

## “Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente”

Horacio Daniel Escobar Zacur<sup>a,1</sup> C.e.:hescobar@fiuna.edu.py,  
Renatto Daniel Benzo Leguizamon<sup>a,2</sup> C.e.:rbenzo@fiuna.edu.py,  
Prof. Ing. PhD. Diego H. Stalder<sup>b,1</sup>, Prof. Ing. Gustavo Martinez<sup>b,2</sup>, Prof. Ing. MSc. Marcial Almada<sup>b,3</sup>

<sup>a</sup> Alumno, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.

<sup>b</sup> Tutor, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.

Palabras Clave	Resumen
Matriz Plástico Inyección Electrocardiógrafo	Este trabajo presenta una propuesta de diseño mecánico guiado por CAD de una matriz de inyección para la manufactura en gran escala a bajo costo de la carcasa de un electrocardiógrafo inteligente. La matriz propuesta es sencilla y económica, cumpliendo con los requerimientos de seguridad y producción necesarios. El diseño de la matriz se logró a través de una serie de análisis a partir de un modelo inicial, incluyendo simulaciones sucesivas de inyección para mejorar el modelo y el diseño de todas las piezas de la matriz de inyección. Se realizó un análisis completo de la matriz para verificar el cumplimiento de los requisitos del sistema de refrigeración y se estimaron variables relevantes, como el tiempo de llenado, las distribuciones de presión y deformaciones.
Keywords	Abstract
Mold Plastic Injection Electrocardiograph	This work presents a proposal for CAD-guided mechanical design of an injection mold for large-scale, low-cost manufacturing of a wearable intelligent electrocardiograph. The proposed mold is simple and economical, meeting the necessary safety and production requirements. The mold design was achieved through a series of analyses starting from an initial model, including successive injection simulations to improve the model and the design of all parts of the injection mold. A complete analysis of the mold was performed to verify compliance with the cooling system requirements, and relevant variables such as filling time, pressure distributions, and deformations were estimated.

### 1. Introducción

La fabricación de productos de alta calidad requiere una cuidadosa planificación y diseño, y esto es especialmente cierto en el caso de productos médicos, como un electrocardiógrafo inteligente. La carcasa del electrocardiógrafo es uno de los componentes clave que protege los circuitos electrónicos y los sensores del dispositivo. El electrocardiógrafo inteligente es un aparato eléctrico que capta los potenciales eléctricos del corazón registrando el voltaje que este genera. El mismo registra los datos en tiempo real y los transmite a una aplicación de celular que finalmente los manda a un sistema de procesamiento en la nube [1].

La inyección con matrices es una de las operaciones de procesamiento de polímeros más significativa en la industria del plástico. Caracterizado por la producción de piezas plásticas de geometría compleja y con significativo potencial para la reducción de los tiempos de diseño y manufactura, calidad global, buen dimensionamiento y cambios rápidos de diseño; consideradas como los principales “cuellos de botella” [2]. En este contexto, el diseño de una matriz de inyección de plásticos es una tarea crítica y esencial en la fabricación de la carcasa de un electrocardiógrafo inteligente. Un diseño cuidadoso garantiza la precisión y la calidad del producto final, al

mismo tiempo que reduce los costos de producción y aumenta la eficiencia del proceso de fabricación. El proceso de inyección de plástico tiene por fundamento la inyección de un polímero fundido en una matriz cerrada, donde solidifica para dar el producto deseado.

### 2. Objetivos, Justificación y Alcance

#### 2.1. Objetivos del Trabajo

##### 2.1.1. General

*Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.*

##### 2.1.2. Específicos

Determinar los materiales óptimos que cumplan con estándares de diseño y producción.

Analizar la geometría y el funcionamiento de una máquina inyectora de plásticos.

Modelar según los fenómenos que se producen en la matriz durante el proceso de inyección de plástico.

Analizar los resultados de las simulaciones obtenidas con un software CAD (por sus siglas en inglés, Computer-Aided Design).

Obtener, con el software CAD, el diseño de la matriz óptima para el proceso.

## 2.2. Justificación

El cuidado de la salud cardiovascular es importante porque es una de las primeras causales de muerte a nivel global. Se estima que cada año mueren 17.9 millones de personas por esta causa, en 2019, representando el 32% del total de todas las muertes [3]. Dentro del ámbito de la salud son muy bien conocidas las faltas que existen y dada su importancia, se considera una gran fuente de progreso hacia la mejora de la salud social a nivel nacional [4].

En el contexto de la ingeniería mecánica el diseño de matrices de inyección de plásticos es un proceso complejo y sistemático. El mismo logra materializar todas las ideas previas de diseño y de materiales que competen al proyecto, con la finalidad de la producción a escala del producto de tal manera que sea de bajo costo y accesible para el público.

## 2.3. Alcance

El presente trabajo se concentra en el uso de un software de diseño y simulación para la generación de un matriz de inyección. El proceso de diseño, a partir del propósito de la carcasa, parámetros económicos y constructivos; tiene como principal objetivo la obtención de las dimensiones, geometría y una visualización de la matriz. Durante el proceso se verificará que las tensiones, deformaciones y niveles de presión sean seguros y adecuados para lograr una inyección adecuada del material.

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Electrocardiógrafo Inteligente

Un electrocardiograma inteligente está diseñado para monitorear el ritmo cardíaco del usuario de manera continua y no invasiva. Este tipo de dispositivo puede ser usado por personas que desean monitorear su ritmo cardíaco por razones médicas o deportivas, o por profesionales médicos que necesitan monitorear a sus pacientes de forma remota.



**Figura 3.1:** Impresión 3D del diseño provisto.  
**Fuente:** Fotos tomadas en el Laboratorio de Ensayos de Equipamientos Médicos, Prof. Ing. Diego Stalder.

La Figura 3.1 muestra uno de los prototipos de un Electrocardiógrafo inteligente desarrollado en la Facultad de Ingeniería en conjunto con una Startup denominada BPS Tecnología e Innovación en el contexto de un convenio de cooperación y un proyecto Proinnova. La que nos interesa para este trabajo es la carcasa que al mismo tiempo protege el sistema electrónico interno y provee de base para los electrodos y cables.

### 3.2. Partes de Interés

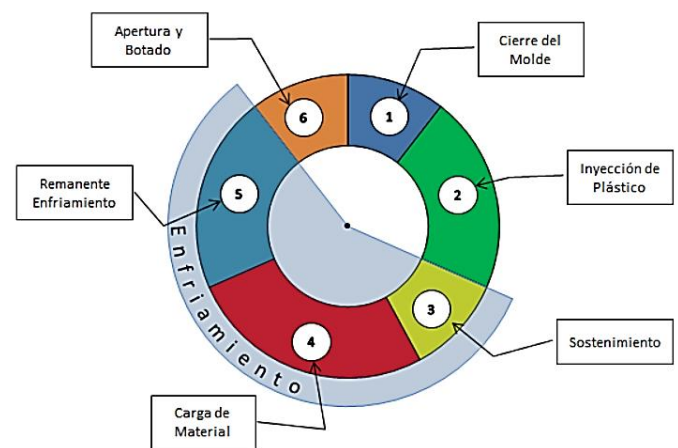
La que nos interesa para este trabajo es la carcasa que al mismo tiempo protege el sistema electrónico interno y provee de base para los electrodos y cables. Consta de dos tapas con agujeros respectivos para luces, electrodos y cables.

### 3.3. La Inyección de Plásticos

Es un proceso de manufactura en el cual se funde el plástico y se inyecta en una matriz que conforma el plástico a la imagen de la pieza deseada utilizando una maquina propia para la labor llamada maquina inyectora.

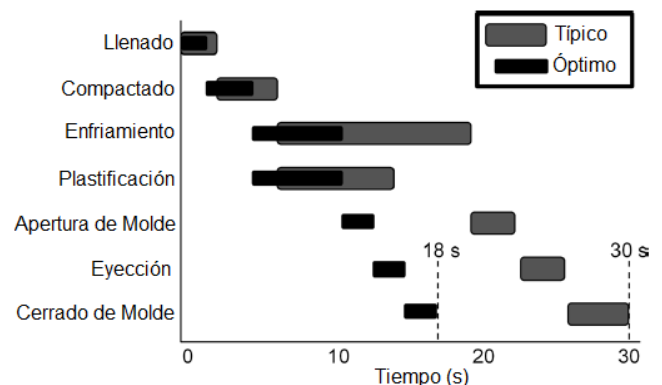
Se escoge este proceso en casos que se desee realizar la manufactura de una pieza plástica a gran escala, debido a que bajo estas condiciones se puede realizar de forma rentable.

### 3.4. El Ciclo de Inyección



**Figura 3.2:** El Ciclo de Inyección.  
**Fuente:** José Flores, Plastics Technology Mexico, 2016.

La Figura 3.2 demuestra las etapas de un ciclo de inyección típico y con sus etapas básicas. Los tiempos de un ciclo típico y uno optimizado se ven contrapuestos en la Figura 3.3, es posible disminuir el tiempo del ciclo para el procesamiento de una pieza particular invirtiendo en tecnologías avanzadas para diseño de matrices de inyección.

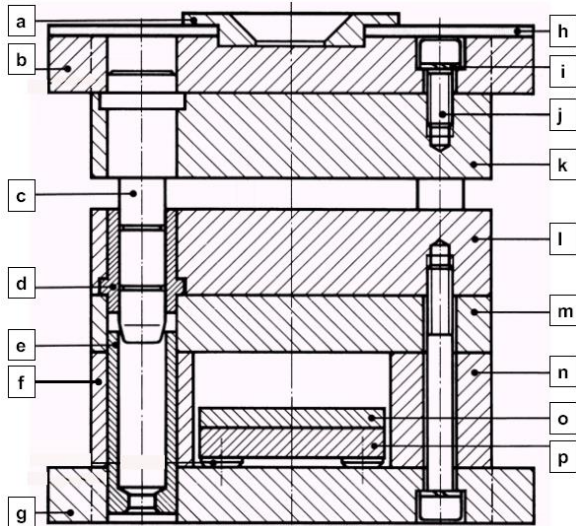


**Figura 3.3:** Tiempos del proceso de conformado por inyección.

**Fuente:** David O. Kazmer, Injection Mold Design Engineering, 2016.

### 3.5. La Matriz para Inyección de Plásticos

Es la herramienta encargada de conformar el plástico fundido que se inyecta dentro de su cavidad principal para obtener el producto deseado. Para poder resistir todas las cargas a las que será sometida, debe ser una herramienta diseñada con gran detalle, robusta y segura. Este trabajo se realizó con base en la matriz de la Figura 3.4 que cumple con los objetivos que se desean cumplir.



**Figura 3.4:** Estructura convencional.

**a:** Anillo de ubicación de la mitad fija; **b:** Plato base de la mitad fija; **c:** Pin guía; **d:** Casquillo guía; **e:** Casquillo de ubicación; **f:** Espaciador para la caja eyectora; **g:** Plato base de la mitad eyectora; **h:** Plato aislante (en caso de altas temperaturas); **i:** Dispositivo tranca tornillos; **j:** Tornillo principal; **k:** Plato marco de la mitad que contiene fija que contiene los insertos; **l:** Plato marco de la mitad eyectora; **m:** Plato soporte; **n:** Barra soporte; **o,p:** Platos de eyectores. **Fuente:** Günter Mennig, Klaus Stoeckert; Mold-Making Handbook, 2013.

## 4. Metodología

### 4.1. Secuencia de Análisis

El proceso de diseño que se definió como “De adentro hacia afuera”, es decir, iniciando con la cavidad y el ciclo de inyección hasta llegar a la estructura externa. Este se separó en análisis individuales con objetivos y configuraciones particulares para cada uno.

### 4.2. Sensibilidad al Mallado

Este estudio provee de garantías relativas a la fidelidad y la independencia de los resultados al tipo y calidad del mallado elegido para las simulaciones.

### 4.3. Configuración de las Simulaciones

Se realizaron con base en los objetivos planteados para cada análisis. El rango de variables que entran dentro de lo que conforma la configuración de cada análisis depende de lo que se desee crear/optimizar en ese análisis en particular.

### 4.4. Proceso Iterativo de Optimización

La forma en la que se asegura que se hayan cumplido los objetivos es a través de iteraciones y comparaciones de los

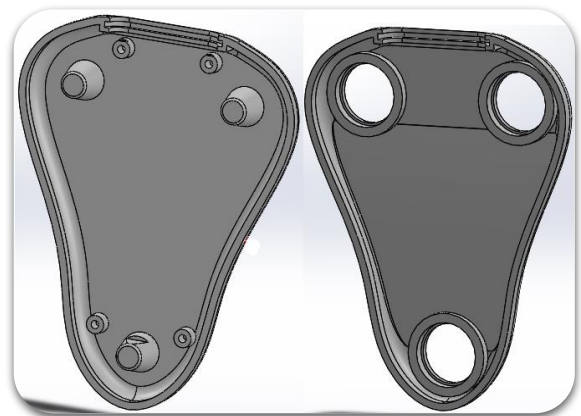
resultados gráficos y numéricos de cada simulación dentro de cada análisis. Al terminar la comparación se determina si se cumplieron los objetivos o no, en caso positivo, se pasa al siguiente análisis, y en caso negativo se reitera el análisis cambiando la configuración.

