

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

Análisis del ciclo de enfriamiento de un molde para extrusión-soplado de  
polímeros mediante dinámica de fluidos computacionales.

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Materiales**

Presentado por:

Julio Enrique Gaona Sancán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mis amigos Bryan, María, Georgina y aquellos que han aportado en la elaboración de este proyecto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Clotario Tapia por las contantes retroalimentaciones con respecto a la elaboración de este proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Julio Enrique Gaona Sancan* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Julio Enrique Gaona Sancan

## **EVALUADORES**

.....  
**Clotario Tapia Bastidas, PhD**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**Andres Francisco Rigail Cedeño, PhD**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El presente estudio trata sobre el análisis del sistema de enfriamiento de un molde para extrusión y soplado mediante herramientas computacionales para la optimización del proceso cuyo fin fue evitar que el vapor de agua del ambiente condense sobre la superficie de contacto entre el molde y el envase. Exhaustivamente, también abarca un estudio de transferencia de calor enfocado en el molde para la cuantificación del calor absorbido por el refrigerante y la comparación con el punto de rocío para disminuir los efectos del riesgo de condensación a través de los ciclos. Los resultados indicaron que el fluido tuvo un comportamiento turbulento cuyo efecto es evidente por la eficiencia de la disipación térmica excepto en la sección del cuello durante los 9 segundos de enfriamiento. En la sección del cuello del molde, la temperatura superficial del molde fue inferior al punto de rocío cuyos problemas como defectos superficiales, contracción no homogénea, entre otros, permitió proponer nuevos parámetros para mejorar el proceso en el mismo intervalo de tiempo.

**Palabras Clave:** Enfriamiento, calor, condensación, extrusión, soplado y polímeros.

## **ABSTRACT**

*The present study deals with the analysis of the cooling system of a mold for extrusion and blow molding using computational tools for the optimization of the process whose purpose was to prevent the water vapor from the environment from condensing on the contact surface between the mold and the container. Exhaustively, it also covers a heat transfer study focused on the mold for the quantification of the heat absorbed by the coolant and the comparison with the dew point to diminish the effects of the risk of condensation through the cycles. The results indicated that the fluid had a turbulent behavior whose effect is evident by the efficiency of the thermal dissipation except in the neck section during the 9 seconds of cooling. In the section of the neck of the mold, the surface temperature of the mold was lower than the dew point whose problems such as surface defects, non-homogeneous contraction, among others, allowed proposing new parameters to improve the process in the same time interval.*

**Keywords:** *Cooling, heating, condensing, extrusion, blowing and polymers.*

# ÍNDICE GENERAL

|                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| RESUMEN .....                                             | I    |
| ABSTRACT .....                                            | II   |
| ÍNDICE GENERAL .....                                      | III  |
| ABREVIATURAS.....                                         | VI   |
| SIMBOLOGÍA.....                                           | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                   | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                    | IX   |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS.....                                   | X    |
| CAPÍTULO 1 .....                                          | 1    |
| 1. Introducción.....                                      | 1    |
| 1.1 Descripción del problema .....                        | 1    |
| 1.2 Justificación del problema .....                      | 2    |
| 1.3 Objetivos .....                                       | 3    |
| 1.3.1 Objetivo General .....                              | 3    |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....                          | 3    |
| 1.4 Marco teórico .....                                   | 3    |
| 1.4.1 Procesamiento de polímeros: Extrusión-soplado ..... | 3    |
| 1.4.2 Mecánica de fluidos .....                           | 5    |
| 1.4.3 Transferencia de calor .....                        | 6    |
| 1.4.4 Condensación.....                                   | 9    |
| 1.4.5 Modelado matemático.....                            | 10   |
| CAPÍTULO 2 .....                                          | 13   |
| 2. Metodología.....                                       | 13   |
| 2.1 Alternativas de solución.....                         | 13   |
| 2.1.1 Extractores de aire.....                            | 13   |



|                 |                                                          |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2           | Optimización de proceso.....                             | 13 |
| 2.1.3           | Chiller .....                                            | 14 |
| 2.1.4           | Matriz de decisión .....                                 | 14 |
| 2.2             | Diseño de concepto.....                                  | 15 |
| 2.2.1           | Diseño de concepto .....                                 | 15 |
| 2.2.2           | Factores determinantes en el diseño .....                | 18 |
| 2.3             | Metodología de diseño .....                              | 20 |
| 2.3.1           | Procedimiento.....                                       | 20 |
| 2.3.2           | Condiciones iniciales .....                              | 22 |
| 2.3.3           | Diagrama de flujo sobre la convergencia de valores ..... | 23 |
| 2.3.4           | Cálculo experimental del número de Reynolds .....        | 24 |
| 2.3.5           | Cálculo experimental del coeficiente de convección ..... | 24 |
| 2.3.6           | Cálculo experimental del flujo térmico.....              | 25 |
| CAPÍTULO 3..... |                                                          | 26 |
| 3.              | Resultados y análisis .....                              | 26 |
| 3.1             | Comportamiento del fluido.....                           | 26 |
| 3.1.1           | Sección: Cuello.....                                     | 26 |
| 3.1.2           | Sección: Cuerpo .....                                    | 28 |
| 3.1.3           | Sección: Fondo.....                                      | 29 |
| 3.2             | Comportamiento térmico del sistema .....                 | 30 |
| 3.2.1           | Perfil de temperatura del molde .....                    | 30 |
| 3.2.2           | Transferencia de calor transitoria.....                  | 32 |
| 3.3             | Condensación .....                                       | 34 |
| 3.4             | Análisis de costo .....                                  | 35 |
| CAPÍTULO 4..... |                                                          | 37 |
| 4.              | Conclusiones y recomendaciones .....                     | 37 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 4.1. Conclusiones.....    | 37 |
| 4.2. Recomendaciones..... | 38 |

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| CAD   | Computer aided design                    |
| CFD   | Computer fluids dynamics                 |
| CFX   | Computer fluids xpert                    |
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |

## SIMBOLOGÍA

|     |                      |
|-----|----------------------|
| Bar | Bar                  |
| kWh | Kilo watts por hora  |
| m/s | Metros por segundos  |
| mm  | Milímetros           |
| s   | segundos             |
| W   | Watts                |
| ml  | Mililitros           |
| °C  | Grados Celsius       |
| \$  | Dólar estadounidense |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Extrusión del parison.....                                              | 4  |
| Figura 1.2. Soplado del parison.....                                                | 5  |
| Figura 1.3. Perfil de velocidad en régimen laminar.....                             | 6  |
| Figura 1.4. Representación de la Ley de Fourier.....                                | 7  |
| Figura 1.5. Esquema de un nodo rectangular.....                                     | 10 |
| Figura 1.6. Representación gráfica para volúmenes finitos.....                      | 12 |
| Figura 2.1. Molde en formato CAD.....                                               | 16 |
| Figura 2.2. Circuito de refrigeración del cuello.....                               | 17 |
| Figura 2.3. Circuito de refrigeración del cuerpo.....                               | 17 |
| Figura 2.4. Circuito de refrigeración del fondo.....                                | 17 |
| Figura 2.5. Esquema de los nodos del molde.....                                     | 20 |
| Figura 2.6. Detalles de la malla.....                                               | 21 |
| Figura 2.7. Mallado del CAD.....                                                    | 22 |
| Figura 2.8. Sistema completo para la simulación.....                                | 23 |
| Figura 2.9. Esquema de la convergencia de valores.....                              | 24 |
| Figura 3.1. Entrada del refrigerante del cuello.....                                | 26 |
| Figura 3.2. Salida del refrigerante del cuello.....                                 | 27 |
| Figura 3.3. Entrada del refrigerante del cuerpo.....                                | 28 |
| Figura 3.4. Entrada del refrigerante del fondo.....                                 | 29 |
| Figura 3.5. Temperatura superficial del molde a los 9 segundos de enfriamiento..... | 34 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1. Matriz de decisión para la selección de una propuesta.....                                       | 15 |
| Tabla 2.2. Parámetros para la simulación. ....                                                              | 23 |
| Tabla 3.1. Temperatura de salida del agua de los diferentes circuitos. ....                                 | 32 |
| Tabla 3.2. Comparación entre las temperaturas promedio de las cavidades del molde y el punto de rocío. .... | 35 |
| Tabla 3.3. Criterios valorizados sobre la solución.....                                                     | 36 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 3.1. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del cuello durante el enfriamiento. .... | 27 |
| Gráfico 3.2. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del cuerpo durante el enfriamiento. .... | 29 |
| Gráfico 3.3. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del fondo durante el enfriamiento. ....  | 30 |
| Gráfico 3.4. Perfil de temperatura de la superficie de las cavidades del molde.. ....                     | 31 |
| Gráfico 3.5. Perfil de temperatura del cuello del molde durante el enfriamiento. ....                     | 32 |
| Gráfico 3.6. Perfil de temperatura del cuerpo del molde durante el enfriamiento. ....                     | 33 |
| Gráfico 3.7. Perfil de temperatura del fondo del molde durante el enfriamiento. ....                      | 33 |

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El moldeo por extrusión soplado es un proceso que incluye dos importantes procesos termoplásticos para la creación de productos huecos como envases de plásticos. Este proceso inicia con la alimentación del extrusor por medio de una tolva automática, el material virgen aumenta su temperatura ya en el husillo hasta que se crea una masa fundida homogénea. Esta masa fundida toma una forma parecida a una manga denominada parison al salir por molde diseñado como una boquilla. En la siguiente parte, un tubo hueco expulsa un flujo de aire a determinada presión para que el parison choque con la superficie de las cavidades del molde hasta que sea formado el envase final. En este punto, inicia el enfriamiento cuya función es remover el calor del envase para permitir que el siguiente ciclo continúe a temperaturas relativamente bajas.

Por ello, el tiempo de enfriamiento representa una parte sustancial en el ciclo del envase. Durante el enfriamiento, ocurre el fenómeno de la transferencia de calor por conducción y convección, sin embargo, el principal factor que contribuye a la disipación térmica es la conducción.

Con la finalidad de estudiar la disipación térmica, es necesario recurrir a técnicas computacionales como CFD para representar el perfil de temperatura de la superficie de las cavidades del molde. El modelo matemático empleado fue turbulento k-epsilon del módulo CFX de ANSYS [1]. El perfil de temperatura de las cavidades del molde fue comparado con el punto de rocío dado que depende de la temperatura ambiente y humedad relativa para predecir la existencia de la condensación en dichas secciones durante los segundos posteriores al nuevo ciclo.

### 1.1 Descripción del problema

El proceso de extrusión soplado es un tipo de procesamiento de polímeros cuyos factores como: temperatura ambiente, presión del refrigerante, caudal del refrigerante, temperatura del molde, entre otros, afectan a la calidad del



producto final. Luego del enfriamiento, el molde es abierto para expulsar la pieza y retornar a la posición inicial del siguiente ciclo. En este intervalo de tiempo ocurre una interacción entre el molde y el ambiente. Esta interacción está condicionada por: la temperatura de la superficie de la cavidad, la temperatura ambiente y la humedad relativa por lo que están estrechamente relacionada con la condensación durante la apertura del molde. A su vez, la condensación está relacionada con el punto de rocío por medio de la psicometría. Como consecuencia, la temperatura de rocío es diferente tanto en el día como en la noche. Esta diferencia de temperaturas entre las cavidades del molde y el punto de rocío provoca que el vapor de agua del ambiente condense en la superficie del molde. Esta interacción disminuye la calidad del envase del siguiente lote. Por lo que, los ingenieros de planta optan por aumentar el ciclo de enfriamiento como una solución rápida. Esta decisión, permite que la calidad del producto se mantenga, aumente el ciclo del proceso y retrasos en producción por las nuevas configuraciones de las variables de proceso.

