está determinado por las propiedades térmicas de cada material. Esta relación se ilustra en la ecuación (A.1).

Esta propiedad es de vital importancia en la industria de la construcción, ya que es utilizada para seleccionar los materiales implementados y así analizar la eficacia energética dentro de las habitaciones ([48]). Por lo que en la literatura consultada se analiza la exergía en edificios en el cual visualizan la inercia térmica desde dos roles:

- **Resistencia térmica:** referente al nivel de aislamiento, entre el interior y el exterior se reduce el flujo de calor trasferido. Por lo que se genera una mayor atenuación de las oscilaciones de temperatura en el interior en relación con las exteriores.
- **Gradiente de temperatura:** la inercia térmica provoca un desplazamiento entre la máxima temperatura exterior y el máximo flujo de calor instantáneo trasferido al espacio interior. Es decir, existe un retraso en el instante en el que la temperatura alcanza su punto máximo en el interior en comparación con el pico máximo de temperatura al exterior [48].

Al combinar estos dos roles de la inercia térmica se busca una optimización del flujo de energía en los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Esta propiedad tendrá utilidad para observar de forma clara la diferencia del comportamiento del flujo de energía en forma de calor a través de los materiales implementados en la fabricación de las mordazas usadas en el banco de pruebas.

# Apéndice B

## Anexos del proceso experimental.

### B.1 Esquema del proceso experimental

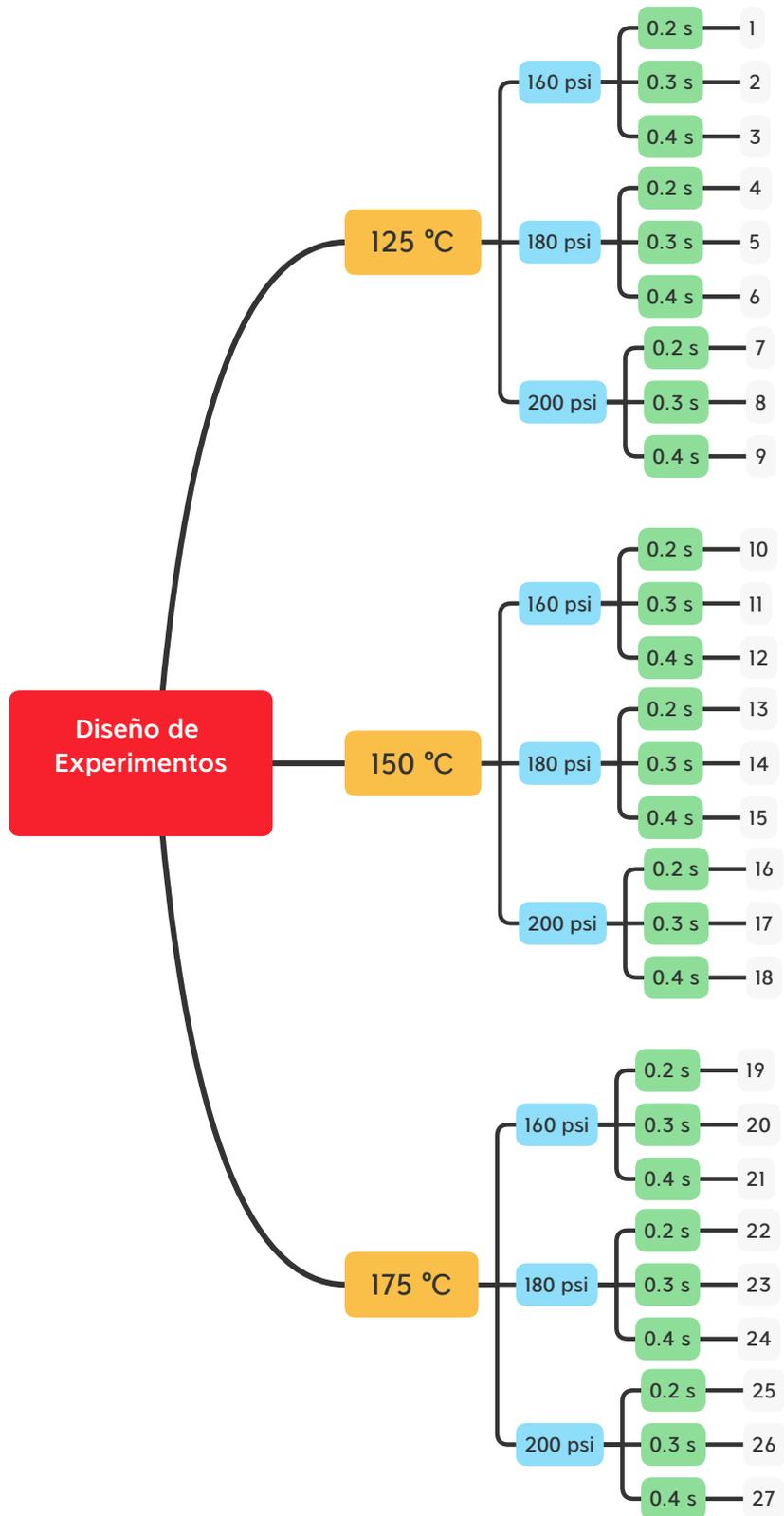


Figura B.1: Esquema del proceso experimental.

# Referencias

- [1] ALTAIR. Altair® optistruct®. Disponible en: <https://www.altair.com/es/optistruct/>. 02/01/2023.
- [2] ALTAIR UNIVERSITY. Learn Thermal Analysis with Altair OptiStruct. 147.
- [3] AMBITIOUSLY., E. Ni-9213. Disponible en: <https://www.ni.com/es-mx/support/model.ni-9213.html>. 22/02/2023.