## 5. Conceptos Guía

Los conceptos de economía y simpleza como parámetros de diseño principales nos permiten tener un camino claro a la hora de tomar las decisiones específicas del diseño. Todas las decisiones tomadas tienen la finalidad de producir la matriz más sencilla y barata que cumple con todos los requisitos de seguridad y producción eficiente de calidad.

Otros parámetros de diseño mecánico y del ciclo de inyección se basaron en el libro que adoptamos como guía llamado “Injection Mold Design Engineering” [5], que en español se traduce como “Ingeniería de Diseño para Molde de Inyección”.

## 6. Modelo Provisto



**Figura 6.1:** Modelo CAD provisto de la carcasa. **Fuente:** Propia.

### 6.1. Análisis del Modelo

Ambas tapas de la Figura 6.1 tienen un hueco donde se ubica el conector Pogo pin y un espesor nominal de 1,5mm. Denominaremos a la tapa con soportes tronco-cónicos como “Tapa 1” y a la que tiene agujeros para los electrodos “Tapa 2”, la Tapa 1 también tiene pequeñas entradas cilíndricas para tornillos de sujeción para la placa y batería.

### 6.2. Consideraciones y Modificaciones del Modelo

Se consideraran que las modificaciones del modelo de la Figura 6.1, incluyen, no solo geométricas, sino también las propiedades térmicas y de producción, que son mejoras si es que cumplen con el cometido de optimizar el proceso de inyección en sus distintos aspectos, determinados por fenómenos físicos durante el flujo, el empaquetado, la deformación, la eyección y la refrigeración.

Las variables a considerar son un conjunto grande, que interactúan entre sí, pueden ser controlables o no controlables y sus niveles de importancia y consideración cambian en cada análisis, por lo que se definen a todas las nombradas en el siguiente apartado como variables de interés para determinar si es que fue optimizado el proceso de inyección a través de las mejoras.

## 7. Parámetros y Variables

### 7.1. Parámetros

#### 7.1.1. Materiales Principales

Para este trabajo se decidió utilizar el polímero denominado PP (polipropileno); esto se debe a varias razones: es de alto flujo y de alto grado de impacto para productos de consumición [5]. Tiene buena resistencia, sin ser muy duro, como producto final no es tóxico al contacto con la piel y es un termoplástico, lo que agrega valor de reciclabilidad.

Como acero principal se optó por el AISI P20; por los siguientes motivos: muy utilizado para la fabricación de matrices, fácilmente mecanizable y con buena resistencia a la fatiga, a la abrasión y al impacto.

#### 7.1.2. Diseño Mecánico - Matemático

Encontrar valores aproximados, límites superiores e inferiores, máximos y mínimos; son el objetivo principal de todas las fórmulas matemáticas utilizadas en el trabajo. Una característica general de los valores encontrados con este fundamento matemático para el trabajo es el obtener resultados conservadores, es decir, con un índice de seguridad alto ya que estos están premeditadamente sobredimensionados.

#### 7.1.3. Nociones Básicas

Consideramos nociones básicas para el ciclo de inyección de plástico, todas las relacionadas a la dinámica de fluidos; por ejemplo la noción de que un fluido fluye mejor en esquinas redondeadas que en esquinas con ángulos. Este tipo de nociones comprobadas fueron aplicadas directamente y tomadas como optimizaciones si ya no forman parte del diseño la pieza. También fueron consideradas de esta forma todas las que el libro escogido como guía [5] supone como mejoras de diseño. Dentro de estas la más importante es la homogeneidad en la distribución de la que afecta cada variable.

Todas estas son nombradas específicamente a medida que fueron necesarias y utilizadas.

### 7.2. Variables

#### 7.2.1. Tiempo de Ciclo

De entre los parámetros de producción, este es uno de los más importantes porque define la parte más crucial del proceso de manufactura que tendrá un impacto directo en la rentabilidad del emprendimiento. Esta es la suma del tiempo de llenado, tiempo de empaquetado (que a su vez es la suma del tiempo de mantenimiento de la presión y de refrigeración).

#### 7.2.2. Burbujas de Aire

Es el fenómeno en el que se generan pequeñas burbujas de aire durante el llenado. Este fenómeno nos interesa porque es un indicador de la calidad final de la pieza inyectada. Las burbujas de gas sometidas a altas presiones y temperaturas ocasionan el Efecto Diésel, que deja marcas de negras de quemado y no permiten el llenado completo de la cavidad (tiro corto). Es un fenómeno físico que se debe evitar.

#### 7.2.3. Presión en Canales y Cavidades

Este es un parámetro que, en conjunto con la Facilidad de Llenado, nos permite garantizar el llenado completo y también un buen inicio de la etapa de empaquetado. Las caídas de presión durante el ciclo son controladas y definidas para obtener la distribución deseada. Este es un fenómeno físico que se puede predecir y definir con cierto grado de confianza.

#### 7.2.4. Líneas de Soldadura

Estas líneas son resultado de encuentros de dos frentes de flujo en el volumen de control. Son líneas en las que se concentran las tensiones y pueden deformar localmente la pieza. Es prácticamente imposible que no existan, pero se pueden manipular para que afecten en una zona no visible del modelo o que se formen en una zona en la que serán pequeñas, porque en el mejor de los casos resulta un defecto estético o en el peor de los casos pueden generar la rotura de la pieza final. Este es un fenómeno físico que se puede predecir y definir con cierto grado de confianza.

#### 7.2.5. Tensión y Tasa de Cizalla

La tensión de cizalla es el fenómeno en el cual se crean fuerzas y tensiones paralelas a las superficies de las cavidades por la interacción entre el flujo de plástico fundido con las paredes de la cavidad y entre el flujo plástico fundido con capas de plástico solidificado estacionarias. La tasa de cizalla es nada más que la frecuencia con la que ocurre. Estas variables están acotadas por el tipo de material elegido, dado que cada material tiene valores máximos a los que se lo puede someter antes que empiece a afectar negativamente al proceso.

#### 7.2.6. Temperaturas

Existen muchas temperaturas diferentes en el ciclo de inyección de plásticos, algunas controlables y otras combatibles, pero el principio de homogeneidad en la distribución de estas es lo primordial. Como ejemplos podemos nombrar: Temperatura al final del llenado, Temperatura del frente de flujo, Temperatura al final del llenado y post-llenado, Temperatura del plástico inyectado (en el barril de la máquina inyectora), Temperatura del molde, Temperatura de transición cristalina, Temperatura de No Flujo, Temperatura de Eyección

#### 7.2.7. Fuerza de Cierre

Estas variables son resultado del cálculo de las fuerzas necesarias para contrarrestar la fuerte presión de inyección que produce durante el ciclo. Esta se puede controlar y definir para que el molde no se separe durante ninguna de las etapas del ciclo, u ocurra el denominado “Flashing”, que es el filtrado de plástico fundido en forma de una fina capa entre las placas que deberían sellar completamente los canales y las cavidades.

#### 7.2.8. Facilidad de Llenado

Este parámetro nos permite conocer las áreas de la cavidad en las que ocurren, o tienen altas probabilidades de que ocurra, un tiro corto; es decir, que existen porciones del volumen de control a las que no llegó el plástico fundido. Es un fenómeno físico resultante.

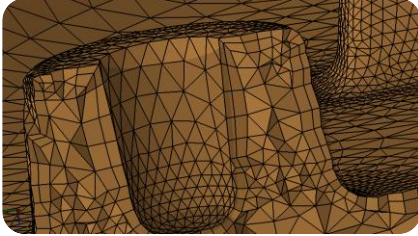


## 8. Diseño de Sistemas Incorporados

### 8.1. Cavity, Sistema de Inyección y Sistema de Refrigeración

Se muestran las simulaciones, los resultados y conclusiones.

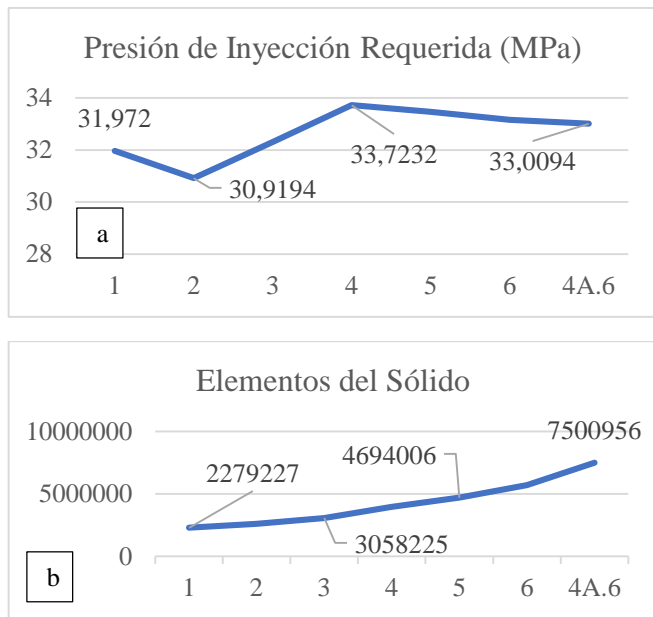
#### 8.1.1. Sensibilidad al Mallado



**Figura 8.1:** Representación Tetraédrica Híbrida del volumen de control.

**Fuente:** Propia.

El tipo de mallado definido como el ideal para nuestro caso es el Tetraédrico Híbrido de la Figura 8.1. En las figuras siguientes se muestran los resultados enfrentados en dos gráficos. Las variables tomadas fueron: Presión de Inyección Requerida, Elementos del Sólido (la cantidad de tetraedros y cuñas que representan el sólido) y el número de iteración.



**Figura 8.2:** Gráficos de Convergencia

**a:** Presión de Inyección vs Número de Iteración;  
**b:** Elementos del Sólido vs Número de Iteración.

**Fuente:** Propia.

Es notorio en la Figura 8.2 que a medida que aumenta la cantidad de elementos del sólido se produce la convergencia de la variable, que inclusive ya tiene un rango de error muy bajo, hasta el valor final de 33 MPa. Se puede apreciar que a partir de la 4ta iteración ya el error se mantiene alrededor del 2% con respecto al valor de referencia, que es el valor final del 4to análisis 6ta iteración (4A.6 en la Figura 8.2).

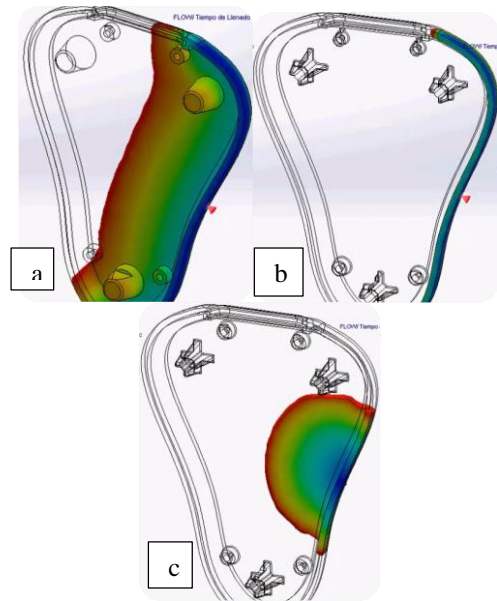
#### 8.1.2. 1er Análisis: Diseño Provisto y 2do Análisis: Optimizaciones y Punto de Inyección

Las condiciones y objetivos para el 1er análisis son:

- Preliminar:** se genera un conjunto de datos que se toman como punto de partida.
- Genérico:** porque las condiciones del análisis no necesariamente son realistas ni específicas a nuestro caso.
- Optimización:** porque se busca mejorar la cavidad (definida por la pieza CAD), que finalmente mejora el proceso de inyección.
- Iterativo y Comparativo:** es el método para comprobar que las mejoras planteadas lograron su cometido.

Las condiciones y objetivos para el 2do análisis son:

- Realista:** porque las condiciones del análisis derivan de las restricciones reales y específicas a nuestro caso.
- Optimización:** porque se busca mejorar la cavidad (definida por la pieza CAD), que finalmente mejora el proceso de inyección.
- Iterativo y Comparativo:** es el método para comprobar que las mejoras planteadas lograron su cometido.



**Figura 8.3:** Tapa 1 - Llenado de la Cavidad

**a:** 1er Análisis; **b:** 1ra iteración del 1er Análisis;  
**c:** 2do Análisis.

**Fuente:** Propia.

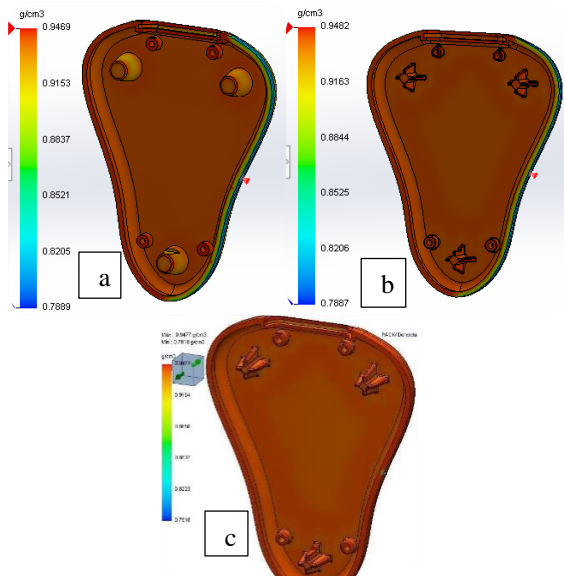
**Tabla 8.1:** Comparativa Tapa 1 - Tiempo de Ciclo

PROPIEDADES	Análisis			Diferencia (1er y 1er - Ite.)	Diferencia (1er - Ite. y 2do)
	1er	1er - Ite.	2do		
Tiempo (s)	19,7	17,6	17,2	-2,1	-0,4
	Variación (1er y 1er Ite.)		Variación (1er - Ite. y 2do)		
	-10,51%		-2,33%		

**Fuente:** Propia.

**“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”**

Las Figuras 8.3.a. y 8.3.b. se diferencian por la geometría de los soportes tronco-cónicos y las dimensiones de los tubos para los tornillos; a estos se les cambió todos los ángulos por redondeos y se disminuyó el espesor de los tubos para los tornillos, de tal manera a que todas las dimensiones tengan el valor del espesor nominal, o uno cercano. La Figura 8.3.c es el resultado del 2do Análisis agregando una entrada rectangular de 0,75 x 0,375 mm, resultando en un flujo radial mucho más efectivo y realista. La Tabla 8.1 compara las variaciones, tomadas de a dos de los resultados, demostrando mejoras de 10,5% y 2,3% para el tiempo de ciclo.