## **1.2 Justificación del problema**

Los ciclos de producción en extrusión-soplado convencional dependen de varios factores, sin embargo, la refrigeración o enfriamiento de los moldes tiene un mayor impacto en los tiempos de producción dado que es importante para la calidad del producto final. Por ello, las empresas buscan optimizar este tiempo, cuyo fin es aumentar la producción sin afectar la calidad del producto. Las variables como: presión de soplado, temperatura del parison, temperatura del molde, temperatura del refrigerante, entre otros, afectan a todo el ciclo que si no se controlan adecuadamente resulta en problemas como: condensación, tiempos largos del proceso, enfriamiento no homogéneo y espesor variable en las diferentes secciones del envase. [2]

Sin embargo, la condensación en los moldes es uno de los problemas más comunes que se debe tomar en cuenta, dado que ocurre por dos principales factores: humedad y temperatura ambiente, puesto que las secciones están

en constante transmisión de calor por los gradientes de temperatura durante el proceso. Estos gradientes de temperatura ocasionan que, en ciertas zonas, el refrigerante absorba menos calor que en otras, permitiendo que dichas zonas presenten mayor temperatura a la temperatura de rocío formando gotas en la superficie.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar el sistema de refrigeración en un molde de 3 cavidades para extrusión-soplado mediante validaciones numéricas usando la dinámica de fluidos computacionales para el control del proceso a partir del molde de un envase de Polietileno de alta densidad de 500 ml.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Simular el comportamiento del refrigerante en base al modelo k- $\epsilon$  mediante análisis CFD para la representación del ciclo de producción del molde de 3 cavidades para extrusión-soplado.
2. Determinar la disipación térmica del molde en base a los resultados de la simulación mediante las ecuaciones de la transferencia de calor en distintas secciones del molde de 3 cavidades para la cuantificación del calor absorbido por el refrigerante.
3. Disminuir los efectos de la condensación en las cavidades del molde mediante la representación gráfica de las temperaturas en el transcurso del tiempo y la comparación con el punto de rocío de la planta de producción.

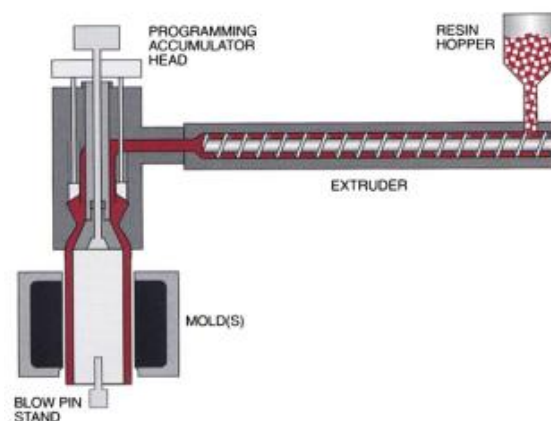
## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Procesamiento de polímeros: Extrusión-soplado**

#### **1.4.1.1 Extrusión de polímero**

El procesamiento de plástico por extrusión es una de las formas más comunes para la fabricación de productos plásticos. Las diversas variaciones en su estructura permiten que sea ideal para productos finales o preformas. Las

partes principales de un extrusor de polímeros son: alimentación, compresión y dosificación. La alimentación de la extrusora, generalmente, emplea equipos automáticos para que el material virgen sea transportado y almacenado en la tolva. A continuación, las resistencias eléctricas aumentan la temperatura del material sobre el punto de fusión. El polímero fundido es transportado por un husillo hasta comprimir y mezclar el material. En la dosificación, el plástico fundido toma la forma de una manga denominada parison, cuyas dimensiones dependen de la geometría de la boquilla y el tiempo de extrusión.



**Figura 1.1. Extrusión del parison [3].**

#### **1.4.1.2 Soplado de polímero**

El inicio del procesamiento de plástico por soplado ocurre cuando el parison está completamente formado y entra en contacto con el cuello del molde en el instante en que cierra. Generalmente, el molde se subdivide en tres secciones: cuello, cuerpo y fondo, para facilitar la manufactura y selección de material de cada sección. El molde es transportado hasta un tubo alineado al cuello del envase. El tubo expulsa aire a alta presión para expandir las paredes del parison hasta la cavidad del molde y formar el envase[3]. Luego inicia el enfriamiento del molde, el tiempo de enfriamiento depende de varios factores, cuya importancia radica en la calidad del producto. Cuando el producto ha disminuido su temperatura por disipación térmica, el molde se abre para expulsar el envase y retornar a su posición original e iniciar un nuevo ciclo. Durante la apertura del molde las cavidades del molde están expuestas al ambiente. En este punto, ocurre la condensación que provoca defectos superficiales en el siguiente lote de envase.

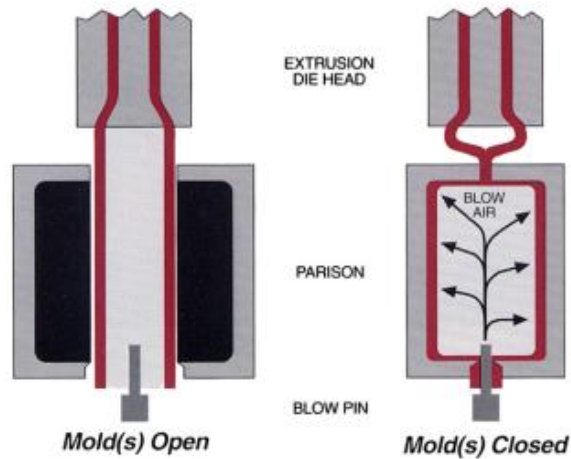


Figura 1.2. Soplado del parison [3].

## 1.4.2 Mecánica de fluidos

### 1.4.2.1 Principio de Bernoulli y ecuación de la continuidad

El principio de Bernoulli es una expresión matemática de gran importancia para el estudio del comportamiento de un fluido dado que representa las presiones dependientes de la velocidad, altura y densidad [4].

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1.1)$$

Una expresión matemática que explica la relación del caudal de un fluido con las áreas y la velocidad es la ecuación de la continuidad: [4]

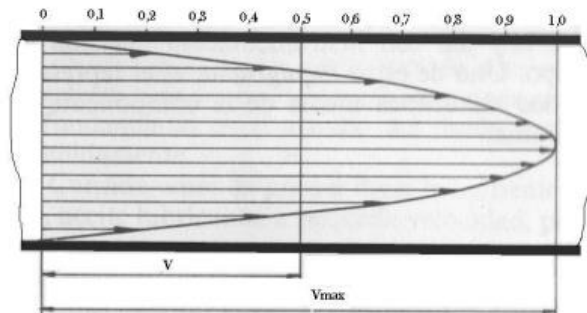
$$Q_1 = A_1 v_1 \quad (1.2)$$

### 1.4.2.2 Número de Reynolds

Una forma de diferenciar un fluido es mediante la interacción de las moléculas entre la relación de fuerzas inerciales y fuerzas viscosas denominada número de Reynolds. La principal diferencia radica en el tipo de fluido: laminar y turbulento. Si un fluido es turbulento, entonces las fuerzas inerciales son mucho más grandes que las fuerzas viscosas permitiendo que fluya con mayor velocidad y sea generada la turbulencia entre las moléculas del fluido.[4]

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (1.3)$$

Las fuerzas inerciales son representadas por: la densidad ( $\rho$ ), diametro ( $D$ ) y velocidad del fluido ( $v$ ). La fuerza viscosa representada por la viscosidad del fluido ( $\mu$ ). Si el número de Reynolds es menor a 2000, el flujo es laminar. Si el número de Reynolds es mayor a 4000, el flujo es turbulento. Entre 2000 y 4000 el fluido sufre una transición. El perfil de velocidad del régimen laminar es representado por un pico a lo largo de un eje. En el régimen turbulento, el fluido tiene un comportamiento caótico por la formación de remolinos, el perfil de velocidad es plano por distribución de velocidades a lo largo del radio de una tubería circular. [5]



**Figura 1.3. Perfil de velocidad en régimen laminar. [5]**

También, un fluido es clasificado según la densidad, en caso que la densidad sea variable, el fluido es compresible. Si la densidad es constante, el fluido es incompresible [5].

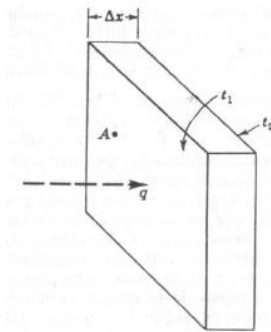
### 1.4.3 Transferencia de calor

#### 1.4.3.1 Por conducción

Las condiciones necesarias para que exista transmisión de calor en un cuerpo es la existencia de un gradiente de temperatura. La ley que gobierna la conducción de calor es la ley de Fourier. Esta ley implica que, en una placa de superficie  $A$ , espesor  $x$  y temperatura  $T_1$  y  $T_2$  existe un flujo calorífico desde la zona con alta temperatura hasta la zona de baja temperatura por contacto

directo. El valor  $k$  expresa la conductividad térmica dependiente de la composición del material.[6]

$$Q_{cond} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.4)$$



**Figura 1.4. Representación de la Ley de Fourier.[6]**

#### 1.4.3.2 Por convección

La convección es el segundo mecanismo de transferencia de calor, es definida como la transmisión de calor por consecuencia del movimiento de un fluido sobre una superficie. La ley de enfriamiento de Newton es el principio que explica esta forma de transición de calor. Relaciona el área superficial de la interfaz sólido-fluido ( $A$ ), temperatura de la superficie ( $T_s$ ) temperatura del medio ( $T_m$ ) y el coeficiente de convección de calor ( $h$ ).

$$Q_{conv} = hA (T_m - T_s) \quad (1.5)$$

Este mecanismo se divide en dos grupos: natural y forzada. La convección forzada ocurre por acción de un fluido inducido cuyos valores del coeficiente de convección de calor son elevadas [6]

Según el comportamiento del fluido, la convección del fluido se relaciona con la turbulencia del fluido. Esta relación se la conoce como número de Nusselt cuya relación es dada entre la convección del fluido y la conducción de calor.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (1.6)$$

Depende del tipo de fluido que interactúa con la superficie de un sólido, existen ecuaciones que explican dicha relación [7]. Existen varias correlaciones determinadas por el método experimental para cuantificar el número de Nusselt. La correlación Dittus-Boelter permite relacionar el número de Reynolds y el número de Prandtl para un sistema de enfriamiento ( $n=0,3$ ) o calentamiento ( $n=0,4$ ).

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (1.7)$$

Sin embargo, dicha ecuación es una correlación válida para:  $0,6 \leq Pr \leq 160$ ,  $Re > 10000$  y  $\frac{L}{D} > 10$ . El número de Prandtl explica la relación entre el espesor relativo de las capas límites de momento y térmica.

#### 1.4.3.3 Por radiación

La radiación es el tercer mecanismo de transferencia de calor. La principal característica de este fenómeno es la nula interacción por contacto físico. Es suficiente que los cuerpos estén ubicados a cierta distancia y a distintas temperaturas para que puedan ganar o perder calor por emisión electromagnética. Esto quiere decir que, la transmisión de calor depende de la emisividad del material ( $\epsilon$ ), la constante de Boltzmann ( $\sigma$ ) y la cuarta potencia de la temperatura absoluta entre el cuerpo y el ambiente (T). [6]

$$Q_{rad} = \epsilon\sigma(T^4 - T_{ambiente}^4) \quad (1.8)$$

#### 1.4.3.4 Transferencia de calor en estado transitorio

Las ecuaciones anteriores rigen en estado estacionario, es decir cuando el gradiente de temperatura no cambia con el tiempo. Sin embargo, el flujo de calor durante el enfriamiento del envase tiene un comportamiento transitorio. La transferencia de calor es un fenómeno multidimensional, es decir, varía a

lo largo de las tres direcciones (x,y,z). Sin embargo, el problema puede ser tratado en forma unidimensional. El balance de energía general para estudiar un sistema es dado por:

$$\dot{Q}_{cond(x)} - \dot{Q}_{cond(x+\Delta x)} + \dot{e}_{gen} = \dot{Q}_{sistema} \quad (1.9)$$

Algunos de los sistemas empleados para resolver este tipo de problema son: placa semiinfinita, sólidos semiinfinitos, entre otros. La distribución de la temperatura dependiente del tiempo y la posición sin generación de calor cuyas condiciones de frontera varían según el caso de estudio es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

#### 1.4.4 Condensación

##### 1.4.4.1 Tipos de condensación

La condensación es un fenómeno que ocurre por efecto de la reducción de la temperatura del vapor hasta un valor inferior de la temperatura de saturación o punto de rocío. La condensación puede tomar dos formas: en películas y en gotas. Si se forman pequeñas láminas de líquidos sobre la superficie, es condensación por película. En la condensación en gotas, el vapor es condensado en forma de gotas sobre una superficie sólida de manera aleatoria y discontinua [7].