- [4] AMBITIOUSLY., E. Pxie-6363. Disponible en: <https://www.ni.com/es-mx/support/model.pxie-6363.html>. 22/02/2023.
- [5] AMBITIOUSLY., E. Usb-6216. Disponible en: <https://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6216.html>. 22/02/2023.
- [6] ARAFA S. SOBH, H. M. A. H. Design and fabrication of automatic flowpacking machine: A reverse engineering approach. *International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy* (Marzo 2021), 5.
- [7] BEER, F. P., JOHNSTON, E. R., DEWOLF, J. T., AND MAZUREK, D. F. *Mecánica de materiales*, 5° ed. McGraw-Hill México, DF-México, 2010.
- [8] BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, K. J. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 10° ed. Mc Graw Hill, 2015.
- [9] ÇENGEL, YUNUS A., A. J. G. *Transferencia de calor y masa*, 4° ed. The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [10] CORNING SAS. MACOR Machinable Glass Ceramic For Industrial Applications. Disponible en: <https://www.corning.com/worldwide/en/products/advanced-optics/product-materials/specialty-glass-and-glass-ceramics/glass-ceramics/macor.htm>, 2020.
- [11] CORPORATION, G. Mordazas sella fácil™. Disponible en: <https://greenercorp.com/es/products/morsazas-de-sellado/mordazas-sella-facil/>. 15/01/2023.
- [12] DANI DIEHLMANN. A Flexible Path to a Circular Economy – FlexPack Voice. Disponible en: <https://flexpackvoice.com/news/fpa-news/fpa-news-post-2/>, 2020.
- [13] DEANS, M. What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)? Disponible en: [https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/#:~:text=Computer%20Aided%20Manufacturing%20\(CAM\)%20is,a%20product%20by%20generating%20toolpaths.,03](https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/#:~:text=Computer%20Aided%20Manufacturing%20(CAM)%20is,a%20product%20by%20generating%20toolpaths.,03) 2021.