**Figura 8.4:** Tapa 1 - Distribución de Densidad  
**a:** 1er Análisis; **b:** 1ra iteración del 1er Análisis;  
**c:** 2do Análisis.  
**Fuente:** Propia.

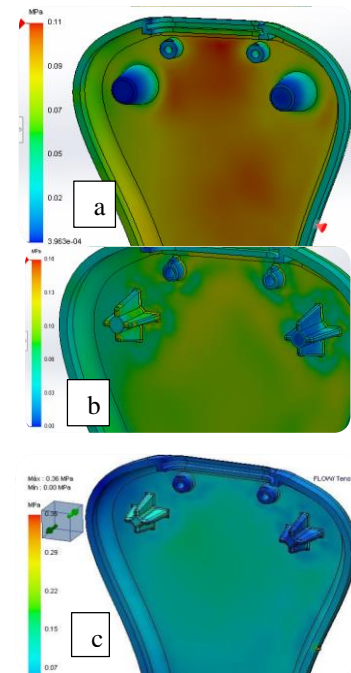
**Tabla 8.2:** Comparativa Tapa 1 - Volumen y Masa

PROPIEDAD	Análisis			Diferencia (1er y 1er - 1er Ite)	Diferencia (1er - 1er Ite y 2do)
	1er	1er - 1er Ite	2do		
<b>Vol (cm³)</b>	6,39	5,91	6	-0,48	0,09
<b>Masa (g)</b>	5,85	5,41	5,49	-0,44	0,08
	<b>Variación (1er y 1er - 1er Ite)</b>	<b>Variación (1er - 1er Ite y 2do)</b>			
	-7,5%	1,52%			
	-7,5%	1,48%			

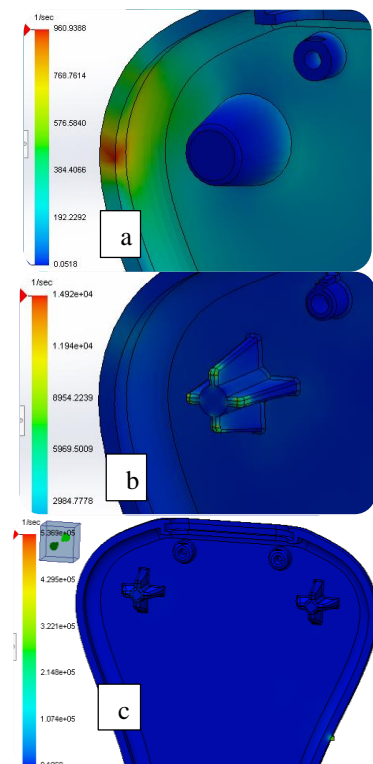
**Fuente:** Propia.

La densidad es una variable de calidad de las piezas inyectadas que influyen en la integridad física de la pieza, una distribución homogénea es ideal. Se puede apreciar la falta de homogeneidad en las Figuras 8.4.a y 8.4.b en la zona de inyección, una gran zona de baja densidad; esto se considera como defecto que debe ser erradicado. En el segundo análisis se consiguió erradicar este defecto, obteniendo una pieza con buena distribución en todo el volumen de interés. En todas las figuras el rango de valores y el valor máximo de 0,95 g/cm³ son prácticamente iguales. Sin embargo es necesario tomar una decisión respecto a la

pequeña zona de baja densidad, que es el punto de inyección definido. Si bien es un punto de interés, no forma parte de estos primeros estudios porque este es parte del Sistema de Alimentación; por lo que concluimos que, como la cavidad tiene las características deseadas con relación a esta variable.



**Figura8.5:** Tapa 1 - Distribución de la Tensión de Cizalla  
**a:** 1er Análisis; **b:** 1ra iteración del 1er Análisis;  
**c:** 2do Análisis.  
**Fuente:** Propia.



**Figura8.6:** Tapa 1 - Distribución de la Tasa de Cizalla  
**a:** 1er Análisis; **b:** 1ra iteración del 1er Análisis;  
**c:** 2do Análisis.  
**Fuente:** Propia.

**Tabla 8.3:** Comparativa Tapa 1 - Tensión y Tasa de Cizalla Máximas

PROPIEDADES	Análisis			Diferencia (1er y 1er - 1er Ite)	Diferencia (1er - 1er Ite y 2do)
	1er	1er - 1er Ite	2do		
Ten. de Cizalla Máx. (MPa)	0,11	0,16	0,365	0,045	0,2053
Tasa de Cizalla Máx. (1/s)	961	14924	536897	13963	521973,33
Variación (1er y 1er - 1er Ite)		Variación (1er - 1er Ite y 2do)			
39,23%		128,55%			
1453,03%		3497,62%			

Fuente: Propia.

La tensión y tasa de cizalla son variables de calidad de las piezas plásticas que tienen un valor máximo según el plástico se esté usando. Para el caso de nuestro PP es de 0,25 MPa y 100.000 1/s para la tensión y para la tasa, respectivamente; por lo que debemos poder llegar a una distribución que, idealmente no supere ninguna de estas magnitudes. Es claro que la distribución lograda cumple con los requerimientos para estos primeros análisis, manteniéndose entre 0,11 y 0,15 MPa y entre 0,05 y 200 1/s para la cavidad, aproximadamente. Sin embargo existen valores máximos que se dan en el 2do análisis (Tabla 8.3) que superan los máximos estipulados, pero mirando el área que queda afectada, podemos concluir que sale del alcance de estos análisis, es decir, nuevamente el punto de inyección es el que presenta estas dificultades.

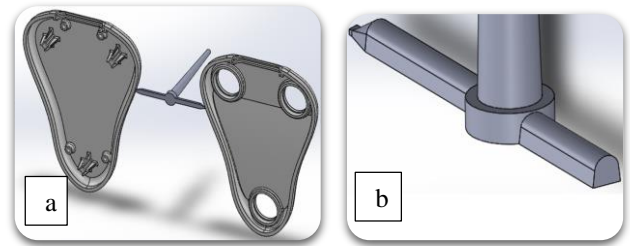
### 8.1.3. 3er Análisis: Canales de Colada

Las condiciones y objetivos para el 3er análisis son:

- Preliminar:* se genera un conjunto de datos que se toman como punto de partida.
- Optimización:* porque se busca mejorar el flujo, la eficiencia del llenado y llegar a la homogeneidad de resultados, que finalmente mejorará el proceso de inyección.
- Iterativo y Comparativo:* es el método para comprobar que las mejoras planteadas lograron su cometido.

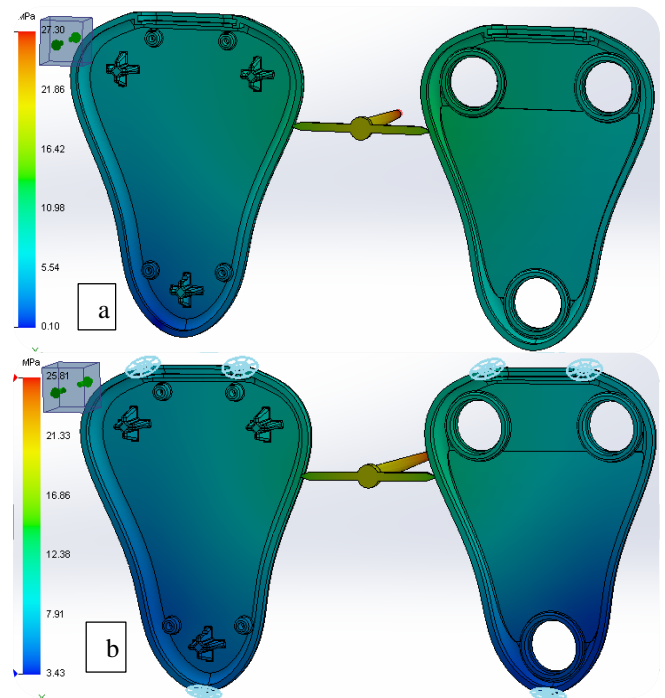
Para este nuevo conjunto de estudios se agregó el sistema de alimentación de las cavidades, los canales de colada, y se definió una configuración de las cavidades de tal forma que cumplan con nuestras restricciones y objetivos.

La configuración de las cavidades (Figura 8.7) se determinó en función a la magnitud de la producción que se desea, economía y sencillez. Si bien se puede tener un arreglo de 3x3, por ejemplo, esto ya escapa de nuestras acotaciones económicas y de sencillez de la matriz.



**Figura 8.7:** Configuración y Diseño para el 3er Análisis **a:** Tapas y Canales de Colada; **b:** Diseño del Bebedero, del Diafragma y de la sección transversal de los canales. Fuente: Propia.

A continuación se discuten los resultados relevantes y de interés.



**Figura 8.8:** Distribución de Presión. **a:** 3er Análisis - 1; **b:** 3er Análisis - 2. Fuente: Propia.

**Tabla 8.4:** Comparativa - Presión de Inyección

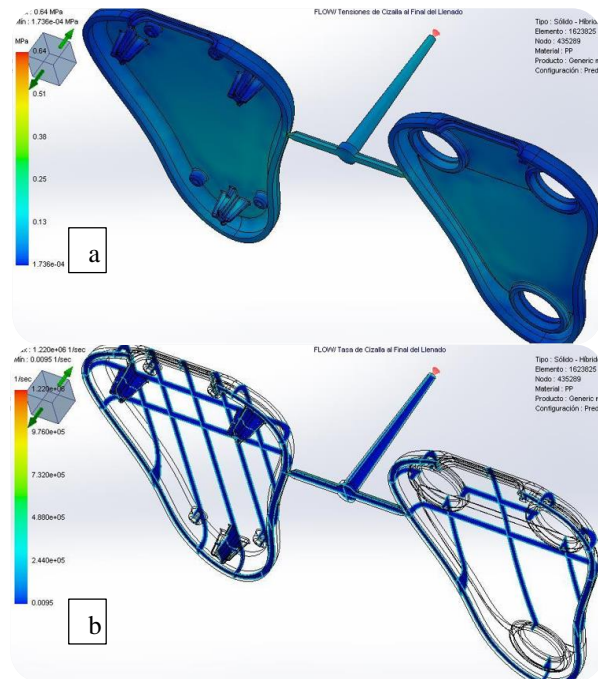
PROPIEDADES	3er Análisis		Diferencia	Variación
	1	2		
Presión de inyección Requerida (MPa)	27,3	25,8	-1,4965	-5%
	0,1	3,43	3,33	3330%

Fuente: Propia.

Poder ver la distribución de presión en la cavidad y en los canales en la Figura 8.8 es un indicador importante, en conjunto con la facilidad del llenado y la animación del llenado, para poder combatir un llenado incompleto ( tiro corto) o de baja calidad. Por este motivo no solamente nos interesa el valor máximo de la presión sino también el mínimo en los lugares más lejanos del punto de inyección para cada cavidad, es altamente recomendable que este valor no sea muy bajo. En la columna de “Variación” de la Tabla 8.4 se pueden ver cuánta diferencia se logró, esto es muy beneficioso para específicamente para etapa del

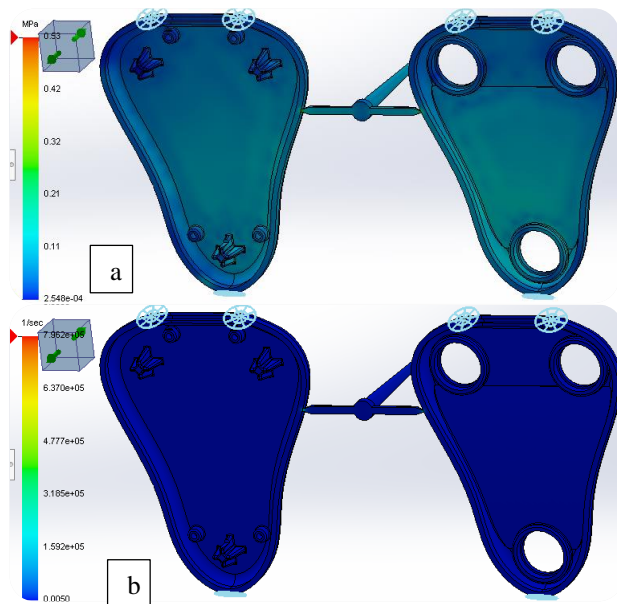


llenado. Con una mínima variación del valor máximo se logró mejorar satisfactoriamente elevar el valor mínimo de presión, como muestra la Tabla 8.4.