##### 1.4.4.2 Punto de rocío

El punto de rocío es un parámetro que dependen de las condiciones externas como: la temperatura ambiente y humedad relativa. Representa la temperatura límite de la condensación del vapor de agua de forma natural [9]. Cuando la temperatura de rocío es inferior a la temperatura de la cavidad del molde. Sin embargo, para que el vapor de agua no condense debe cumplir la siguiente restricción:  $T_{promedio} > T_{rocío}$  [10].



## 1.4.5 Modelado matemático

### 1.4.5.1 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas establece una forma matemática para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Bajo este procedimiento es necesario un nodo representativo con determinadas condiciones.

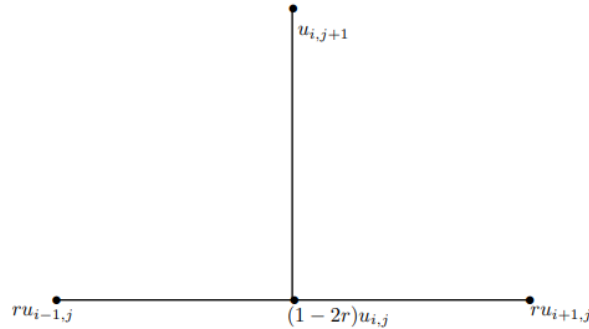


Figura 1.5. Esquema de un nodo rectangular [11]

En caso del nodo rectangular,  $R = \{(x, t), 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq b\}$ , cuya  $\Delta x = h, \Delta t = k$  siendo la solución:  $u(x_i, t_i) = f(x_i)$ . Así, las fórmulas para la solución son:

$$u_{xx}(x, t) = \frac{u(x - h, t) - 2u(x, t) + u(x + h, t)}{h^2} \quad (1.2)$$

Para la ecuación de calor unidimensional:

$$\frac{u(x, t + k) - u(x, t)}{k} = a^2 \frac{u(x - h, t) - 2u(x, t) + u(x + h, t)}{h^2} \quad (1.3)$$

La anterior formulación sirve en un sistema estable cuya condición es  $k \leq \frac{h^2}{2a^2}$ , caso contrario es recomendable utilizar otras técnicas numéricas.

### 1.4.5.2 Modelo matemático del fluido en CFX

El modelo de turbulencia empleado en el módulo CFX explica las distintas interacciones para definir el comportamiento del fluido, tomando en cuenta las

siguientes consideraciones: flujo incompresible, régimen turbulento y no existen cambios de fases durante el proceso cuyas ecuaciones gobernantes son: [12]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(k) \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon) \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon + C_{1\varepsilon} P_{\varepsilon b}) \quad (1.5)$$

$P_{kb}$  y  $P_{\varepsilon b}$  son parámetros dependientes de la fuerza de flotabilidad.  $U_j$  es el vector de velocidad en  $Y$ .  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son constantes definidas como:  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ . La solución a esta ecuación se aproxima por la escala de Prandtl: [13]

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1.6)$$

#### 1.4.5.3 Ecuación de la energía en CFX

El modelo energético del módulo CFX, donde  $h_{tot}$  es la entalpía total del sistema,  $\lambda$  es la conductividad térmica,  $U$  la energía interna,  $S_M$  es el impulso,  $S_E$  es la fuente de energía y  $\tau$  es el tensor.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) - \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + U S_M + S_E \quad (1.7)$$

#### 1.4.5.4 Método de discretización en CFX

El nivel de complejidad para encontrar una solución del modelo de turbulencia y energético es bastante considerable [13]. La mayoría de los problemas en CFD se resuelven por medio del método de volúmenes finitos debido a que considera geometrías complejas e implementan mallas detalladas tanto no estructuradas como estructuradas [14].

$$\int \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \oint \rho\phi(\vec{u} * \hat{n}) dA = \oint \Gamma_\phi(\nabla\phi * \hat{n}) dA + \int S_\phi dV \quad (1.8)$$

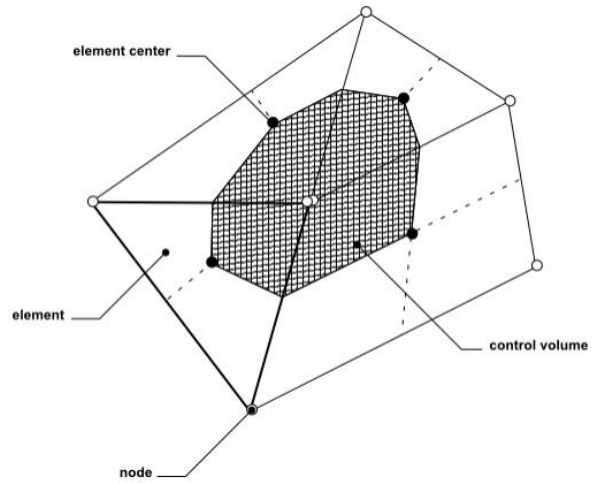


Figura 1.6. Representación gráfica para volúmenes finitos [13]

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Alternativas de solución

#### 2.1.1 Extractores de aire

La extracción de aire del interior de la planta es importante para mantener la productividad puesto que evita el sobrecalentamiento de equipos. Por ello, el extractor de aire regula la temperatura ambiente permitiendo que el cambio de temperatura de los moldes de los equipos de procesamiento de plástico sea mínimo hasta llegar a la estabilidad. Esto implica que, la temperatura de rocío sea regularizada durante el día y la noche, por lo que disminuiría el tiempo de transición del reinicio de las variables de proceso. De esta manera, tiene un gran impacto durante el inicio del siguiente lote, es decir, cuando el molde está completamente abierto. Sin embargo, el costo de adquisición e incluido las adecuaciones de las instalaciones requieren de una gran inversión y tiempo para ser implementado. Esta paralización provocaría grandes consecuencias en el cumplimiento de los contratos de la empresa.

#### 2.1.2 Optimización de proceso

Otra alternativa que se planteo fue la adquisición de un software dedicado a simulación para simular el proceso de extrusión soplado convencional con el fin de optimar el proceso durante la etapa de enfriamiento. La principal ventaja de esta solución es la gran capacidad para modificar los parámetros de procesos como: presiones, caudales y temperaturas del refrigerante. Estas variables son relacionadas profundamente con la etapa de enfriamiento del molde, por ello cuando es manejada correctamente puede convertirse en una solución poderosa para el diseño de nuevos canales de refrigeración de futuros moldes. Las variables de respuestas como la temperatura son esencial para conocer el perfil de temperatura del molde mientras está completamente abierto.

No obstante, una desventaja es el alto costo de la licencia del software y capacitaciones constante del personal debido a las nuevas herramientas que se incorporan después de las actualizaciones.

### **2.1.3 Chiller**

La última propuesta que se planteó fue la compra de un nuevo chiller cuya función es remover el calor de los moldes para mejorar la capacidad de extracción de calor de los envases. Actualmente, la empresa dispone de la cantidad necesaria de chillers para mantener la producción, sin embargo, las diferentes condiciones ambientales por los cambios de estaciones generan que se requiera aumentar un chiller, principalmente porque existen días y noches más calurosos requiriendo extraer más calor. Este factor es esencial para mantener la producción, pero el costo de adquisición y reestructuración de la planta son considerablemente altos.

Optar por esta solución beneficiaría a la extracción de calor del molde por el refrigerante, por lo que, la temperatura de la superficie de las cavidades del molde disminuiría hasta por encima del punto de rocío.

### **2.1.4 Matriz de decisión**

Las propuestas fueron evaluadas, junto con los ingenieros de proceso, bajo los siguientes criterios: inversión inicial, tiempo de implementación, capacitaciones del personal, viabilidad estructural y costo de mantenimiento. La inversión inicial fue un criterio importante para la empresa puesto que dependió de la economía de la empresa. El tiempo de implementación estuvo ligado a la cantidad de tiempo perdido por los arreglos de la infraestructura. Las capacitaciones constantes del personal fueron consideradas. La viabilidad estructural dependió de la infraestructura de la empresa, en algunos casos requiere construir una sección especial para implementar la solución. Finalmente, el costo de mantenimiento fue un criterio considerado dado que implica el factor económico.

La cuantificación de los criterios fue valorada entre 1 a 5, la ponderación fue: muy negativo (1), negativo (2), ni positivo ni negativo (3), positivo (4) y muy positivo (5). Cada criterio representa un peso en la matriz de decisión cuya suma definió la mejor solución.

**Tabla 2.1. Matriz de decisión para la selección de una propuesta. (Elaboración propia)**

| Criterio                    | Peso     | Alternativas      |      |                         |     |             |      |
|-----------------------------|----------|-------------------|------|-------------------------|-----|-------------|------|
|                             |          | Extractor de aire |      | Optimización de proceso |     | Chiller     |      |
| Inversión inicial           | 0,3      | 2                 | 0,6  | 3                       | 0,9 | 3           | 0,9  |
| Tiempo de implementación    | 0,15     | 2                 | 0,3  | 4                       | 0,6 | 2           | 0,3  |
| Capacitaciones del personal | 0,15     | 3                 | 0,45 | 2                       | 0,3 | 3           | 0,45 |
| Viabilidad estructural      | 0,3      | 1                 | 0,3  | 4                       | 1,2 | 1           | 0,3  |
| Costo de mantenimiento      | 0,1      | 2                 | 0,2  | 3                       | 0,3 | 2           | 0,2  |
| <b>Total</b>                | <b>1</b> | <b>1,85</b>       |      | <b>3,3</b>              |     | <b>2,15</b> |      |

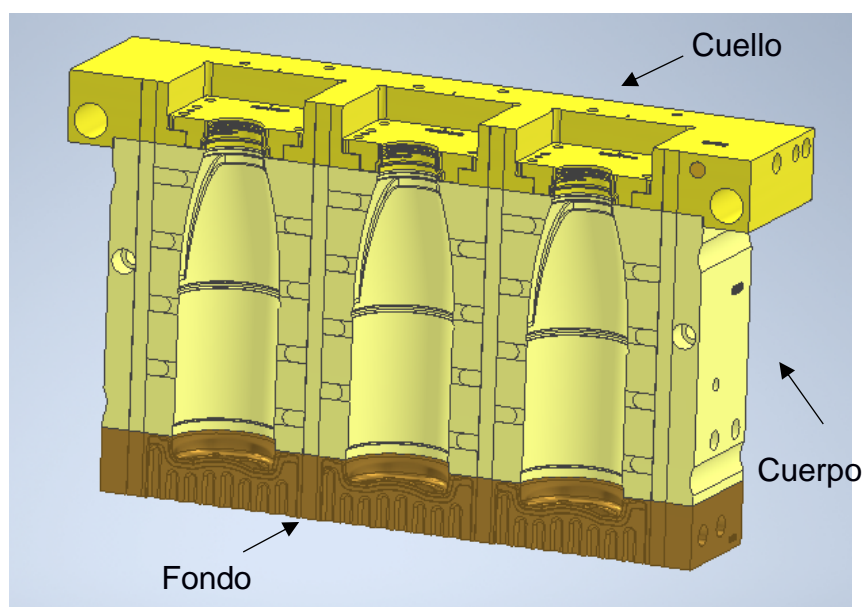
En base a la matriz de decisión, la mejor alternativa para la solución del problema fue la simulación, es decir, la adquisición de un software dedicado a simulaciones fue la propuesta aceptada por la empresa dada las ventajas que representa con respecto a las otras alternativas. Las propuestas del extractor de aire y el chiller fueron descartadas debido a las readecuaciones en la empresa y la construcción de nueva infraestructura destinada para este propósito, por ello, el criterio del tiempo de implementación y viabilidad estructural tuvieron un impacto negativo en la toma de decisión.