- [14] DELANCEY, A. Six Common Causes for Thermocouple Temperature Measurement Errors. Disponible en: <https://blog.wika.us/products/temperature-products/six-common-causes-thermocouple-temperature-measurement-errors/>, 03 2019.
- [15] DEMEUSE, M. T. *Biaxial stretching of film : principles and application*, primera ed. Oxford : Woodhead Publishing, 2011.
- [16] DIAMOND, R. We203 (ul). Disponible en: <https://royal-insulation.com/we-203-ul>. 27/02/2023.
- [17] ELECTROSTÁTICAS, S. Envasadora vertical. Disponible en: <https://electrostatica.com/aplicaciones-2/aplicaciones-embalaje/envasadora-vertical/>.
- [18] ESPARZA, E. Fresas para metal. Disponible en: <https://maquineros.com/maquinas-herramienta/fresadora-manual/fresas-para-metal/>, 1 2020.
- [19] FESTO. Unidad de filtro y regulador. Disponible en: <https://www.festo.com/es/es/a/529208/?q=~:sortByFacetValues-asc>.
- [20] FOUCHE, J. Engranés gastados causan problemas en envolvedoras horizontales. Disponible en: <https://p3solutionsblog.com/es/engranés-gastados-causan-problemas-en-envolvedoras-horizontales/>.
- [21] FRANCISCO EMMANUEL CERÓN RICO, MISAEL CHÁVEZ ROMERO, R. T. A. *Bancos para el sellado térmico y la prueba de tracción en materiales*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [22] GALVIS, V. M. O. *Diseño y construcción de un banco conceptual para el sellado continuo de películas multicapa de polipropileno biorientado*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.
- [23] GONZALEZ, F. *Planificación de procesos de mecanizado*. Alianza Editorial, Madrid, España, 2015.
- [24] GREEN, M. Lista de Verificación de Solución de Problemas en Envolvedoras Horizontales. Disponible en: <https://p3solutionsblog.com/es/lista-de-verificacion-de-solucion-de-problemas-en-envolvedoras-horizontales/>, 11 2021.
- [25] GUTIÉRREZ ARANZETA, C. *Física general*. McGraw-Hill, 2009.
- [26] HALL, H. *Milling: A Complete Course (Workshop Practice)*. Trans-Atlantic Publications, 2004.
- [27] HERRMANN ULTRASCHALL TECHNIK GMBH & CO. KG. Sellado por ultrasonido. Disponible en: <https://www.herrmannultraschall.com/es/welding-using-ultrasonics/welding-of-packaging/sellado-por-ultrasonido>.
- [28] HISHINUMA, KAZUO, P. *Heat Sealing Technology an engeering for packaging*. DES-tech Publications, 2009.