**Figura 8.9:** Distribuciones del 3er Análisis – 1  
**a:** Tensión de Cizalla; **b:** Tasa de Cizalla.

Fuente: Propia.



**Figura 8.10:** Distribuciones del 3er Análisis – 2  
**a:** Tensión de Cizalla; **b:** Tasa de Cizalla.

Fuente: Propia.

Dado que los máximos se dieron también en las variables presentadas en las variables presentadas en las Figuras 8.9 y 8.10, es necesario ver sus gráficos de distribución. Para la Tensión de Cizalla se puede ver que en ambos casos se tiene una distribución semiuniforme alrededor de 0,13 y 0,11 MPa respectivamente y para la Tasa de Cizalla 0,01 y 0,005 1/s respectivamente. Sin embargo, los máximos que se dan en ambos análisis en el punto de inyección que, en todos los casos, están en un rango de colores del rojo hasta el amarillo (rangos no aceptables) son resultado de la inevitablemente

pequeñísima geometría de este. Declarado lo anterior, estos resultados se consideran satisfactorios.

#### 8.1.4. 4to Análisis: Sistema de Refrigeración

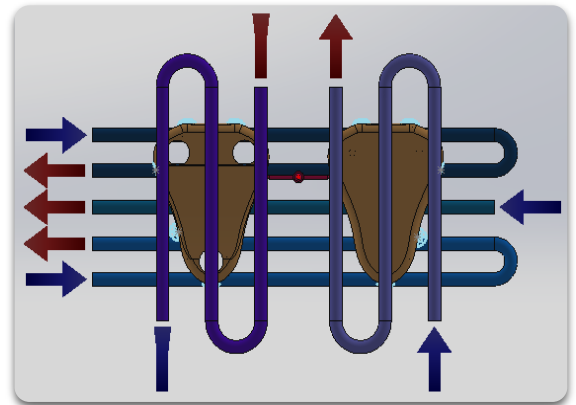
Los dos valores importantes que primeramente definen este sistema son la profundidad de los canales del refrigerante ( $H_{canal}$ , con respecto a la cavidad) y la separación entre canales ( $W_{canal}$ ), teniendo en cuenta los fenómenos de concentración de tensiones y la transferencia de calor. Las consideraciones mecánicas sugieren colocar los canales lejanos a las cavidades, pero las consideraciones térmicas indican que mientras más cerca de la cavidad, se maximiza la transferencia. Estas sugerencias finalmente exigen obtener un punto intermedio en el cual se tenga la mayor transferencia de calor sin exponer el canal a una alta concentración de tensiones [5].

Definimos el punto de partida del estudio a partir de:

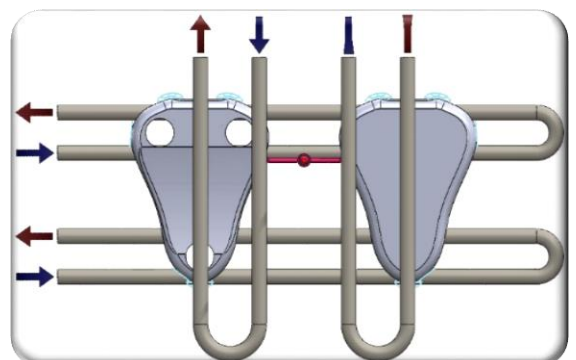
- El material inyectado es PP
- El material de las placas es AISI P20
- El diámetro de los canales de refrigeración: 6,35 mm

Así podemos definir la profundidad y la separación de los canales teniendo en cuenta las siguientes relaciones [5]:

- $2D_{canal} < H_{canal} < 5D_{canal}$ ;  
resultando de esta forma en el intervalo:  
 $12,7mm < H_{canal} < 31,75mm$
- $H_{canal} < W_{canal} < 2H_{canal}$  ;  
resultando de esta forma en el intervalo:  
 $15,875mm < W_{canal} < 31,875mm$



**Figura 8.11:** Canales de Refrigeración - 1ra Versión  
Fuente: Propia.



**Figura 8.12:** Canales de Refrigeración – 2da Versión  
Fuente: Propia.



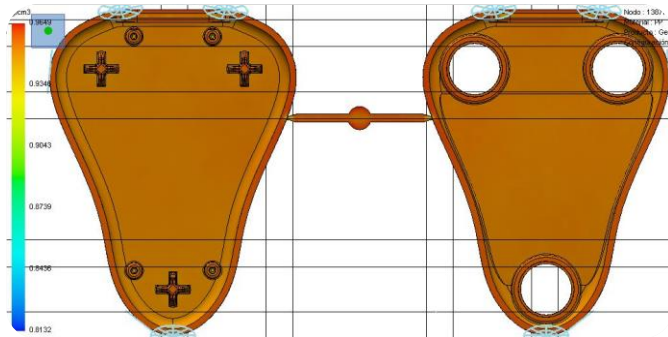
“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”

Se ideó la primera versión de la configuración del sistema de refrigeración, mostrada en la Figura 8.11, para que cubra completamente las cavidades, que se encuentre dimensionalmente dentro de los rangos definidos y que no interfiera con el sistema de eyección. El primer estudio del 4to Análisis, si bien generó buenos resultados, de igual manera decidimos probar una configuración con menos canales (Véase Figura 8.12), concentrada en secciones de mayor temperatura y más cercanas a la entrada del plástico fundido para poder lograr que las zonas más calientes del frente de flujo y secciones más gruesas de la cavidad para que puedan tener una refrigeración lo más rápida y homogénea posible, disminuyendo también la complejidad y el costo de diseño y manufactura.

Las iteraciones primeras dos etapas del 4to Análisis se basaron en modificaciones geométricas de los canales de refrigeración, pero a partir de la tercera iteración ya se realizaron modificaciones exclusivamente de configuración de parámetros para optimizar el ciclo de inyección con el diseño mecánico finalizado. Estos parámetros son:

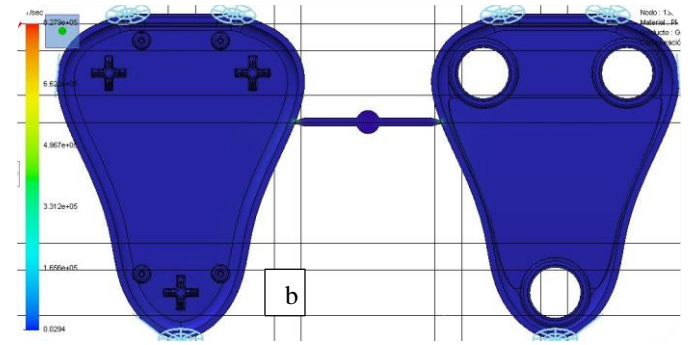
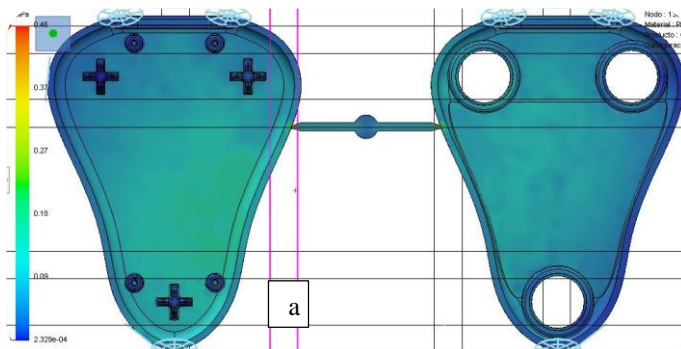
- Velocidad, temperatura y presión del refrigerante.
- Tiempo de llenado.
- Tiempo de refrigeración.
- Tiempo de apertura de la matriz.
- Perfil de velocidad de llenado durante el llenado.
- Perfil de presión durante el empaquetado.

Todas estas son variables que pueden ser impuestas en el software. Finalmente analizamos los resultados de la última iteración del 4to Análisis que se muestran a continuación.



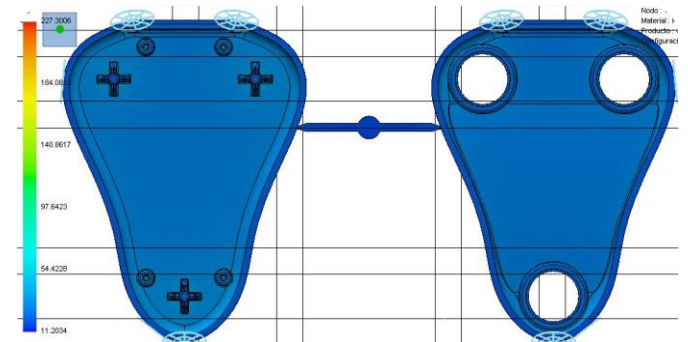
**Figura 8.13:** Distribución de Densidad - 4to Análisis: 6.  
**Fuente:** Propia.

La densidad final de aproximadamente 0,95 g/cm<sup>3</sup> en promedio es un muy buen resultado en combinación con la distribución homogénea lograda (Figura 8.13).



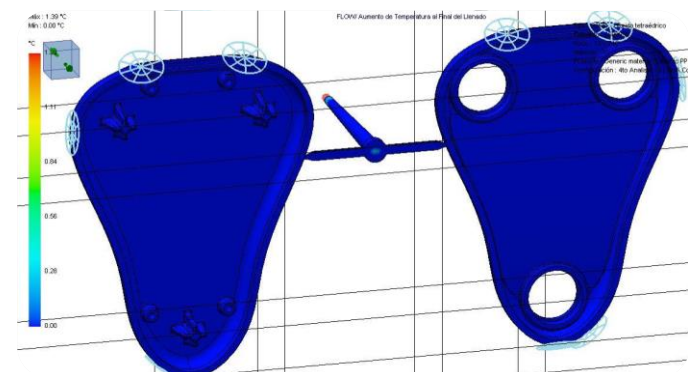
**Figura 8.14:** Distribuciones de la Cizalla.  
**a:** Tensión de Cizalla; **b:** Tasa de Cizalla.  
**Fuente:** Propia.

Las distribuciones presentadas en la Figura 8.14 para la cizalla durante el ciclo de inyección claramente reflejan una homogénea distribución de un valor, en promedio, aceptable para ambas variables, alrededor de 0,18 MPa y 0,03 1/seg respectivamente.



**Figura 8.15:** Temperatura Media durante la Refrigeración.  
**Fuente:** Propia.

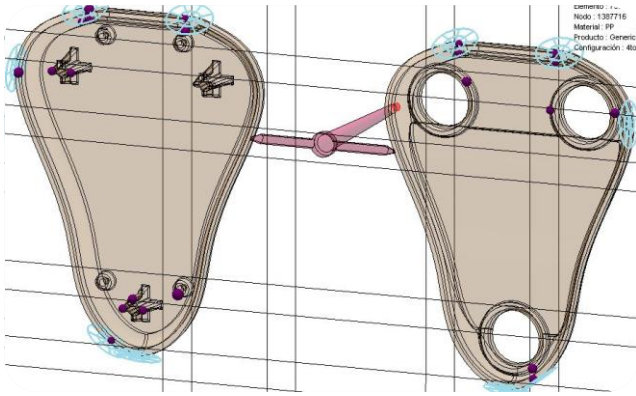
En la Figura 8.15 se refleja la homogeneidad lograda en la temperatura de la pieza durante la refrigeración, esto tendrá resultados óptimos debido a que afecta positivamente a la deformación, encogimiento regular y el alabeo de la pieza.



**Figura 8.16:** Distribución de Aumento de Temperatura al Final del Llenado.  
**Fuente:** Propia.

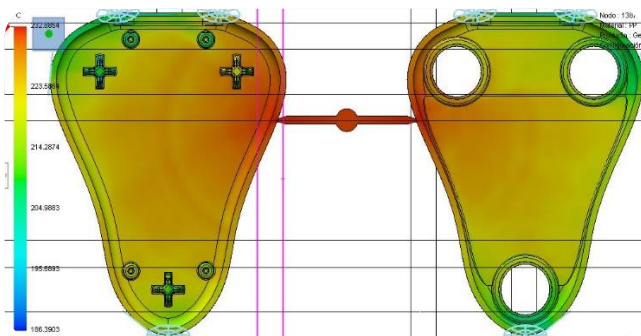
La distribución mostrada en la Figura 8.16 nos asegura que la temperatura al final del llenado no varía en más de 10 °C con respecto a la inicial, por lo que podemos garantizar que el riesgo es bajo (prácticamente nulo) de degradación del plástico por acción de la temperatura.