## 2.2 Diseño de concepto

### 2.2.1 Diseño de concepto

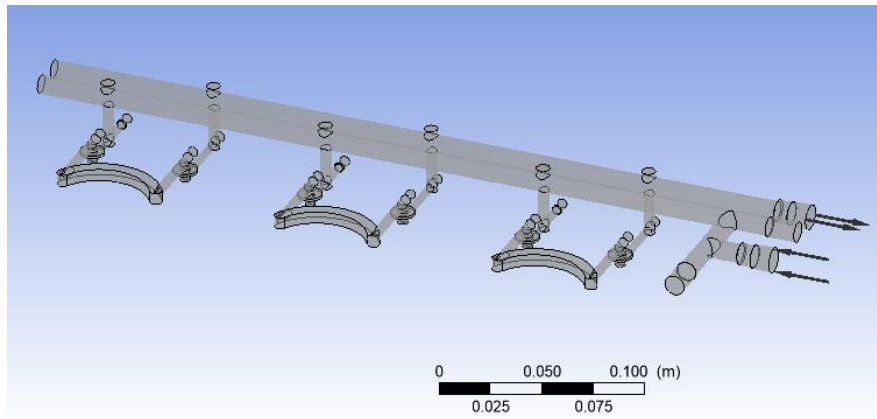
El desarrollo de la propuesta seleccionada anteriormente implica la existencia de muchas variables que están presentes durante el proceso de extrusión soplado. A

continuación, el molde de 3 cavidades para un envase de 500 mL es presentado en un diseño asistido por ordenador o formato CAD, cuyas dimensiones en altura es: 260 mm, largo: 450 mm y profundidad: 99 mm. El CAD fue diseñado por los ingenieros de diseño de la empresa y dividido en 3 secciones: cuello, cuerpo y fondo. Cada sección fue manufacturada con distintos materiales para reducir el tiempo de enfriamiento. La sección de cuello y fondo fue manufacturada con acero martensítico M303 resistente a la corrosión mientras que el cuerpo está hecho de duraluminio.

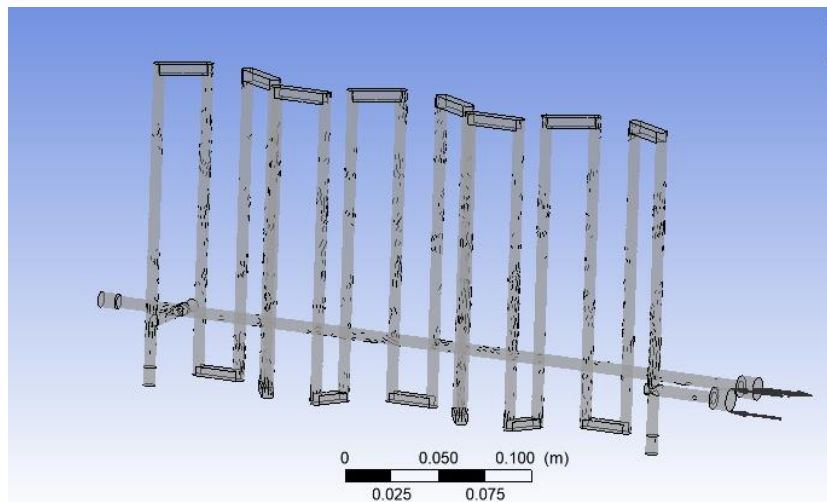


**Figura 2.1. Molde en formato CAD (Elaboración propia)**

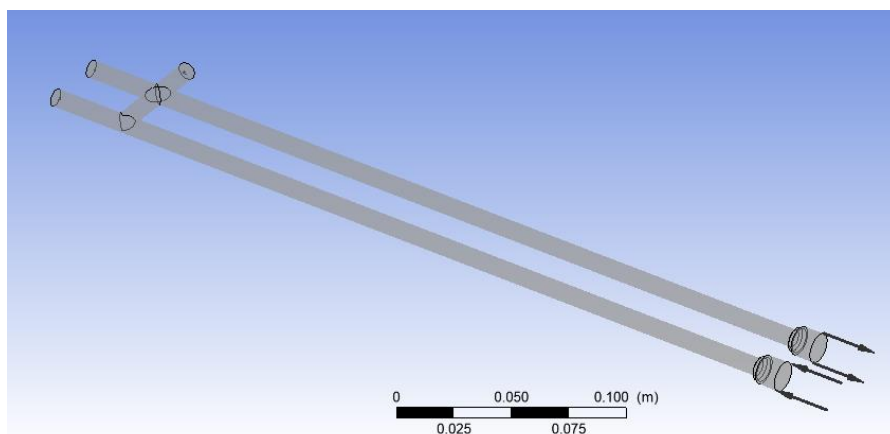
Cada sección del molde tiene su propio circuito de enfriamiento, es decir, existen 3 diferentes circuitos cuyas entradas y salidas son independientes. No obstante, todos los circuitos tienen un diámetro constante de 6,5 mm, pero la longitud del circuito del cuello, cuerpo y fondo mide: 5,12 m, 3,63 m y 0,81, respectivamente. De esta manera, con el formato CAD fue desarrollada la simulación del sistema compuesto por: cuello, cuerpo, fondo, circuito de refrigeración del cuello, circuito de refrigeración del cuerpo y circuito de refrigeración del fondo, enfocado en la etapa de enfriamiento que depende de las presiones de llegada, caudal y temperatura del agua.



**Figura 2.2. Circuito de refrigeración del cuello. (Elaboración propia)**



**Figura 2.3. Circuito de refrigeración del cuerpo. (Elaboración propia)**



**Figura 2.4. Circuito de refrigeración del fondo. (Elaboración propia)**



Los manuales e investigaciones referentes al módulo CFX perteneciente a ANSYS fueron requeridos para ingresar adecuadamente las condiciones de frontera. Para la ejecución de este proyecto fue utilizada la licencia adquirida por parte de ESPOL versión 2019. Adicionalmente, implica una extensa revisión bibliográfica acerca de la teoría que engloba este problema tales como: número de Reynolds, transferencia de calor, modelos matemáticos computacionales, entre otras.

## **2.2.2 Factores determinantes en el diseño**

### **2.2.2.1 Respecto al fluido**

Para el desarrollo de la simulación de los circuitos de refrigeración fue evaluado diferentes factores desde distintos enfoques. Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, el fluido fue considerado como un fluido incompresible debido a que la densidad del agua se mantiene constante durante la etapa de enfriamiento. La condición de no deslizamiento en la capa límite permitió que la velocidad del fluido sea considerada la misma tanto en las paredes como en el centro del canal de refrigeración [7]. En el desarrollo de la simulación, es necesario considerar las presiones y temperaturas del fluido puesto que la transmisión de calor es influenciada por el comportamiento del fluido. Estas variables, fueron definidas por los ingenieros de producción.

### **2.2.2.2 Referente a la transferencia de calor**

Debido a que existe un cambio de temperatura durante un intervalo de tiempo, la transferencia de calor fue considerada como transitorio. En base a los análisis de M.E. Ryan y A. Dutta fue desarrollado un modelo matemático unidimensional para el proceso de extrusión soplado, en dicho estudio fue analizado la transmisión de calor tanto por el polímero como el molde. Dado que este estudio está enfocado en la etapa de enfriamiento del molde, el modelo matemático de transferencia de calor fue planteado para el molde cuyo mayor impacto fue por conducción. No obstante, por efecto de la capa límite, la convección interna fue tomada en cuenta y determinada por la relación con el número de Nusselt, Reynolds y Prantl [15]. Así, el balance de energía para el molde fue simplificado a la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) * \frac{k}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

Para simplificar la expresión matemática anterior, el análisis fue llevado a cabo en una dimensión [16]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.19)$$

Aplicando el método de diferencias finitas:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \left[ \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right] \quad (2.20)$$

Donde la temperatura depende del i-posición y n-tiempo bajo las siguientes condiciones de contorno:

$$x = 0, \forall t; k \frac{\partial T}{\partial x} = h[T - T_f] \quad (2.9)$$

$$x = L, \forall t; T = T_m \quad (2.10)$$

Donde h es el coeficiente de convección interno del fluido, k la conductividad térmica del molde y  $T_m$  es la temperatura del molde. La condición inicial fue:

$$t = 0, \forall x > 0; T = T_i \quad (2.11)$$

$T_i$  es la temperatura inicial del molde. Así, la solución para la ecuación gobernante de calor fue:

$$T_i^{n+1} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} [T_{i+1}^n] + \left[ 1 - \left( \frac{\Delta t \alpha}{\Delta x} \right) \left( \frac{1}{\Delta x} + \frac{h}{k} \right) \right] [T_i^n] + \left( \frac{\Delta t \alpha h}{k \Delta x} \right) T_f ; x = 0 \quad (2.12)$$

$$T_i^{n+1} = [T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n] \left[ \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \right] + T_i^n ; x = L \quad (2.13)$$

El punto inicial del nodo fue representado por la superficie del canal de refrigeración mientras que el final estuvo restringido por la temperatura de la cavidad del molde.

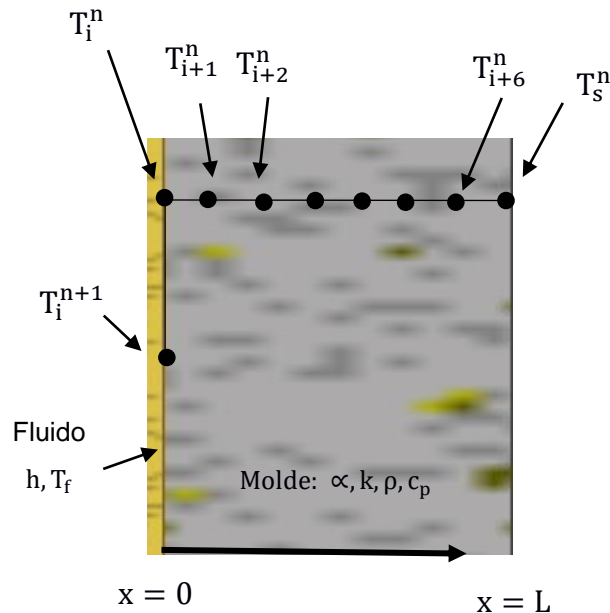


Figura 2.5. Esquema de los nodos del molde. (Elaboración Propia)

### 2.2.2.3 Referente a la condensación

Con respecto a la condensación, las temperaturas de la superficie de las cavidades representan un promedio de toda la sección del molde [7] para que sean comparadas con el punto de rocío y concluir si existe riesgo de condensación [9]. Finalmente, para fines prácticos la primera cavidad del molde es aquella cercana a la entrada del circuito de enfriamiento, la segunda cavidad está ubicada en la mitad del molde y la última está más alejada de la entrada del refrigerante.