- [29] HOU-CHENG HUANG, A. S. U. *Finite Element Analysis for Heat Transfer Theory and Software*, 1° ed. Springer-Verlag London Limited, 1994.
- [30] J., JIGNESH, S. CNC Machining: Definition Types of CNC Machine. Disponible en: [https://www.engineeringchoice.com/what-is-cnc-machining-and-types-of-cnc-machine/?relatedposts\\_hit=1](https://www.engineeringchoice.com/what-is-cnc-machining-and-types-of-cnc-machine/?relatedposts_hit=1), 8 2022.
- [31] J., JIGNESH, S. What is Milling?- Definition, Process, and Operations. Disponible en: <https://www.engineeringchoice.com/what-is-milling/>, 8 2022.
- [32] KARL T. ULRICH, S. D. E. *Diseño y desarrollo de productos.*, 5° ed. McGRAW-HILL, 2012.
- [33] KAUSHIK KUMAR, DIVYA ZINDANI, J. P. D. *Mastering SolidWorks*, 1° ed. Springer Nature Switzerland, 2020.
- [34] M., MOHSEN, S., AND D.D., DAVOOD DOMAIRRY, G. *Applications of Nanofluid for Heat Transfer Enhancement*. William Andrew.
- [35] MEIRA, G. R., AND GUGLIOTTA, L. M. *Polímeros Introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización, Applications, and Regulations*. Ediciones unl, 2022.
- [36] MELLON, M. T. High-resolution thermal inertia mapping from the mars global surveyor thermal emission spectrometer, Julio 2000.
- [37] MORRIS, B. A. *The Science and Technology of Flexible Packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use*, 1° ed. Front Matter, 2017.
- [38] NASA. Samantha Cristoforetti Seen Taking a Drink in the Unity Module | NASA. Disponible en: <https://www.nasa.gov/content/samantha-cristoforetti-seen-taking-a-drink-in-the-unity-module>, 2018.
- [39] NORTON, R., AND MURRIETA, J. *Diseño de maquinaria*. McGraw-Hill Education, New York, Estados Unidos, 2012.
- [40] OMEGA. Termopar: Tipos y aplicaciones. Disponible en: <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>, 2021.
- [41] OMEGA. Termopares aislados. Disponible en: [https://mx.omega.com/pptst/5LSC\\_5SRTC.html](https://mx.omega.com/pptst/5LSC_5SRTC.html), 2021.
- [42] OMRON. Zx2. Disponible en: <https://industrial.omron.es/es/products/zx2>.
- [43] ORTIZ, L. A. S. *Estudio comparativo del diseño de placas de prensado para el sellado de empaques de películas multicapa*. PhD thesis, 2019.
- [44] PAHL, G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J., AND GROTE, K.-H. *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd ed. ed. Springer, 12 2006.
- [45] PÉREZ ESPEJEL, DIANA ALEJANDRA, RAMOS GÓMEZ, EDGAR ALI, ECALANTE CAMARGO, MAURICIO IVÁN, MERINO PALOMINO, D. Manual de prácticas del laboratorio de Transferencia de Calor. 1–86.

- [46] RADEBAUGH, RAY, P. B. Aluminum 6061-T6 (UNS AA96061) | NIST. Disponible en: <https://www.nist.gov/mml/acmd/aluminum-6061-t6-uns-aa96061>, 2018.
- [47] RATTAT, C. *CNC Milling for Makers*. dpunkt.verlag, 2017.
- [48] SALA, J., AND PICALLO, A. *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings*. Elsevier Gezondheidszorg.
- [49] SELKE, S. E., AND PAULSON, A. J. *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*. Wiley, Hoboken, NJ, 2016.
- [50] SOFTWARE, S. D. I. Computer-Aided Engineering (CAE). Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>.
- [51] SOLUTIONS, W. P. Sustainable bags. Disponible en: <http://wjpkg.com/sustainable-bags/>.
- [52] TODD BUKOWSKI, M. R. *A Holistic View of the Role of Flexible Packaging in a Sustainable World*. 2018.
- [53] ULLMAN, D. G. *The Mechanical Design Process, Processing, Applications, and Regulations*, 4° ed. McGrawHill, 2010.
- [54] URIBE JUÁREZ, J. Problemáticas en las tecnologías de sellado. *Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 1–7.
- [55] URIBE JUÁREZ, J. E., CORONA-LIRA, M. P., AND RAMÍREZ-REIVICH, A. C. A study of the impact of high-speed sealing parameter gradients on the seal strength in a multilayer polypropylene film. 145–155.
- [56] W. SHIPP, D., SINJAB, F., AND NOTINGHER, I. Raman spectroscopy: techniques and applications in the life sciences. 315–427.
- [57] WHITE, J. R. *Introducción a la ciencia y tecnología de los polímeros*. Limusa, México, D.F., 2003.
- [58] WOJTECH, M. CALOR : Mejorando La Calidad y Consistencia del Sello cuchilla envolvente vertical fugas. Disponible en: <https://p3solutionsblog.com/es/calor-mejorando-calidad-de-sello-y-uniformidad/>, 2021.
- [59] ÇENGEL, Y. A., AND BOLES, M. A. *Termodinámica*, octava ed. McGraw-Hill Education, 2015.