“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”



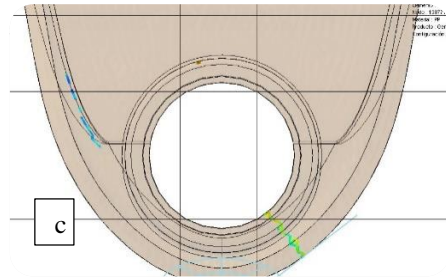
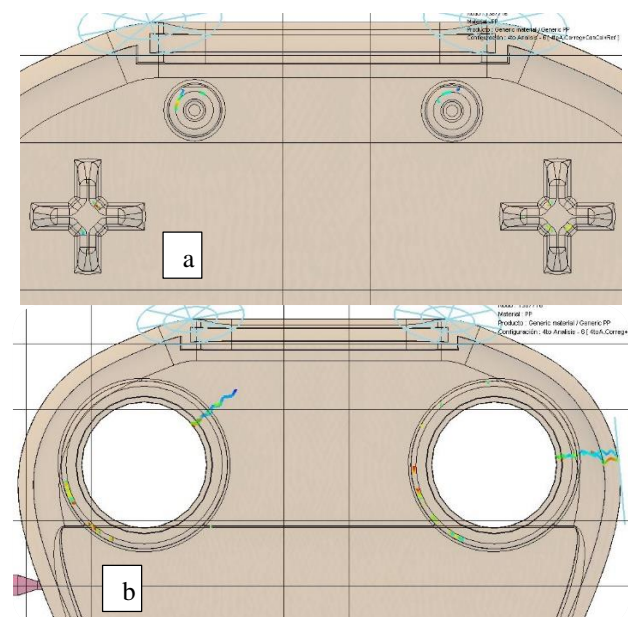
**Figura 8.17:** Distribución de las Burbujas de Aire  
**Fuente:** Propia.

Expuestos anteriormente los riesgos causados por burbujas de aire nos es importante conocer aproximadamente el lugar donde ocurren. De la Figura 8.17 generada por el software, podemos finalmente estimar los lugares para los escapes de aire y confirmar la necesidad de utilizar también los agujeros de los eyectores como canales para este fin.



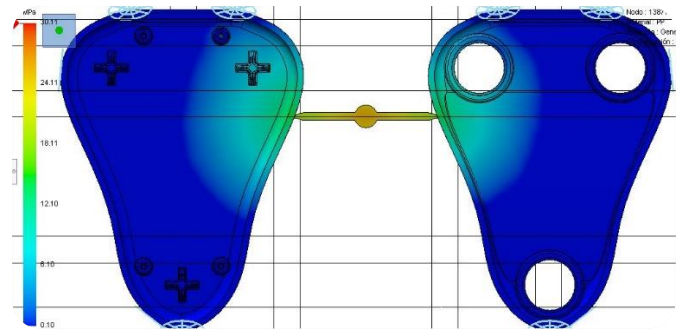
**Figura 8.18:** Distribución de la Temperatura del Frente de Flujo  
**Fuente:** Propia.

La temperatura del frente de flujo de la Figura 8.18 se mantuvo dentro del rango  $\pm 10$  °C con respecto a la temperatura inicial del material. Esto tiene una serie de beneficios durante el ciclo de inyección, que son: un llenado y empaquetado correctos, y genera requisitos de presión mínima.



**Figura 8.19:** Líneas de Soldadura  
**a:** Tapa 1; **b:** Tapa 2 – Parte superior; **c:** Tapa 2 – Parte Inferior.  
**Fuente:** Propia.

Se muestran las líneas de soldadura más importantes, en la Figura 8.19, que se generan durante el llenado. Manteniendo la temperatura del frente de flujo dentro del rango  $\pm 10$  °C con respecto a la temperatura inicial del material se logra una buena apariencia e integración de estas.



**Figura 8.20:** Presión al Final del Empaquetado  
**Fuente:** Propia.

Para la presión de la Figura 8.20 vemos que no solamente es bastante homogénea la distribución, sino también que el valor mínimo no es cero (atmosférica), lo que promueve mayores garantías para propiedades óptimas al final de cada ciclo.

## 8.2. Sistema de Eyección

Son dos las consideraciones importantes que se cumplen con la distribución resultante: que la fuerza ejercida por conjunto de pines venza la fuerza de eyección al momento de la eyección y que la eyección sea pareja en toda la superficie.

### 8.2.1. Verificación de Esfuerzos y Limite Elástico

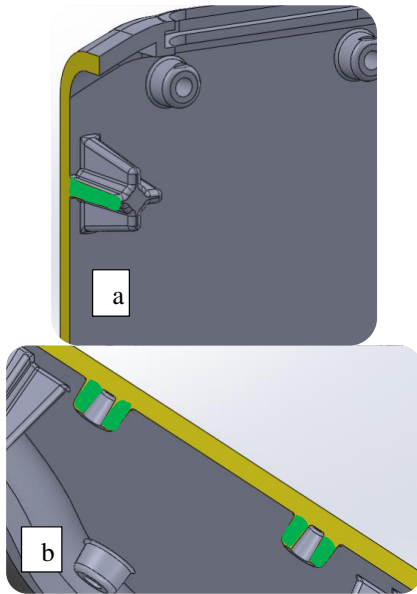
Es necesario tener en cuenta la posibilidad de fallas que se puedan generar en los eyectores y el la pieza plástica durante la eyección. Para estar seguros de que nuestras condiciones sean óptimas se estimó la fuerza de eyección para cada tapa.

Podemos estimar las fuerzas de forma analítica siguiendo el procedimiento a continuación [5]:

- Determinar las magnitudes para la fórmula.
- Calcular el Área efectiva para cada tapa ( $A_{ef}$ ).
- Calcular la Fuerza de eyección para cada tapa ( $F_{eyección T1}$ ;  $F_{eyección T2}$ ).

“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”

- Determinar los eyectores más vulnerables, sus dimensiones y propiedades.
- Aplicar el método de comprobación por esfuerzos.



**Figura 8.21:** Área Eficaz

**a:** Área del nervio del soporte. **b:** Área de los huecos para los tornillos.

**Fuente:** Propia.

Los ejemplos de las áreas eficaces se muestran verdes en la superficie amarilla del corte que muestra la Figura 8.21, el área finalmente para cada caso es la porción del área amarilla intermedia entre las áreas de la superficie de la pieza en las que actúa la fuerza de rozamiento. Para cada tapa se consideran diferentes áreas, estas son: nervios, cilindro soporte, hueco de tornillo, paredes perimetrales, paredes del hueco del conector pin pogo, hueco de los electrodos.

La ecuación para la estimación de fuerzas es [5]:

$$F_{eyecciónT} = \mu_s * \cos \theta * E * CTE * (T_{solidificación} - T_{eyección}) * A_{ef}$$

- $F_{eyecciónT}$ ; fuerza de eyección para cada tapa.
- $\mu_s$ ; coeficiente de fricción estática entre el polímero PP y el acero P20.
- $\theta$ ; ángulo de desmolde.
- $E$ ; módulo de elasticidad del polímero PP.
- $CTE$ ; coeficiente de expansión térmica.
- $T_{solidificación}$ ,  $T_{eyección}$ ; temperaturas de solidificación y eyección.
- $A_{ef}$ ; área eficaz de cada tapa.

La ecuación para la comprobación por tensión en los eyectores que se presenta es para eyectores con sección transversal circular [5]:

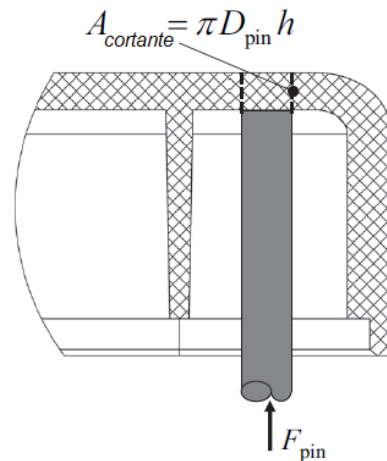
$$A_{eyectores} > \frac{F_{eyecciónT}}{\sigma_{límite de fatiga}}$$

- $A_{eyectores}$ ; área total de todos los eyectores en contacto con la tapa.
- $F_{eyecciónT}$ ; fuerza de eyección para cada tapa.
- $\sigma_{límite de fatiga}$ ; límite de tensión de fatiga.

La ecuación para la comprobación por tensión cortante en la pieza plástica es [5]:

$$\Omega_{eyectores} > \frac{2 * F_{eyecciónT}}{\sigma_{límite elástico}}$$

- $\Omega_{eyectores}$ ; perímetro de todos los eyectores en contacto con la tapa.
- $F_{eyecciónT}$ ; fuerza de eyección para cada tapa.
- $\sigma_{límite elástico}$ ; límite de elástico del polímero PP.



**Figura 8.22:** Fuerza sobre el pin eyector y tensión cortante sobre la pieza inyectada

**Fuente:** David O. Kazmer, Injection Mold Design Engineering, 2016.

Seguidamente, los cálculos para la cantidad de eyectores.

Cálculo de la fuerza de eyección		Secciones consideradas: Elemento (xCantidad)	
<b>Datos</b>		<b>Tapa 1</b>	<b>Tapa 2</b>
$\mu =$	0,36	1 - Nervio x12	1 - Huecos de electrodos x3
$\theta =$	1,5° = 0,026 rad	2 - Cilindro Soporte x6	2 - Paredes perimetrales x1
$E =$	1350 MPa	3 - Hueco de Tornillo x4	3 - Paredes del hueco del conector Pin Pogo x2
$CTE =$	9E-05 1/°C	4 - Paredes perimetrales x1	
$T_{solid} =$	135 °C	5 - Paredes del hueco del conector Pin Pogo x2	
$T_{ejec} =$	95 °C		

Tapa 1					Total
	1	2	3	4	5
Aeffi (mm2)	100,92	107,82	18,32	3	17,9
					<b>247,98</b>
Tapa 2					
	1	2	3		
Aeffi (mm2)	14,37	3	17,92		<b>35,29</b>

Fuerza de Eyección T1 = **436,13 N**

Fuerza de Eyección T2 = **62,065 N**

Feye total = **498,19 N**

Se consideran pines eyectores de: **0,969mm de diametro y 73,652mm de longitud, AISI 1020. Estos son los más vulnerables.**

$E = 200000 \text{ N/mm}^2$   $F_{pin} \text{ tapa 1} = 29,08 \text{ N}$   $F_{pin} \text{ tapa 2} = 3,4480626 \text{ N}$   $L = 73,652 \text{ mm}$

Se consideran: una tensión conservadora para el P20 de 450 MPa y para el PP de 21 Mpa, el espesor del PP sobre el área de eyección de 2mm.

Comprobacion por tension en los eyectores	Area de todos los eyectores para la tapa 1 >	0,96917038
	Area de todos los eyectores para la tapa 2 >	0,13792251
Comprobacion por limite elastico del PP	tro total de todos los eyectores para la tapa 1 >	20,7679368
	tro total de todos los eyectores para la tapa 2 >	2,95548225

Se concluye que la falla en el proceso se da en el plastico primero antes que en el eyector, por lo que se toman los valores de comprobacion por limite elastico del PP para el calculo.

Asi, el numero de eyectores resulta:

Para la tapa 1 = 6,822 , **es decir 7 eyectores vencen la fuerza de eyeccion en la tapa 1**

Para la tapa 2 = 0,971 , **es decir 1 eyector vence la fuerza de eyeccion en la tapa 2**

Formula para tapa 1 = 0,0227 Formula para tapa 2 = 0

Comprobacion por pandeo de eyectores	Radio de los los eyectores para la tapa 1 >	0,38802058
	Radio de los los eyectores para la tapa 2 >	0,22770271

**Fuente:** Propia.

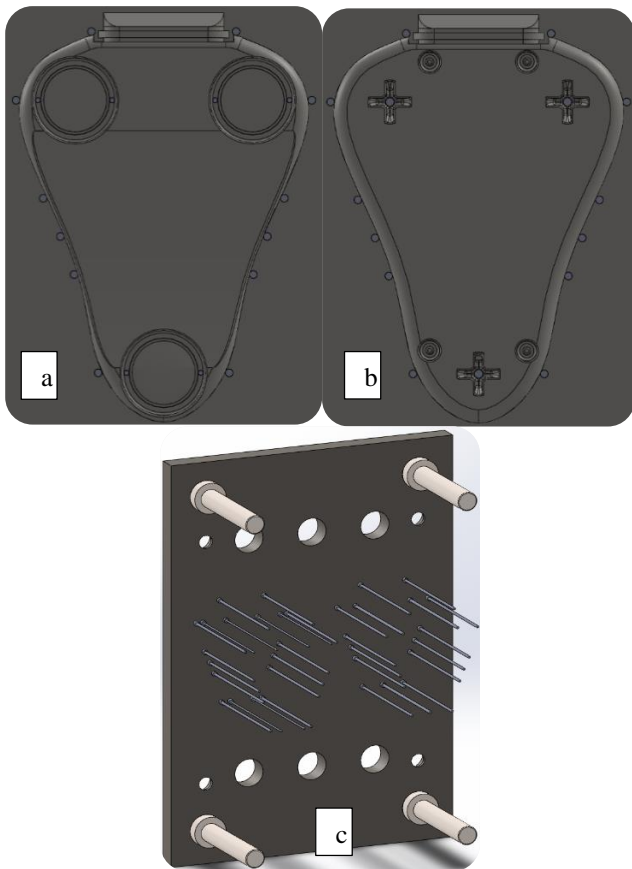


### 8.2.2. Distribución

No existe un método específico para determinar la distribución de los pines eyectores en todas las ocasiones, sino que hay que plantear, analizar y determinar esta distribución particularmente para cada caso manualmente; mirando el diseño, las aristas, el grosor, el tamaño de los pines; de modo a obtener un desmolde en el que:

- Se aplique la misma fuerza en todos los lugares para que la pieza salga completa de una vez.
- Se produzca el desmolde de forma rápida, idealmente instantánea.
- La pieza no se distorsione y/o deforme permanentemente.
- La pieza no se fisure o rompa completamente.

Esta distribución se definió como se muestra en la Figura 8.23.