## 2.3 Metodología de diseño

### 2.3.1 Procedimiento

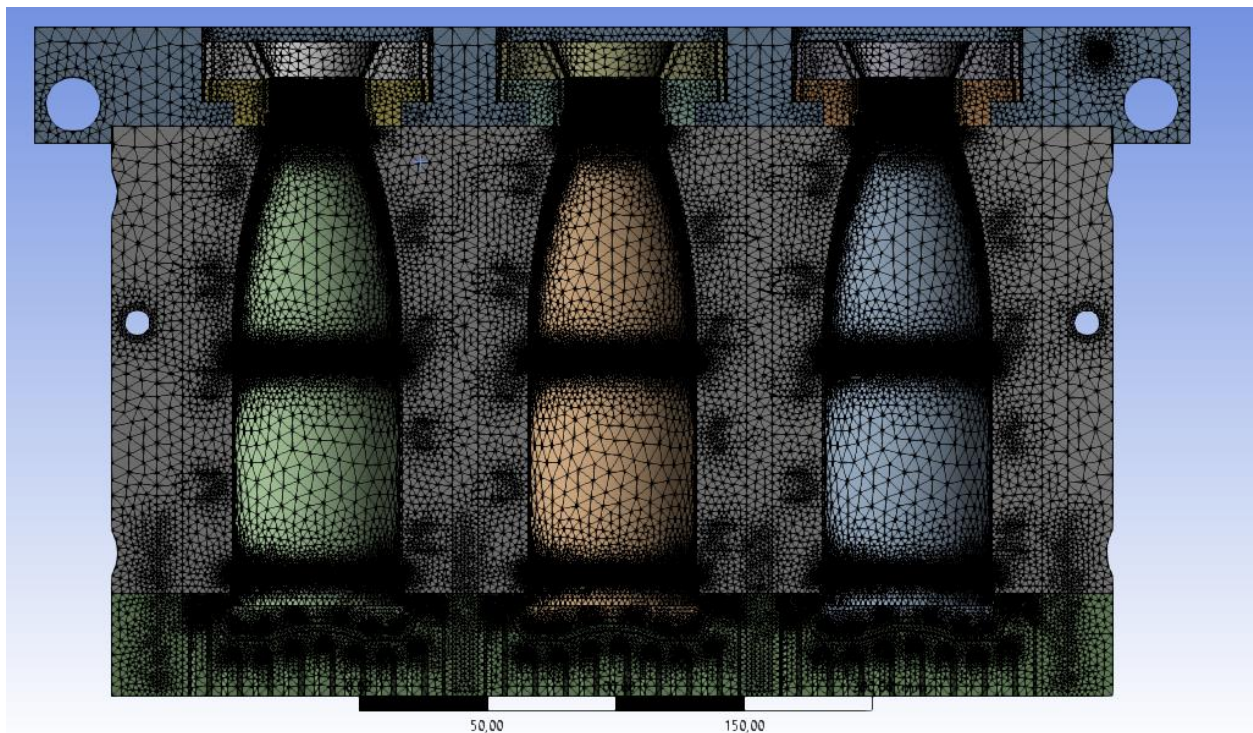
El procedimiento de la propuesta de solución inició por la revisión bibliográfica sobre el proceso de extrusión soplado y las variables de procesamiento para mejorar el contexto de la problemática, entrevistas a expertos relacionados con el tema tanto

teórico como la simulación. Fue recolectada información relevante por parte de los profesionales involucrados en la problemática tales como: temperaturas del refrigerante, presiones, tiempos de enfriamientos, entre otras variables relevantes al proyecto. Explorar el manual del módulo CFX de ANSYS fue fundamental para el desarrollo correcto de la simulación. A continuación, los siguientes detalles del mallado agregado a la simulación son:

| Details of "Mesh"                               |                        |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Display</b>                                  |                        |
| <b>Defaults</b>                                 |                        |
| Physics Preference                              | CFD                    |
| Solver Preference                               | CFX                    |
| Element Order                                   | Linear                 |
| <input type="checkbox"/> Element Size           | 200, mm                |
| <b>Sizing</b>                                   |                        |
| Use Adaptive Sizing                             | No                     |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate            | Default (1,2)          |
| <input type="checkbox"/> Max Size               | Default (400, mm)      |
| Mesh Defeaturing                                | Yes                    |
| <input type="checkbox"/> Defeature Size         | Default (1, mm)        |
| Capture Curvature                               | Yes                    |
| <input type="checkbox"/> Curvature Min Size     | Default (2, mm)        |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,°)         |
| Capture Proximity                               | No                     |
| Bounding Box Diagonal                           | 529,06 mm              |
| Average Surface Area                            | 254,19 mm <sup>2</sup> |
| Minimum Edge Length                             | 3,2408e-002 mm         |
| <b>Quality</b>                                  |                        |
| <b>Inflation</b>                                |                        |
| <b>Advanced</b>                                 |                        |
| <b>Statistics</b>                               |                        |
| <input type="checkbox"/> Nodes                  | 434382                 |
| <input type="checkbox"/> Elements               | 2126550                |

**Figura 2.6. Detalles de la malla. (Elaboración propia)**

Los parámetros utilizados por el personal de producción fueron ingresados en la simulación para, finalmente procesar e interpretar los resultados como: la velocidad del flujo, temperaturas y presiones durante el trayecto del refrigerante en un tiempo específico. Adicionalmente, fue propuesto otros parámetros para mejorar el proceso inicial de los ingenieros de producción.



**Figura 2.7. Mallado del CAD (Elaboración propia)**

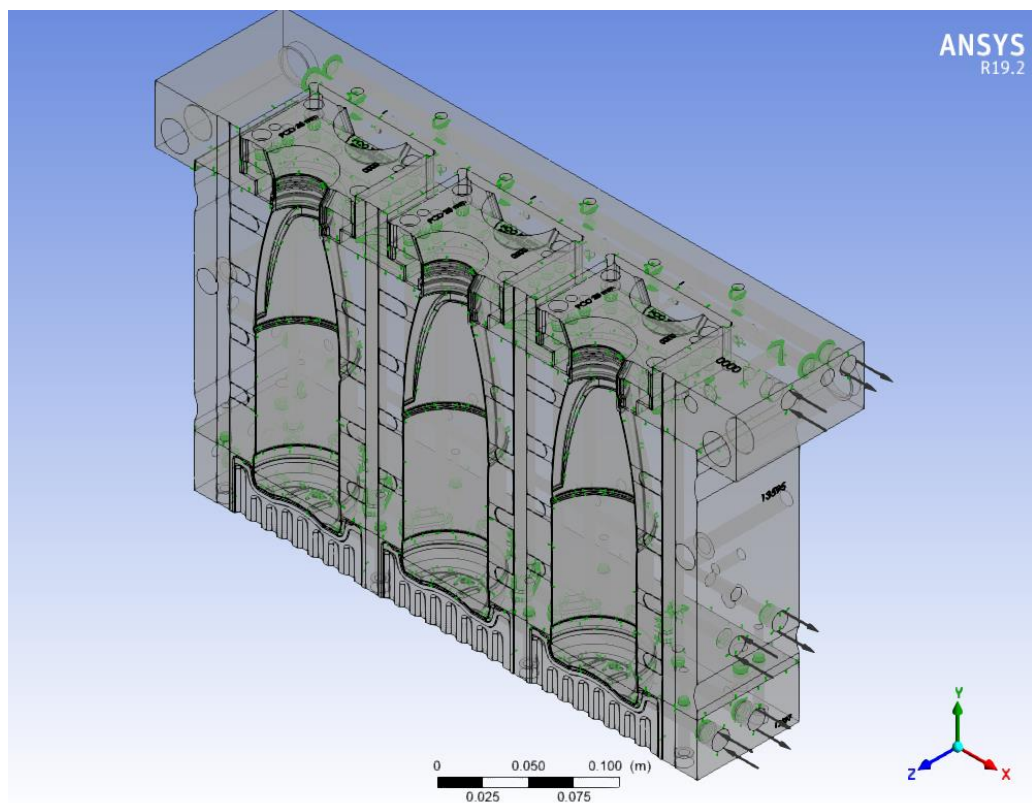
Luego, las ecuaciones de la mecánica de fluidos indicaron el tipo de fluido, el fluido elegido para el enfriamiento fue agua a temperatura entre 15°C a 20°C, las propiedades termodinámicas para el cálculo del número de Reynold son: viscosidad dinámica:  $1,002 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$  y densidad:  $998 \text{ kg/m}^3$  [7]. En el caso de la transferencia de calor, la conductividad térmica del acero M303 es:  $22,8 \text{ W/mK}$ , calor específico:  $465 \text{ J/Kg K}$  y densidad:  $7,72 \text{ kg/dm}^3$  [17]. Las propiedades del duraluminio 7075 son: conductividad térmica:  $153 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , calor específico:  $857 \text{ J/Kg }^\circ\text{C}$  y densidad:  $2,83 \text{ kg/dm}^3$  [18]. Para la condensación fue comparada la temperatura de rocío del ambiente con la temperatura superficial de las cavidades del molde antes del siguiente ciclo.

### **2.3.2 Condiciones iniciales**

A continuación, las condiciones iniciales para las simulaciones de los circuitos de refrigeración en CFX fueron los siguientes:

**Tabla 2.2. Parámetros para la simulación. (Elaboración propia)**

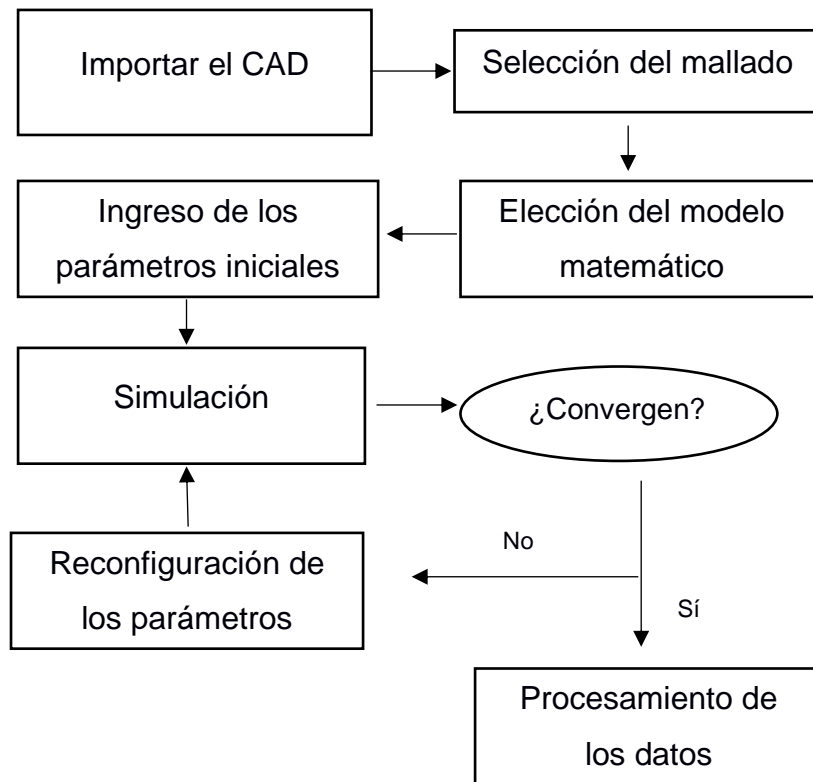
| Parámetro                                  | Unidad | Producción | Mejora |
|--------------------------------------------|--------|------------|--------|
| Presión de entrada del fluido al molde     | Bar    | 4,5        | 4      |
| Presión de salida del fluido al molde      | Bar    | 1          | 1      |
| Temperatura de entrada del fluido al molde | °C     | 16,8       | 16,8   |
| Temperatura del parison                    | °C     | 133,7      | 133,7  |



**Figura 2.8. Sistema completo para la simulación. (Elaboración propia)**

### 2.3.3 Diagrama de flujo sobre la convergencia de valores

La metodología implementada en la resolución del modelo matemático en CFX es representada por el siguiente esquema: [13]



**Figura 2.9. Esquema de la convergencia de valores. (Elaboración propia)**

### **2.3.4 Cálculo experimental del número de Reynolds**

El cálculo experimental del número de Reynolds fue basado en las velocidades del fluido promedio.

### **2.3.5 Cálculo experimental del coeficiente de convección**

Le interacción fluido-sólido provoca que exista un coeficiente de convección de calor sobre la interfaz. Este coeficiente al ser diferente para los 3 circuitos requirió un estudio independiente relacionada con la constante de Prantl y el número de Reynolds [16]. El comportamiento del fluido ocurre en el intervalo de 15 a 20°C cuyo impacto en las propiedades termodinámicas del fluido no son considerables, de este modo, el número de Prantl fue 7,05.

### 2.3.6 Cálculo experimental del flujo térmico.

Las iteraciones por el método de diferencias finitas permitieron definir la temperatura en función de la posición y el tiempo ( $T(x, t)$ ) representada, en este caso, por  $T_i^{n+1}$  ubicada en un punto de la superficie de la cavidad. Exhaustivamente, en el trabajo de Karmal M., muestra una gráfica experimental del análisis numérico de la temperatura del molde con respecto al tiempo [19]. De este modo por la ley de Fourier fue posible cuantificar el flujo térmico [16].

$$\dot{Q} = k \frac{dT}{dx} \quad (2.26)$$



# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Comportamiento del fluido

#### 3.1.1 Sección: Cuello

En base a los resultados de la simulación de los parámetros de producción fue posible observar el comportamiento del fluido en cada sección a los 9 segundos de enfriamiento. En la sección del cuello, la velocidad del fluido en las proximidades de la entrada alcanzo hasta 7,2 m/s lo que implica que el régimen es turbulento. Sin embargo, en la segunda cavidad, el fluido reduce su velocidad a 4,5 m/s, a pesar de esta reducción continuó en estado turbulento.