**Figura 8.23:** Distribución de Eyectores.

**a:** Tapa 1; **b:** Tapa 2; **c:** Placa de Soporte, Pines Eyectores y Pines de Retorno.

**Fuente:** Propia.

### 8.3. Sistema Estructural

A diferencia de los apartados anteriores, el sistema estructural conformado por las placas y los elementos que principalmente resisten las cargas mecánicas de presión y cierre de la matriz merecen una sección propia de análisis independiente.

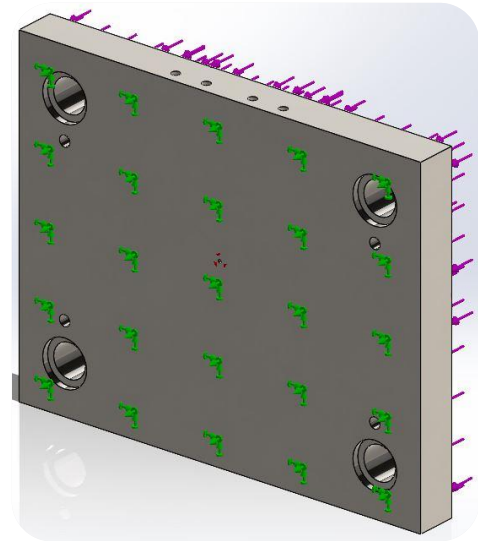
#### 8.3.1. Simulación: Carga de Presión y Cierre

Poner a prueba la matriz en una simulación nos provee de datos importantes concernientes a la seguridad e integridad

de los operarios en primer lugar y en segundo lugar de la máquina, herramientas y de la matriz. La etapa del ciclo que se desea simular es el llenado, en la cual actúa la mayor presión desde las superficies de los canales de colada y cavidad hacia el exterior y la fuerza de cierre.

#### 8.3.2. Configuración

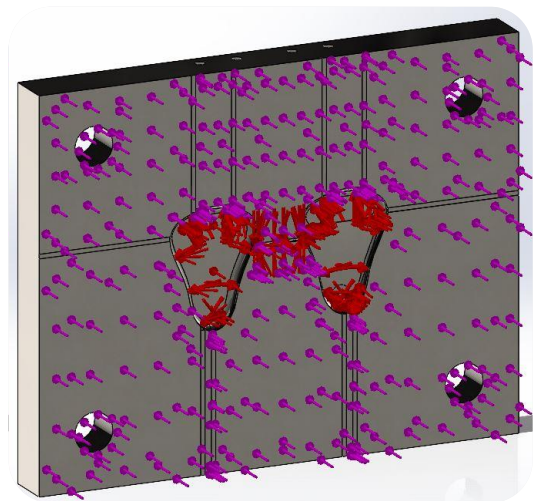
Fueron tomadas para esta simulación las placas que están directamente afectadas por la presión de inyección y la fuerza de cierre directamente; estas son las placas cavidad y núcleo con sus respectivas placas soporte. Asumiendo la posición en la que la matriz está cerrada y fija en la máquina se consideran las superficies posteriores de las placas como superficies y las anteriores donde actúan la presión de inyección y la fuerza de cierre. Esto se ve en la Figura 8.24.



**Figura 8.24:** Superficies Fijas

**Fuente:** Propia.

Se muestra en la Figura 8.25 las superficies consideradas donde se aplica la presión de inyección constante y fuerza de cierre como cargas para el sistema estructural. Esta configuración es la misma para ambos conjuntos de placas trabajando en solidario.



**Figura 8.25:** Configuración de la Cargas

**Fuente:** Propia.

Las consideraciones principales para el estudio son que la presión actuante en todas las superficies de la cavidad y



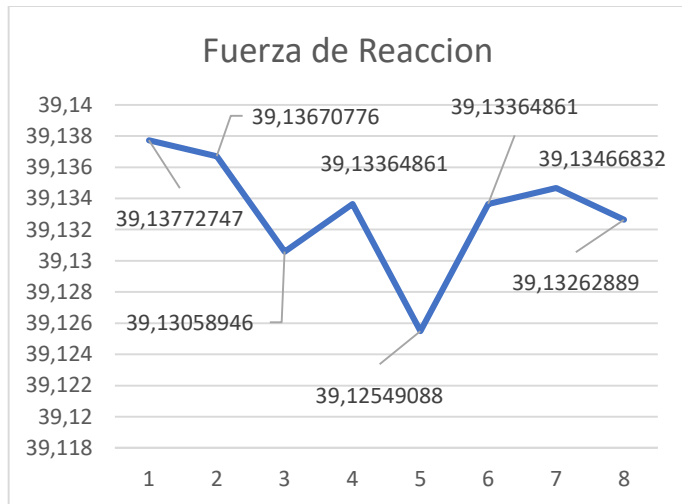
núcleo es constante e igual a la presión total de inyección sin tener en cuenta la caída de presión que existe y la fuerza de cierre es la total distribuida en toda el área de contacto de la superficie de separación. La presión de inyección resultante de los análisis anteriores fue de 33 MPa que equivalen a 33.000.000 N/m<sup>2</sup> y la fuerza de cierre fue de 4 Ton; a estos valores se le aplicará un factor de seguridad de 1,5 para obtener resultados más conservadores, resultando entonces en el conjunto de valores: 6 Ton (58839.9 N) y 49,5 MPa (49500000 N/m<sup>2</sup>).

### 8.3.3. Sensibilidad al Mallado

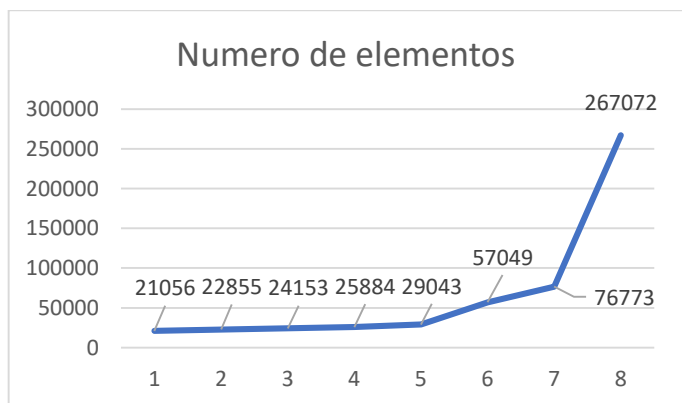
Estudio de Sensibilidad al Mallado						
Variables	1	2	3	4	5	6
Fuerza de Reaccion	39,13773	39,13671	39,13059	39,13365	39,12549	39,13365
Numero de elementos	21056	22855	24153	25884	29043	57049

7	8
39,13467	39,13263
76773	267072

**Tabla 8.5:** Fuerza de Reacción y Número de Elementos.  
**Fuente:** Propia.



**Gráfico 8.1:** Fuerza de Reacción vs Número de Iteración.  
**Fuente:** Propia.



**Gráfico 8.2:** Número de Elementos vs Número de Iteración.  
**Fuente:** Propia.

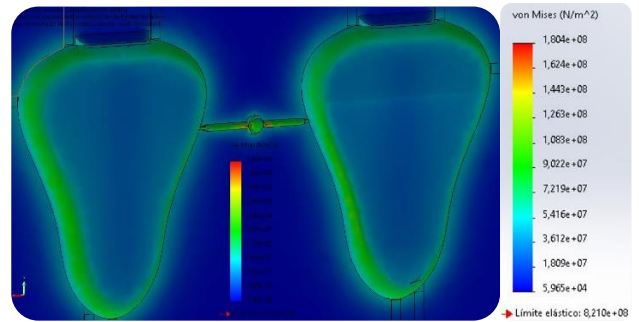
La Tabla 8.5 y los Gráficos 8.1 y 8.2 demuestran los resultados de la comprobación de la sensibilidad al mallado. Comprobando de esta manera la convergencia de los

resultados, se garantiza la independencia de los resultados al mallado.

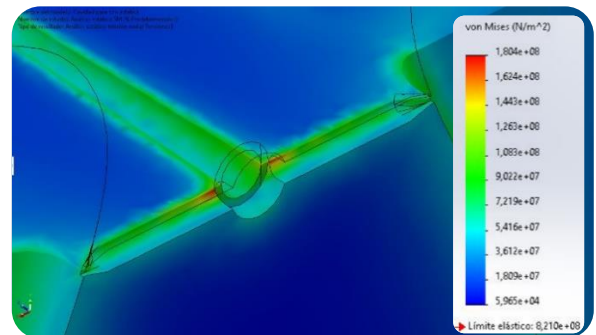
### 8.3.4. Resultados y Conclusiones

Se muestran a continuación los resultados por variable estudiada y no por cada placa. Estos se diferencian principalmente en un estudio estático y otro dinámico. El estático está relacionado con la resistencia a las cargas que la matriz debe resistir; y el dinámico es una extrapolación del estático relacionado al ciclo de producción, es decir, a las cargas dinámicas repetitivas que debe resistir.

#### 8.3.4.1. Tensión (Von Mises) y Deformación

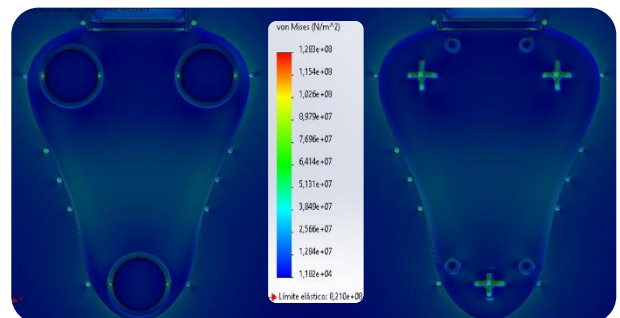


**Figura 8.26:** Cavity – Vista frontal de zonas más afectadas.  
**Fuente:** Propia.

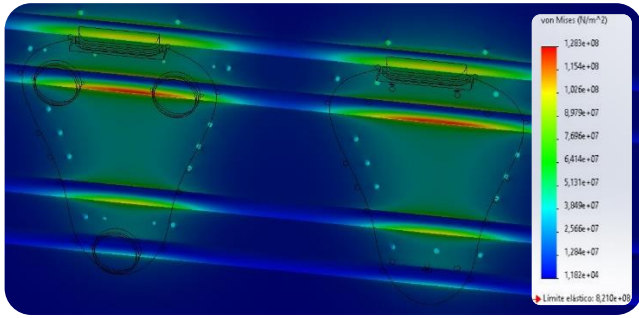


**Figura 8.27:** Cavity – Vista de corte en zonas más afectadas.  
**Fuente:** Propia.

Es claro, de las Figuras 8.26, 8.27 y 8.28, que la placa de acero P20 no tiene riesgos para deformarse plásticamente ya que el máximo valor de la tensión de Von Mises resultante del estudio de compresión expone un valor máximo, y en una zona muy pequeña y superficial, cuatro veces menor que el límite elástico.



**Figura 8.28:** Núcleo – Vista de corte en zonas más afectadas.  
**Fuente:** Propia.

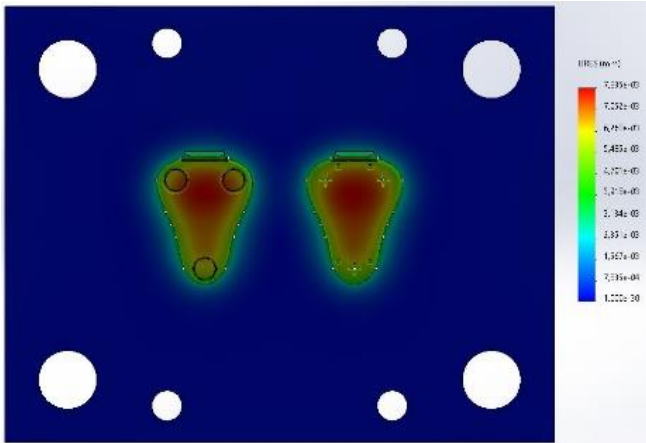


**Figura 8.29:** Núcleo – Vista de corte en zonas más afectadas.

**Fuente:** Propia.

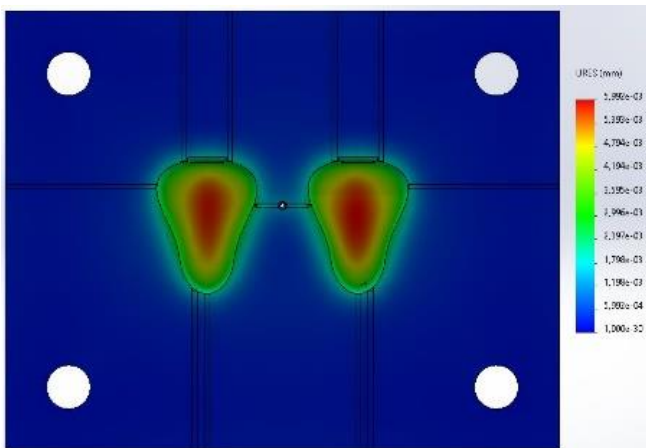
Idénticamente la Placa Núcleo resulta con el mismo resultado favorable pero en distintas zonas, las zonas rojas de la Figura 8.29 se encuentran en uno de los canales de refrigeración.

Los resultados de deformación resultante (URES, también llamado desplazamiento) resultan muy favorables bajo las condiciones deseadas para ambas placas, como se demuestra en las Figuras 8.30 y 8.31.