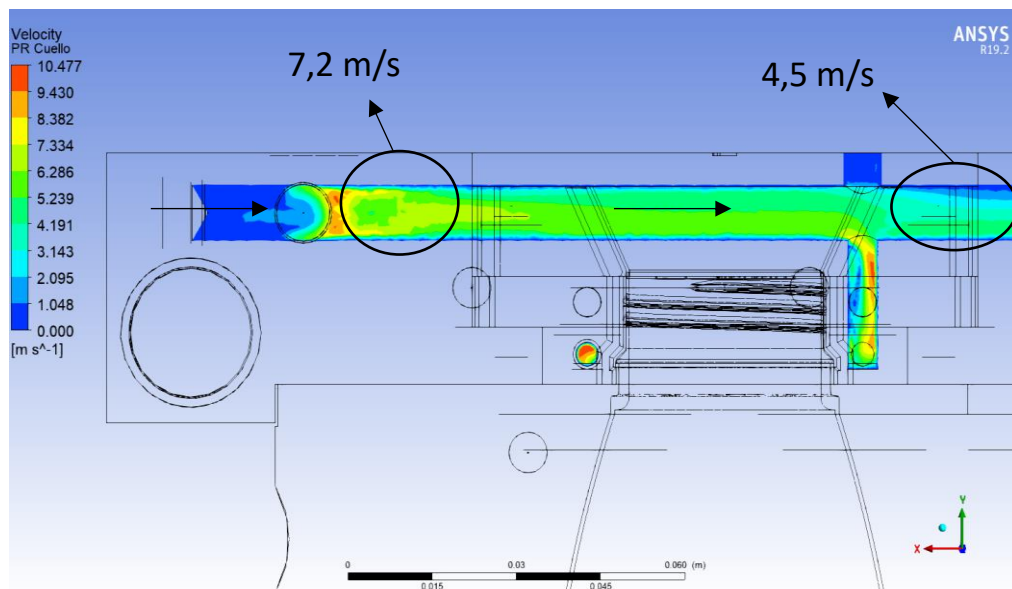
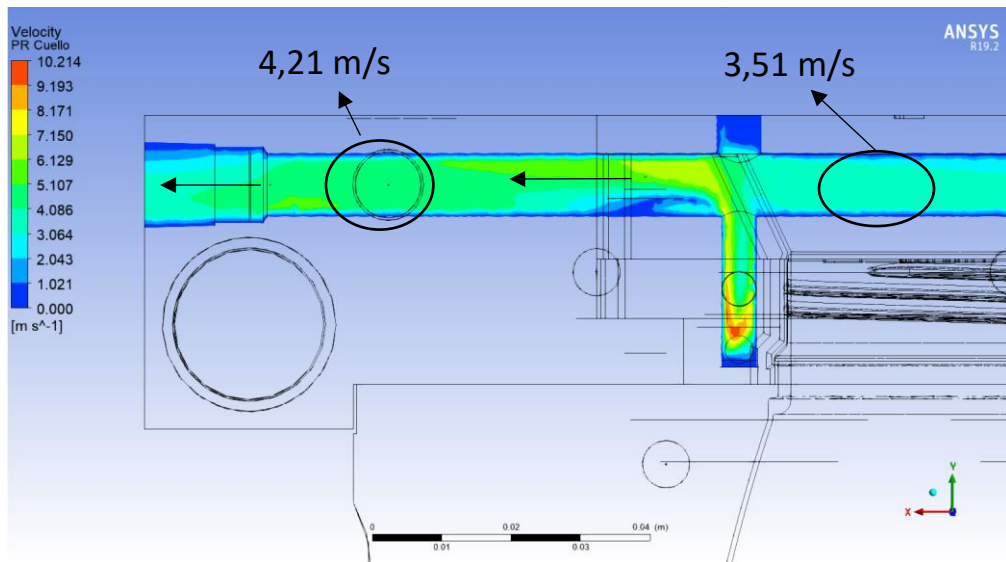


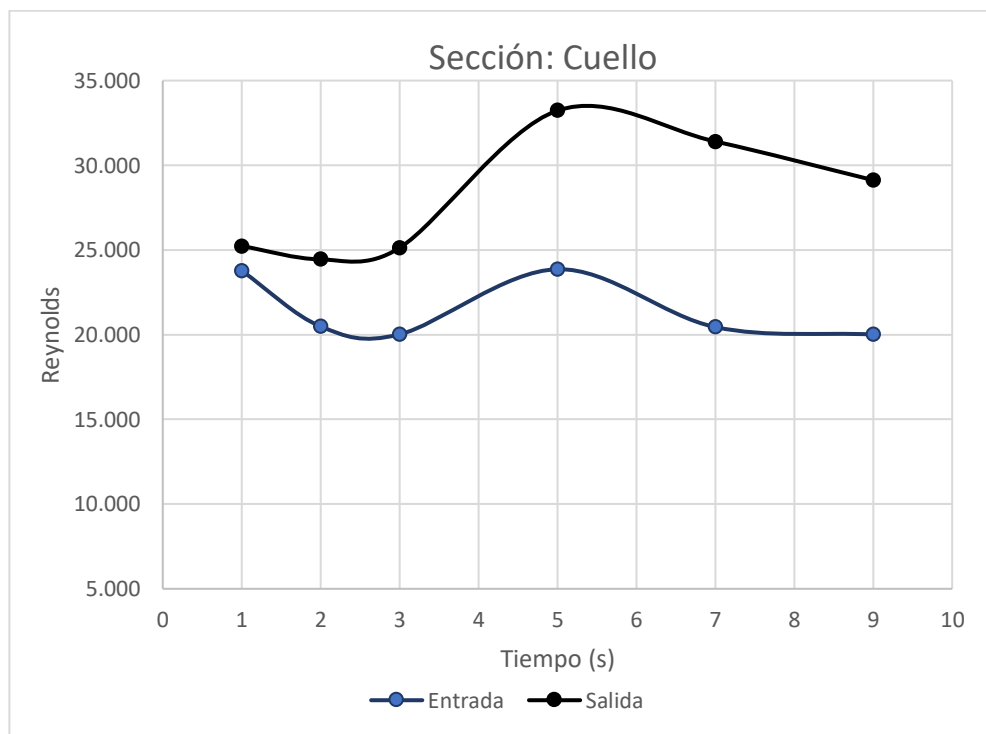
Figura 3.1. Entrada del refrigerante del cuello. (Elaboración Propia)

En cuanto a la salida del fluido, el caudal fue reducido a medida que avanzaba en el circuito por la geometría del circuito y las caídas de presiones en el ducto. No obstante, el flujo se mantiene en estado turbulento, en el caso de la primera cavidad, el fluido tiene una velocidad aproximada de 4,21 m/s, en la segunda cavidad 3,51 m/s y en la última cavidad 2,21 m/s.



**Figura 3.2. Salida del refrigerante del cuello. (Elaboración Propia)**

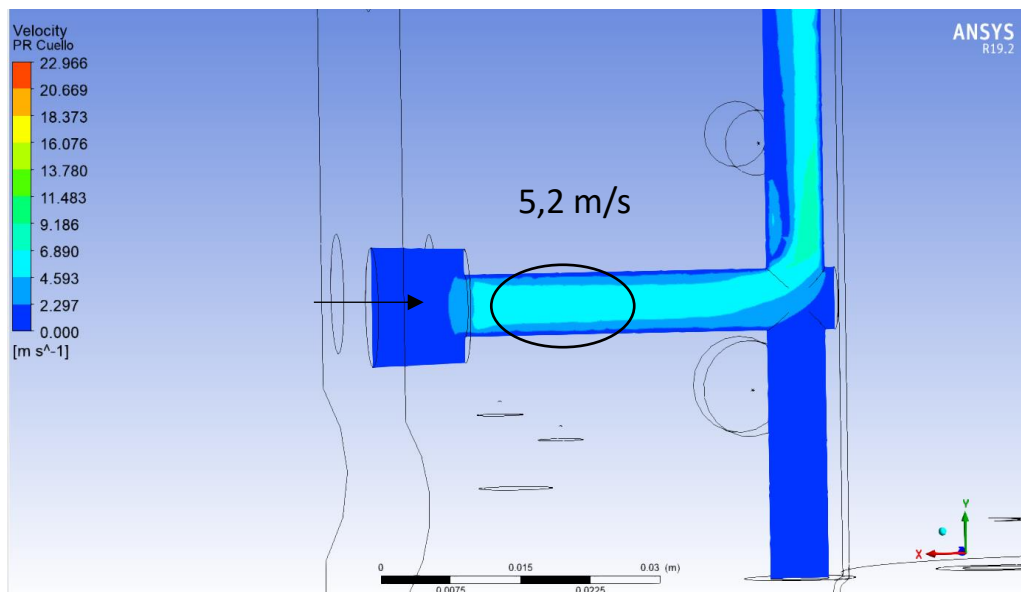
Como el flujo es transitorio, la velocidad varía con el tiempo, por ende, el número de Reynolds cambia. Esto se debe por la caída de presión y la absorción de calor por parte de las partículas de agua.



**Gráfico 3.1. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del cuello durante el enfriamiento. (Elaboración propia)**

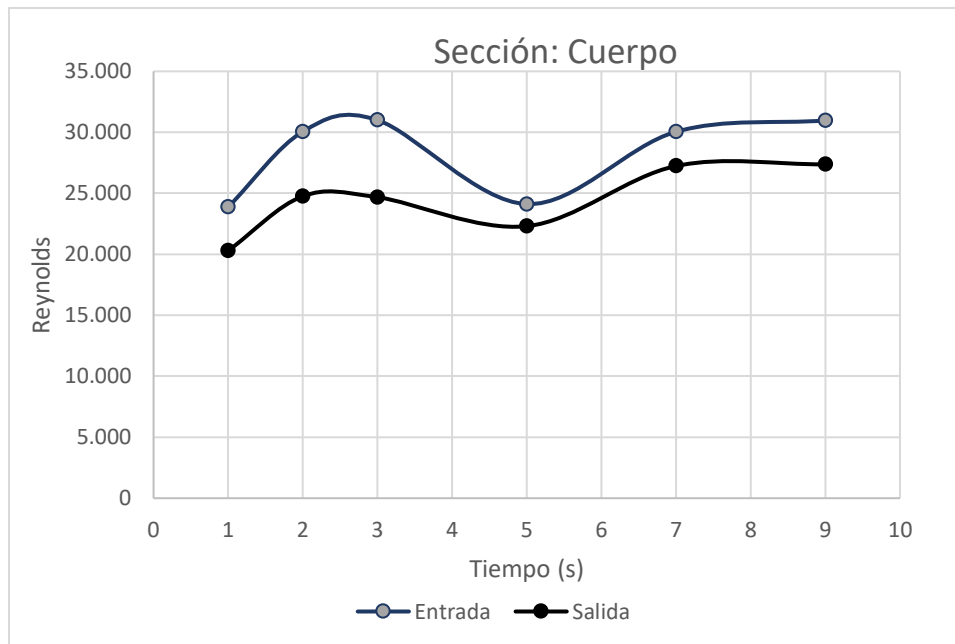
### 3.1.2 Sección: Cuerpo

En la sección del cuerpo, la velocidad del agua en la entrada del circuito fue aproximadamente de 5,2 m/s a los 9 segundos de enfriamiento. Esto indica que el flujo se comporta como turbulento, en la siguiente figura, es posible distinguir la capa limite en la superficie del canal de refrigeración. Esto comprueba la existencia de la capa limite por la condición de no deslizamiento sobre dichas superficies. En este caso, la capa limite térmica se desarrolla mucho más rápido que la capa límite de velocidad. Este efecto fue esencial para la transmisión de calor por convección del fluido.



**Figura 3.3. Entrada del refrigerante del cuerpo. (Elaboración Propia)**

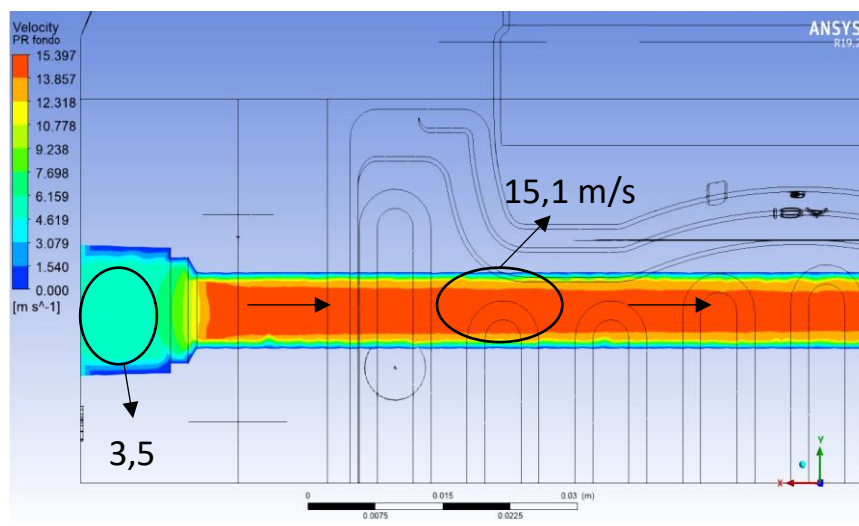
A continuación, el número de Reynold tanto a la entrada como la salida del fluido.



**Gráfico 3.2. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del cuerpo durante el enfriamiento. (Elaboración propia)**

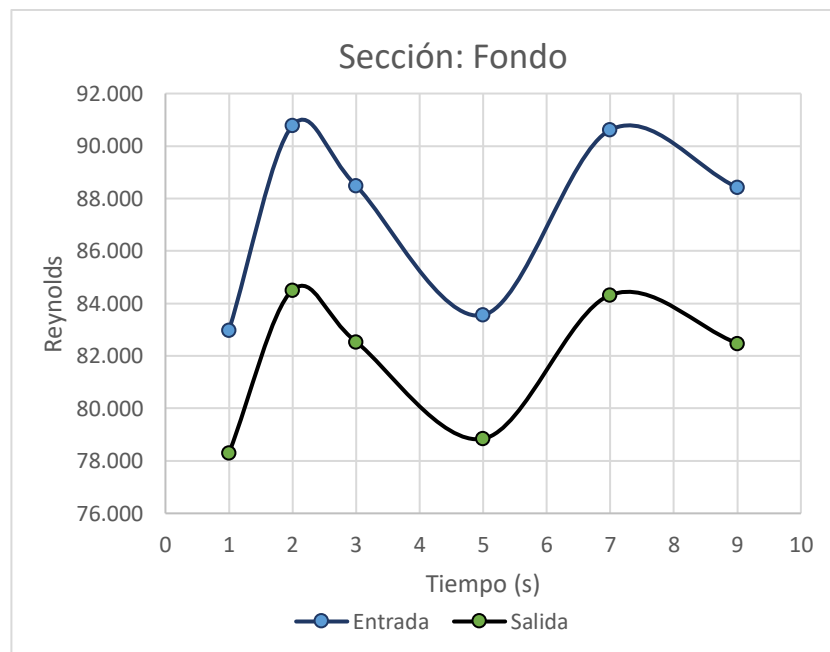
### 3.1.3 Sección: Fondo

En la sección del fondo, fue más notorio un incremento de velocidad a 15,1 m/s con respecto a los otros circuitos. Una de las razones para explicar este comportamiento es contribuido a la geometría del circuito, la geometría es simple, es decir, no tiene curvas o cambios de geometrías bruscos lo que implica que el fluido sea continuo durante el largo trayecto.



**Figura 3.4. Entrada del refrigerante del fondo. (Elaboración Propia)**

El incremento de velocidad a 15 m/s significo un incremento en el número de Reynolds. A pesar de que el flujo es turbulento se debe cuidar que no incremente exageradamente el valor del Reynolds dado que las fuerzas inerciales son superiores a las fuerzas viscosas puede crear fisuras o microgrietas con el tiempo hasta crear una fuga de agua en el molde y dañar catastróficamente a la pieza plástica.

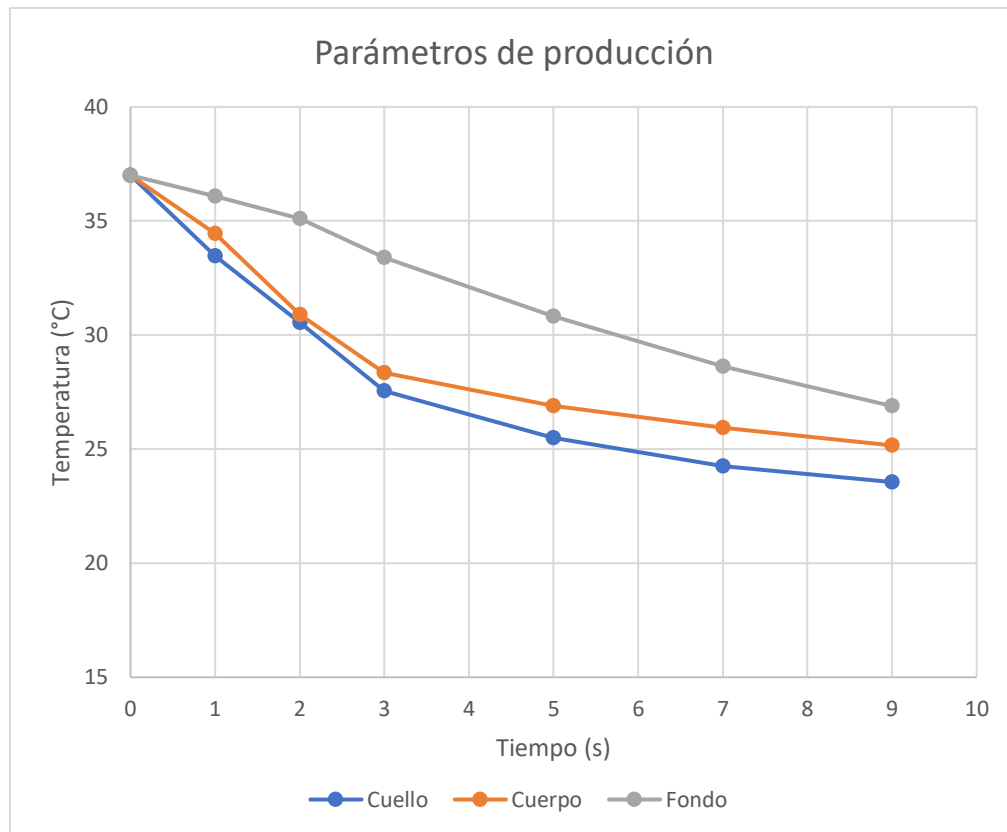


**Gráfico 3.3. Reynolds del fluido en el circuito de refrigeración del fondo durante el enfriamiento. (Elaboración propia)**

## 3.2 Comportamiento térmico del sistema

### 3.2.1 Perfil de temperatura del molde

El modelo matemático de la simulación emplea una ecuación de energía durante el enfriamiento de la pieza. Esto permite crear un perfil de temperatura tanto en de la pieza como del molde. Sin embargo, el objetivo planteado espera presentar el perfil de temperatura de la superficie de las cavidades del molde, específicamente en las cavidades puesto que es la sección en que entra en contacto con el plástico. Este choque térmico entre el plástico y el molde provoca una transferencia de calor transitorio.



**Gráfico 3.4. Perfil de temperatura de la superficie de las cavidades del molde.  
(Elaboración propia).**

Es posible notar la diferencia de temperaturas entre las distintas secciones. Las razones de este comportamiento se deben al material de cada sección, la longitud del canal y la velocidad del fluido. Dado que, la geometría del canal de refrigeración del fondo es simple con respecto a los otros canales implica una menor longitud además que el fluido fluya por el conducto sin cambiar bruscamente su dirección a una velocidad más elevada que en las otras secciones, esto beneficia a la conducción del calor. Desde el punto de vista del material, el duraluminio tiene una conductividad térmica mayor que el acero M303, esto ayuda a que la transferencia de calor aumente en el cuerpo del molde, esto explica porque el perfil de temperatura es muy similar al del cuello a pesar de la diferencia de longitudes. En base al trabajo de Karmal M., fue posible comparar el perfil de temperatura. Esta variabilidad de datos entre el perfil de temperatura de Karmal M y el perfil de este trabajo es debido a que esta medición solo fue efectuada en la superficie de la cavidad, en el caso del modelo de Karmal M fue en todo el molde sin limitarse a una superficie específica.

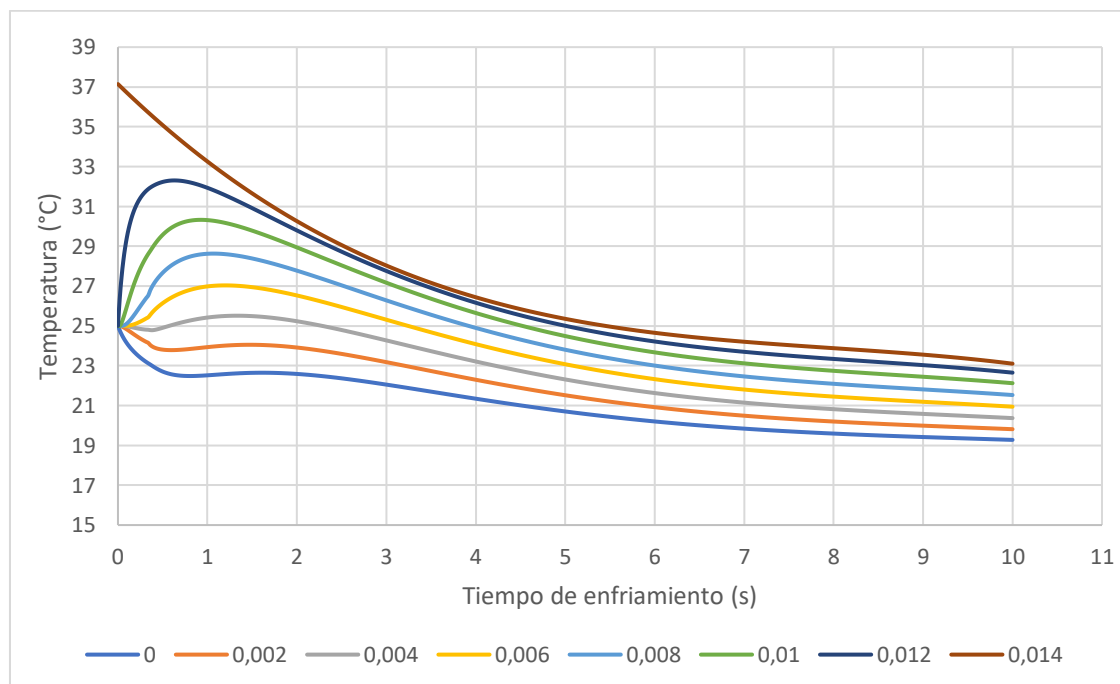
**Tabla 3.1. Temperatura de salida del agua de los diferentes circuitos. (Elaboración propia)**

| Temperatura de salida | Parámetro  |
|-----------------------|------------|
|                       | Producción |
| Cuello (°C)           | 18,63      |
| Cuerpo (°C)           | 28,593     |
| Fondo (°C)            | 17,719     |