**Figura 8.30:** Cavidad – Vista de zonas más deformadas.

**Fuente:** Propia.



**Figura 8.31:** Núcleo – Vista de zonas más deformadas.

**Fuente:** Propia.

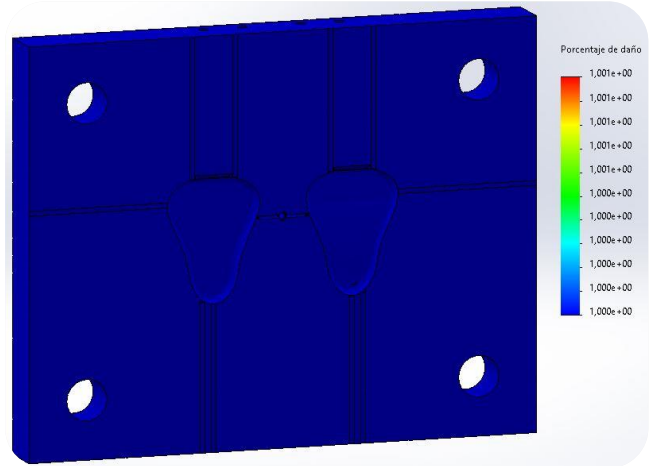
Con desplazamientos máximos de aproximadamente 0,006 mm y 0,008 mm en las zonas rojas, se concluye como exitoso las simulaciones de tensión y deformación.

#### 8.3.4.2. Fatiga

Los resultados de fatiga nos proveen de resultados relacionados a la cantidad de ciclos a la cual se someterá la matriz, sus posibles daños y durabilidad.

Las siguientes son factores forman parte de la configuración de la simulación en el software utilizado:

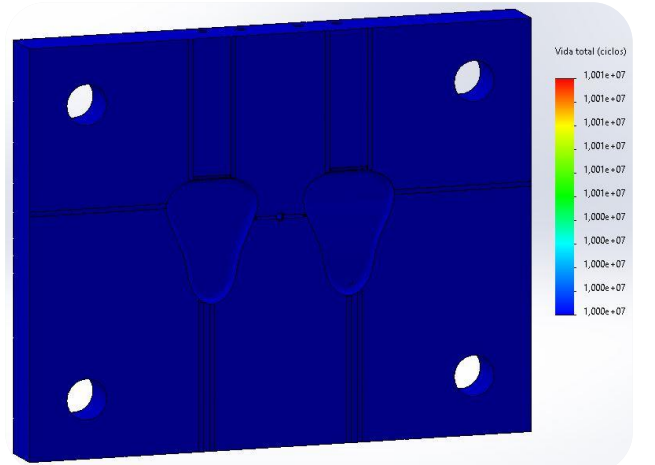
- Cantidad de ciclos: 100.000.
- Realizado con base en los resultados del estudio estático de tensión previo.
- Suceso de carga cíclica constante con valor mínimo de cero y de forma sinusoidal.
- Curva S-M del Acero P20 del libro guía [5].



**Figura 8.32:** Cavidad - Distribución de Daño

**Fuente:** Propia.

Apoyando a los resultados positivos del análisis tensión-deformación se muestran los resultados del estudio de fatiga. En toda la pieza se esperan daños menores por la acción cíclica de las cargas durante los ciclos de inyección. Esto se aprecia en las Figuras 8.32 y 8.33.

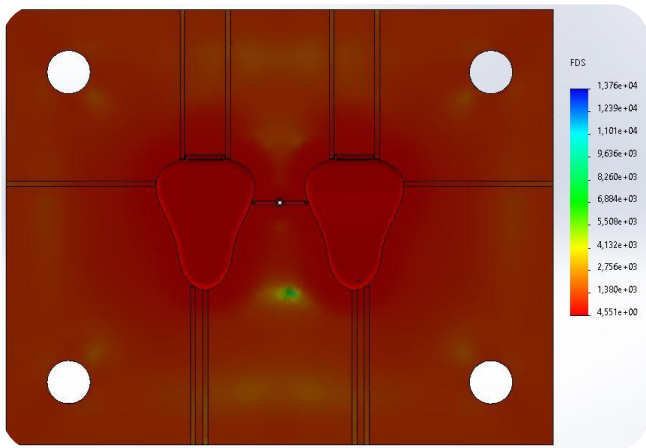


**Figura 8.33:** Cavidad - Distribución de Vida Útil

**Fuente:** Propia.

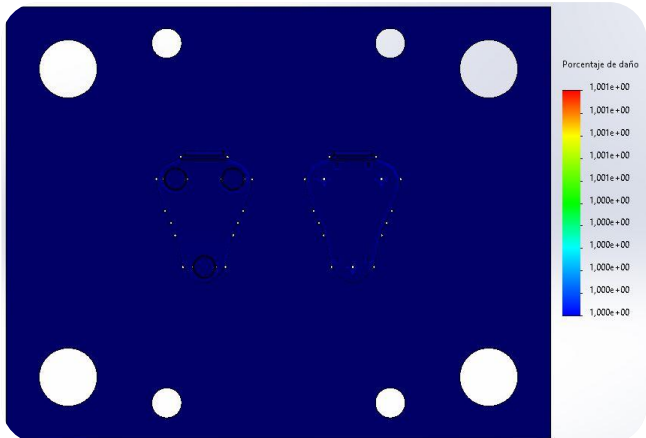
Se espera entonces que 100.000 ciclos no sea la cantidad que produzca fallos en la matriz, como se aprecia en la Figura 8.33. El color azul que cubre a toda la pieza nos indica que en ninguna parte de la placa se espera un fallo mecánico por fatiga en 100.000 ciclos de producción de la carcasa de este electrocardiógrafo dadas las condiciones

planteadas. Como se tiene como parámetro una producción inicial de 10.000 electrocardiógrafos, este resultado garantiza esta expectativa de producción.

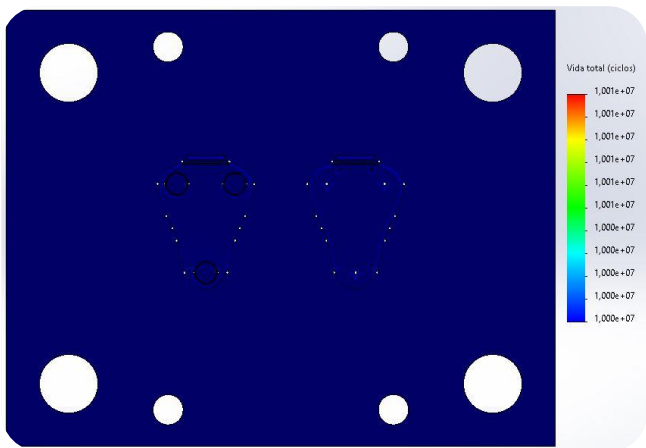


**Figura 8.34:** Cavity - Factor de Seguridad  
**Fuente:** Propia.

La distribución representada por el trazado del factor de seguridad de la Figura 8.34 nos comunica que en todas las zonas rojas, que son la mayor parte de la placa, se espera que una magnitud de aproximadamente 4,5 veces la carga aplicada es la que produzca una falla en dicha zona. Estas serían las más comprometidas por tener el menor FDS.

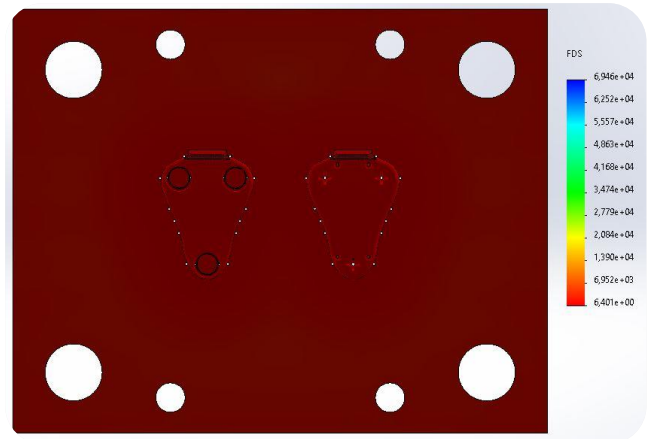


**Figura 8.35:** Núcleo - Distribución de Daño  
**Fuente:** Propia.



**Figura 8.36:** Núcleo - Distribución de Vida Útil  
**Fuente:** Propia.

Se espera un mínimo porcentaje de daños en toda la placa. Se prevé que 100.000 ciclos no afecten significativamente según los dos resultados anteriores. Véase Figuras 8.35 y 8.36.



**Figura 8.37:** Núcleo - Factor de Seguridad  
**Fuente:** Propia.

En la Figura 8.37 claramente se distingue un mayor valor mínimo del factor de seguridad con respecto a la placa cavidad. Esperando que la magnitud de la carga de falla tenga un valor que sea mayor a 6,4 veces la magnitud de la tensión que genera el fallo. Este resultado representa un alto nivel de seguridad para el operario y para la integridad de los otros componentes de la matriz.

## 9. Matriz de Inyección Propuesta

Se presentan a continuación los conceptos, cálculos y finalmente las dimensiones de la matriz propuesta. Seguidamente se verifican los requerimientos de inyección y de seguridad mecánica. Otros temas de igual importancia al citado anteriormente, que también se discuten en esta sección, son los de mantenimiento, ajustes y montaje. Estos evitan el fallo precoz de la matriz y promueven una larga vida útil.

### 9.1. Espesor Mínimo de Placas

Para evitar que ocurran deformaciones en las placas se requiere una correcta selección del espesor mínimo de ellas, principalmente de las placas de respaldo, que son las que están más comprometidas ya que evitan que en los núcleos ocurran deformaciones.

Para el cálculo del espesor mínimo se utilizará la siguiente ecuación [6]:

$$h = 1.91 * \sqrt{A_{pp} * \frac{a}{b} * \sigma}$$

- $h$  ; espesor de la placa.
- $A_{pp}$  ; área proyectada de la pieza.
- $a$  ; distancia entre los regles del molde.
- $b$  ; longitud de la placa.
- $\sigma$  ; tensión permisible del acero de la placa.

De esta forma teniendo los valores:  $A_{pp} = 64,89 \text{ cm}^2$ ;  $a = 179 \text{ mm}$ ;  $b = 261 \text{ mm}$ ;  $\sigma \text{ admisible} = 405 \text{ MPa} = 4129,85 \text{ Kgf/cm}^2$ ; obtenemos el valor de  $h = 1.98 \text{ cm}$ .

El espesor seleccionado para las placas es 24 mm como mínimo, mayor al previamente calculado para que cumpla con los requisitos mínimos.

## 9.2. Dimensionamiento

### 9.2.1. Pernos

Los pernos DIN 912 de cabeza hueca son los sujetadores más comunes utilizados en moldes, este proporciona un método estándar y eficiente para retener múltiples componentes a lo largo del eje del tornillo. La cabeza de la rosca y el perno funcionan como un solo sistema.

La resistencia a la tracción de los pernos estándar seleccionados DIN 912 se puede estimar bastante bien utilizando la tensión límite del material del tornillo multiplicado por el área de la sección transversal del diámetro exterior de la rosca [5]:

$$F_{\text{límite}} = \sigma_{\text{admisible}} * \text{Área} = \sigma_{\text{admisible}} * \frac{\pi * D_{\text{rosca}}^2}{4}$$

Ya que este tornillo se utiliza en una aplicación crítica donde la falla puede llegar a provocar la pérdida del equipo o la vida del operador, se asume el peor de los casos. Se obtiene la masa del molde del software de diseño, esta es de 120 Kg.

A continuación, se asume el peor de los casos, cuando el molde se sujeta a un solo lado de la máquina de moldeo sin el apoyo de la placa móvil, lo que puede ocurrir cuando el molde se está instalando en la máquina inyectora. Además, se supondrá que toda la masa del molde estará sujeta por un solo tornillo apretado, lo que puede ocurrir si los otros demás tornillos no se aprietan.

La fuerza ejercida sobre el perno por el molde se puede estimar con la siguiente fórmula [5]:

$$F_{\text{perno}} = M_{\text{molde}} * n_g * g * \frac{L_{\text{cog}}}{L_{\text{perno}}}$$

- $g$  ; aceleración de la gravedad.
- $M_{\text{molde}}$  ; masa del molde.
- $n_g$  ; coeficiente relacionado con la cantidad de gravedades que se puede ejercer sobre el molde. Se establece alto por seguridad, con valor 10 en este caso.
- $L_{\text{cog}}$  ; Distancia entre la placa de sujeción de la máquina y el centro de gravedad del molde montado.
- $L_{\text{perno}}$  ; Distancia entre el centro del anillo centrador y el centro del perno.

De la fórmula de  $F_{\text{límite}}$  se obtiene:  $D_{\text{rosca}} = 5,75$  cm. El análisis indica que un perno Allen de cabeza hueca M10 es suficiente.

### 9.2.2. Cáncamos

El dimensionamiento de los accesorios para el izado por medio de cáncamos se realizó cuidadosamente ya que es un elemento fundamental para el montaje y transporte del molde, estos cumplen con la normativa DIN 580.

Se determinó el uso de doble cáncamo DIN 580 – M8 – ST por la disposición geometría y peso del molde.

### 9.2.3. Pilares Guía y Casquillos

Dado que los esfuerzos máximos que soportan los pernos guías en el ciclo de inyección se dan en el instante que el molde empieza a cerrarse, y comienza el ciclo de inyección donde la máquina inyectora ejerce una fuerza de cierre para evitar que el molde se abra y tenga fugas de presión y material. El cálculo para la comprobación será el esfuerzo a compresión.

## 9.3. Montaje

Normalmente la calidad del diseño y la mano de obra del molde se hacen evidentes durante el montaje al ir inspeccionando los diferentes elementos. Cada núcleo debe encajar firmemente en su respectiva placa portadora. Las demás placas y componentes deben de ensamblarse sin realizar fuerzas excesivas que vayan a causar alguna deformación. Al asegurar las placas del molde con los pernos, los pilares guía deben precargar las placas porta núcleos. No se necesitan cuñas, ya sean estas gruesas o delgadas, para ajustar los accesorios del molde, ya que pueden moverse o perderse. Después de ensamblar por completo el molde, este debe de poder separarse fácilmente en los planos de partición sin ningún contacto involuntario con las superficies de moldeo. Se debe verificar que la activación del sistema eyector se mueva fácilmente a través de su rango de recorrido.

### 9.3.1. Ajustes

Debido a que se requieren tolerancias muy estrechas entre los componentes del molde, se requieren de unos ajustes de interferencia, estos ajustes ocurren cuando el componente macho tiene una dimensión nominal mayor que la dimensión nominal del componente hembra. Los ajustes se analizarán para el inserto del núcleo (placa núcleo) y la placa (placa porta núcleo) de sujeción. Esta sección de ajustes se encuentra descrita más específicamente en la referencia [5] en las páginas 417 a 421.

En este método, elementos rectangulares con ancho W, y longitud L, se modelan como un miembro circular con diámetro aparente D, calculado:

$$D = \sqrt{W * L} = \sqrt{158 * 90} = 119,24 \text{ mm}$$

El límite de tolerancia,  $\lambda$ , se calcula de acuerdo con una fórmula:

$$\lambda = 0,001 * C * D^{\frac{1}{3}}$$

Donde C es un coeficiente correspondiente al límite inferior y superior para el componente masculino o femenino.

Se utilizará un ajuste ligero FN1 para el cálculo del inserto del núcleo por lo tanto el límite de tolerancia inferior para la dimensión del inserto se calculará con C igual a 14,34 y el límite de tolerancia superior para la dimensión del inserto se calculará con C igual a 17,73.

$$\lambda_{\text{inferior}} = 0,001 * 14,34 * 119,24^{\frac{1}{3}} = 0,07 \text{ mm}$$

$$\lambda_{\text{superior}} = 0,001 * 17,73 * 119,24^{\frac{1}{3}} = 0,087 \text{ mm}$$



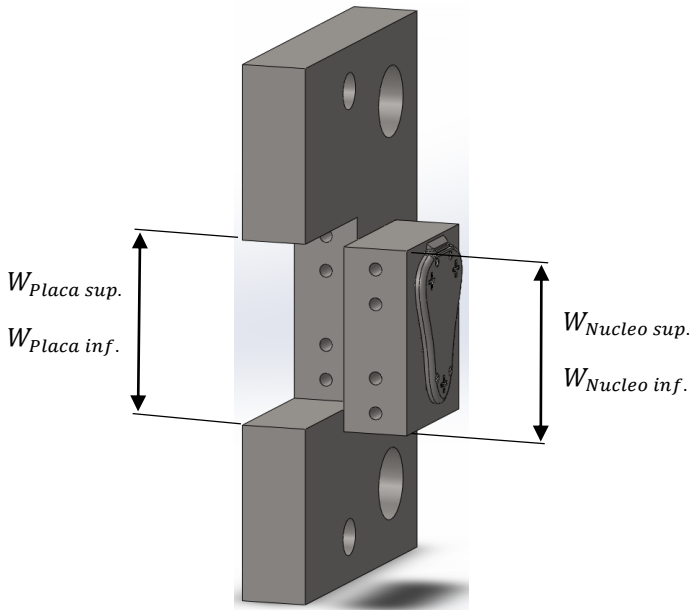
**“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”**

Se utilizará un ajuste ligero FN1 para el cálculo del orificio correspondiente a la placa de sujeción por lo tanto el límite de tolerancia inferior para la dimensión del orificio se calculará con C igual a 0 y el límite de tolerancia superior para la dimensión del orificio se calculará con C igual a 4,93.

$$\lambda_{inferior} = 0,001 * 0 * 119,24^{\frac{1}{3}} = 0$$

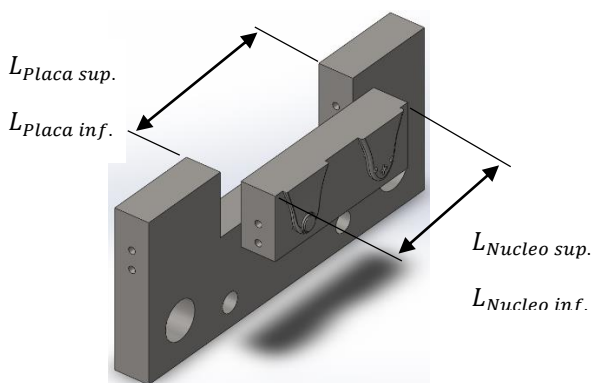
$$\lambda_{superior} = 0,001 * 4,93 * 119,24^{\frac{1}{3}} = 0,024 \text{ mm}$$

Las dimensiones mínimas y máximas del inserto del núcleo se especifican como 0.070 y 0.087 mm, respectivamente. Las dimensiones mínimas y máximas en el orificio de la placa de sujeción se especifican como 0 y 0.024 mm. Estos límites dimensionales se muestran en las Figuras 9.1 y 9.2.



**Figura 9.1:** Ajuste del ancho (W)

**Fuente:** Propia.



**Figura 9.2:** Ajuste del largo (L)

**Fuente:** Propia.

Las dimensiones mínimas y máximas para el núcleo son:

Inferiores:  $W_{Nucleo \text{ inf.}} = 90,07 \text{ mm}$  y  $L_{Nucleo \text{ inf.}} = 158,07 \text{ mm}$

Superiores:  $W_{Nucleo \text{ sup.}} = 90,087 \text{ mm}$  y  $L_{Nucleo \text{ sup.}} = 158,087 \text{ mm}$

Las dimensiones mínimas y máximas para la placa son:

Facultad de Ingeniería – UNA

Abril, 2023.

Inferiores:  $W_{Placa \text{ inf.}} = 90 \text{ mm}$  y  $L_{Placa \text{ inf.}} = 158 \text{ mm}$

Superiores:  $W_{Placa \text{ sup.}} = 90,24 \text{ mm}$  y  $L_{Placa \text{ sup.}} = 158,024 \text{ mm}$

También es de suma importancia conocer la fuerza estimada requerida de inserción del núcleo dentro de la placa sin que estos componentes sufran daños en su montaje.

Calcularemos esta fuerza según el esfuerzo de compresión que se necesita para deformar estos componentes durante el montaje. Para eso primero hallaremos la cantidad esperada de interferencia con un ajuste FN1 y el mismo diámetro aparente anteriormente calculado.

$$\lambda_{interf} = 0,001 * C_{interf} * D^{\frac{1}{3}} = 0,001 * 13,57 * 119,54^{\frac{1}{3}} = 0,07$$

- $C_{interf}$  ; Coeficiente derivado de los coeficientes límites (Tabla 12.1; pág. 419 del libro referencia [5]).

El esfuerzo de compresión se puede suponer de la siguiente forma, considerando que la placa es más grande que el inserto:

$$\sigma = \frac{\lambda_{interferencia} * E}{2 * D} = \frac{0,07 * 205000}{2 * 119,24} = 60,17 \text{ MPa}$$

- $E$  ; Módulo Elástico del Acero P20.

La fuerza de inserción se puede estimar entonces como la tensión de compresión multiplicada por el área de contacto y el coeficiente de fricción:

$$\begin{aligned} F_{ins} &= f * \sigma * (\pi * D * H) \\ &= 1,1 * 60,17 * (\pi * 119,24 * 32) \\ &= 793,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

- $f$  ; Coeficiente de fricción.
- $H$  ; Altura de contacto entre las placas (núcleo y porta núcleo).

Finalmente es necesaria una fuerza de 793,4 kN para montar la placa núcleo dentro de la placa porta núcleo.

#### 9.4. Mantenimiento y Seguridad

Para garantizar un mantenimiento adecuado, es necesario llevar un registro del funcionamiento del molde que incluya un registro de mantenimientos, así como cualquier problema o defecto que se presente.

Hay esencialmente tres tipos de mantenimientos del molde que se recomiendan en diferentes intervalos de tiempo:

1. Mantenimiento previo y posterior al moldeo: estas tareas simples se realizan cada vez que se ejecuta un molde para garantizar que el molde esté en condiciones de funcionar y que no se dañe durante el almacenamiento.
2. Mantenimiento regular programado: se realiza regularmente para garantizar que el molde se mantenga en buenas condiciones de funcionamiento con un rendimiento constante. El intervalo de mantenimiento requerido depende de

“Diseño de una Matriz de Inyección para la Manufactura de la Carcasa de un Electrocardiógrafo Inteligente.”

la aplicación, pero normalmente es del orden de 50.000 ciclos.

Mantenimiento de reconstrucción: reelaboración intermitente de los componentes más críticos del molde necesario para continuar operando. Esta reconstrucción representa un gasto elevado, que debe planificarse cuando el molde no esté en producción. El intervalo de mantenimiento requerido depende de la aplicación, pero normalmente es del orden de 250.000 ciclos.

## 10. Configuración de Parámetros

Estas son las consideraciones para la configuración inicial de la maquina inyectora para iniciar las pruebas:

- Temperatura del plástico fundido = 230 °C
- Temperatura del molde = 50 °C
- Temperatura de eyección = 95 °C
- Tiempo de llenado teórico = 0.522 seg
- Punto de cambio de flujo a empaquetado = 100% del volumen lleno.
- Tiempo de mantenimiento de la presión = 5 seg
- Flujo medio del refrigerante = 150 cc/seg
- Temperatura del refrigerante = 10 °C

## 11. Conclusiones y Recomendaciones

### 11.1. Sumario y Conclusiones

Este trabajo final de grado se enfocó en el diseño mecánico de una carcasa de electrocardiógrafo inteligente mediante el uso de simulaciones de ciclos y diseño con el software SolidWorks Plastics. Se logró determinar una combinación ideal de materiales para la matriz de inyección y del plástico inyectado que cumplen con los estándares de calidad de la industria.

La matriz de inyección se compone principalmente de Acero P20, el cual cumple con las exigencias necesarias para el proceso de manufactura. Asimismo, los otros componentes están hechos de metales que cumplen con el objetivo de la pieza y al mismo tiempo disminuyen el costo.

A pesar de que se trabajó con parámetros genéricos de inyección, los valores y la configuración básica determinados en este estudio permitirán elegir una máquina inyectora que cumpla con los estándares establecidos y se puedan realizar las inyecciones preliminares.

Se respaldan los resultados analizados con un análisis de sensibilidad al mallado, el cual se utilizó íntegramente a lo largo del estudio para garantizar la fidelidad, exactitud y precisión de los resultados.

En definitiva, con este trabajo se presenta una matriz óptima para la manufactura de la carcasa de electrocardiógrafo inteligente, lo cual demuestra la importancia del diseño mecánico en la industria y su impacto en la calidad de los productos.

### 11.2. Recomendaciones y Trabajo Futuro

Presentamos finalmente las siguientes recomendaciones para un trabajo futuro y poder utilizar este trabajo como base o referencia:

- Iniciar el análisis de simulaciones sucesivas con una combinación definida de la pieza a ser inyectada, canales de colada y de refrigeración. Esta estrategia válida ayudará a reducir la cantidad de análisis individuales con el que se tienen los mismos resultados.
- Considerar una distribución de eyectores con menor cantidad de pines.
- Realizar los estudios de fatiga considerando en las simulaciones una cantidad de entre un millón y diez millones de ciclos, como mínimo.
- Analizar la posibilidad de agregar al modelo nervios que mejoren la resistencia y permitan disminuir más el espesor.
- Considerar no solamente la geometría de la pieza que se desea inyectar, sino también la posible selección de partes de la matriz en el mercado y diseñar alrededor de estos, en conjunto. Esto es beneficioso para una mayor disminución de costos, teniendo en cuenta que no afecte otras variables como el montaje, tamaño, peso, maquinabilidad, y otros.
- Probar otra combinación de materiales plásticos y metálicos que conforman el proceso para mejorar aún más las variables de producción del ciclo.

## 12. Bibliografía

- [1] D. M. A. M. Rodriguez, «Electrocardiografia Clinica Basica,» DICiM - CECAM, Ciudad de Mexico, 2017.
- [2] D. M. Moayyedian, *Intelligent Optimization of Mold Design and Process Parameters in Injection Molding*, Springer, 2019.
- [3] World Health Organization, «Cardiovascular Diseases (CVDs): World Health Organization,» 11 June 2021. [En línea]. Available: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)).
- [4] N. Dey, «Internet of things, smart sensors, and pervasive systems: Enabling connected and pervasive healthcare,» de *Healthcare Data Analytics and Management*, Cambridge, Academic Press, 2019, pp. 1-58.
- [5] D. O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*, vol. 2, Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, 2016.
- [6] I. E. J. Rodríguez, *Diseño de Moldes para Plásticos y Gomas*, 1989.