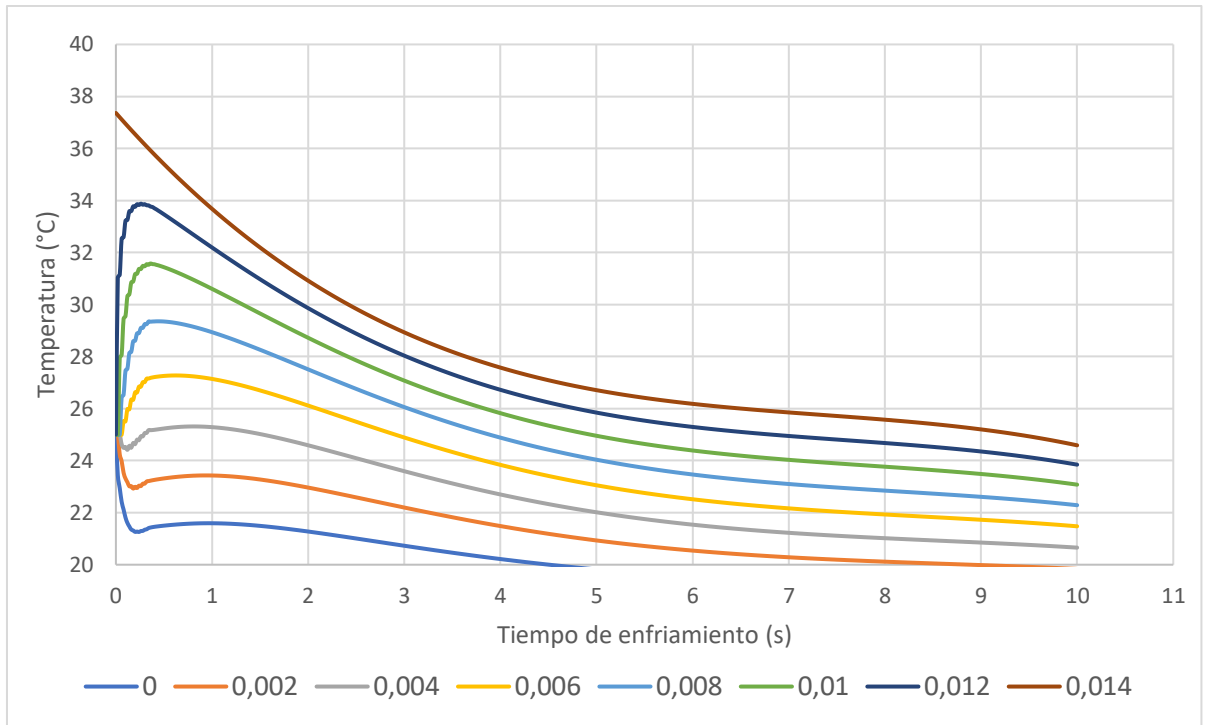
Esto justifica que la propuesta de las variables de proceso para el refrigerante realmente aumente ligeramente la temperatura de las cavidades para evitar que sea menor que el punto de rocío del ambiente. No obstante, esto aumenta la disipación térmica del molde lo que implica un aumento de precio en energía para la empresa.

### 3.2.2 Transferencia de calor transitoria

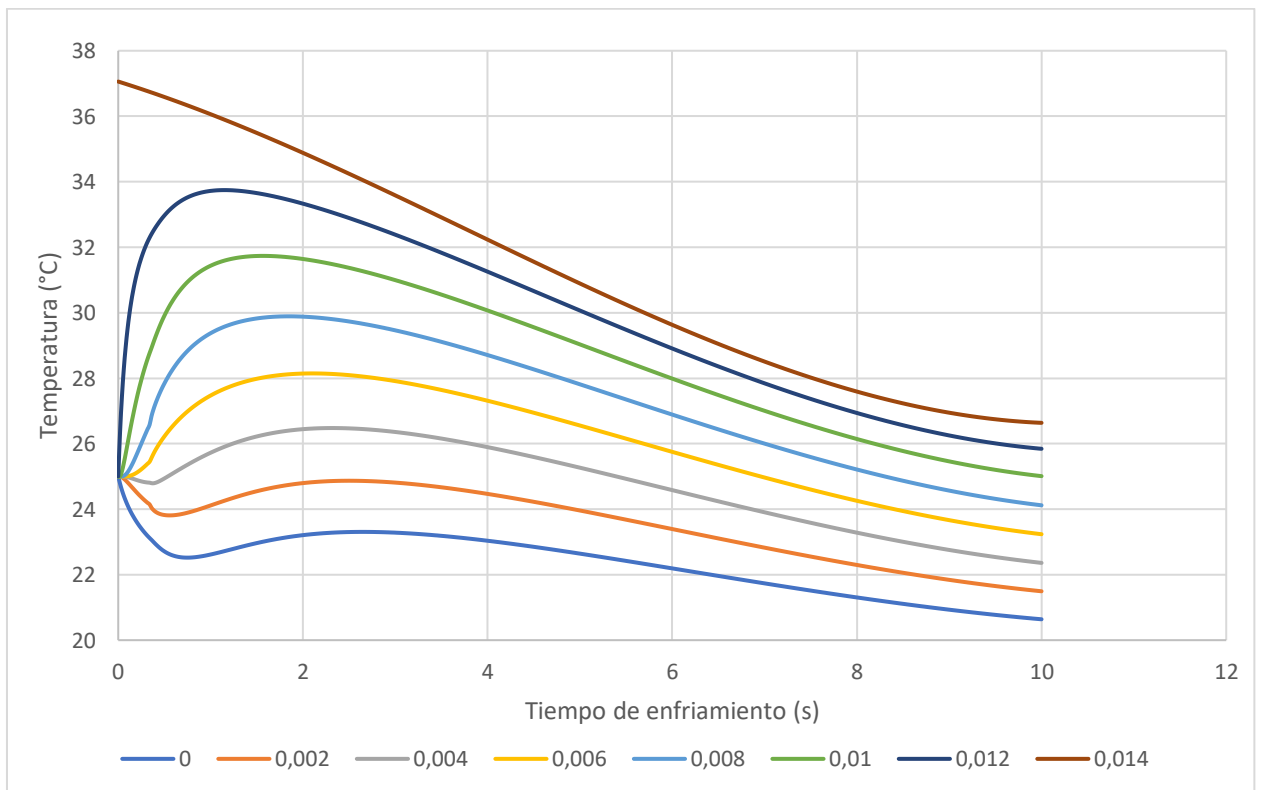
Basado en el método de diferencias finitas, los valores de temperatura a lo largo de la línea de estudio entre la superficie de la cavidad y el circuito de enfriamiento son demostrados por las siguientes gráficas:



**Gráfico 3.5. Perfil de temperatura del cuello del molde durante el enfriamiento. (Elaboración propia)**



**Gráfico 3.6. Perfil de temperatura del cuerpo del molde durante el enfriamiento.**  
(Elaboración propia)

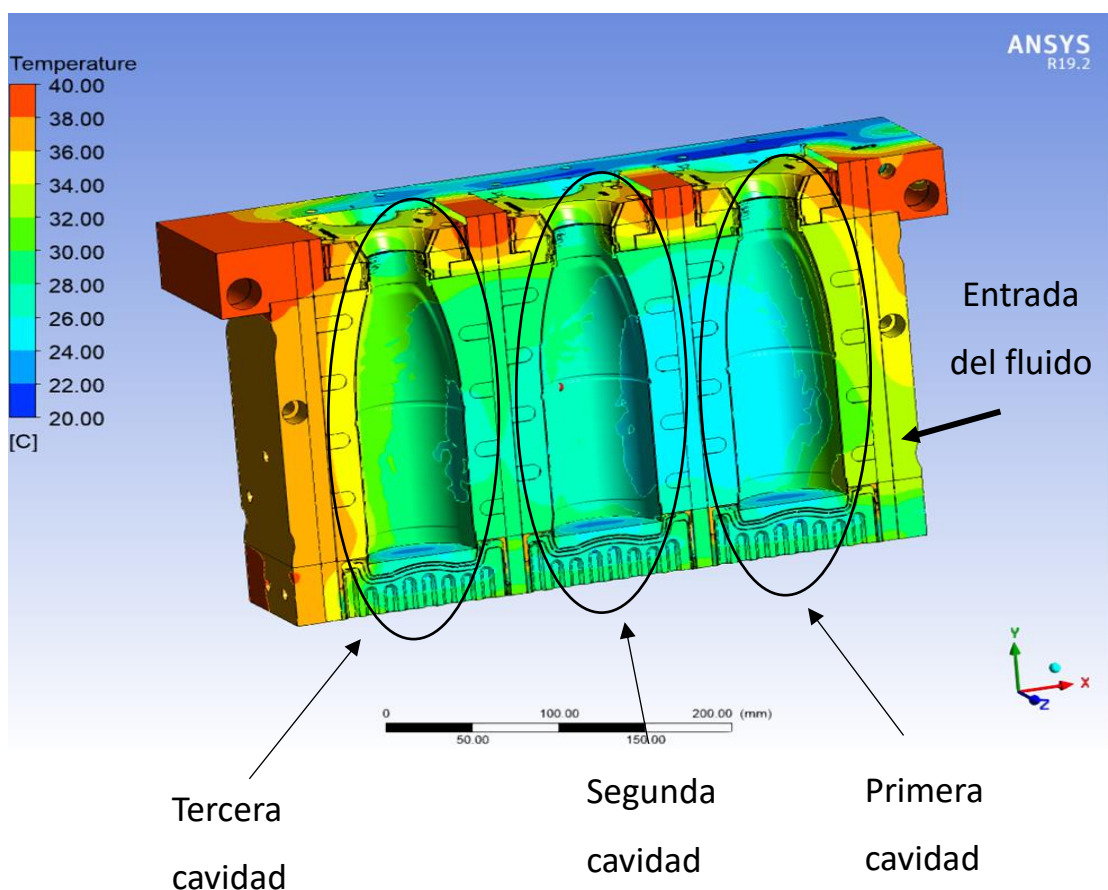


**Gráfico 3.7. Perfil de temperatura del fondo del molde durante el enfriamiento.**  
(Elaboración propia)



### 3.3 Condensación

Para la condensación, el punto de rocío es la temperatura clave para definir si existe riesgos de condensación sobre una superficie. La superficie de interés durante el proceso de extrusión soplado es en la superficie de las cavidades puesto que en dicha sección el polímero entra en contacto con el molde. Si existe una pequeña lámina de agua en forma de película o gotas por la condensación del vapor de agua del ambiente provocará los siguientes problemas: defectos en la pieza plástica, retrasos en producción, largos tiempos de enfriamiento, entre otros.



**Figura 3.5. Temperatura superficial del molde a los 9 segundos de enfriamiento.  
(Elaboración Propia)**

En base a la figura anterior, la primera cavidad del molde sufre una caída de temperatura importante con respecto a la última cavidad, esto fue atribuido porque la entrada del canal del refrigerante está muy próxima a la primera cavidad, por lo

que, el refrigerante está a una temperatura cercana a la de entrada del circuito. La superficie de la primera, segunda y tercera cavidad del molde tuvieron una temperatura promedio aproximada de: 24°C, 29°C y 32°C, respectivamente. Y dada las condiciones ambientales de la planta de producción, el punto de rocío es aproximadamente 23,98°C. Esta comparación de temperatura permite definir que no hay condensación. Sin embargo, en la siguiente tabla se presenta el cambio de temperaturas con respecto al tiempo. En los anexos fue presentado en una tabla las temperaturas por cada cavidad.

**Tabla 3.2. Comparación entre las temperaturas promedio de las cavidades del molde y el punto de rocío. (Elaboración propia).**

| Temperatura de rocío   |        | Real        |        |       | Mejora      |        |       |
|------------------------|--------|-------------|--------|-------|-------------|--------|-------|
| 23,988 – 24,02         | °C     | Cuello      | Cuerpo | Fondo | Cuello      | Cuerpo | Fondo |
| Etapas de enfriamiento | Tiempo | Temperatura |        |       | Temperatura |        |       |
|                        | 0      | 25,00       | 25,00  | 25,00 | 25,00       | 25,00  | 25,00 |
|                        | 2      | 31,23       | 31,09  | 33,45 | 33,46       | 34,45  | 36,09 |
|                        | 3      | 31,33       | 30,89  | 33,34 | 30,54       | 30,88  | 35,10 |
|                        | 5      | 28,26       | 27,77  | 31,61 | 27,56       | 28,35  | 33,40 |
|                        | 7      | 25,58       | 25,79  | 28,66 | 25,48       | 26,90  | 30,81 |
|                        | 9      | 23,92       | 24,68  | 26,73 | 24,26       | 25,93  | 28,61 |

Por la tabla anterior, la temperatura del cuello a los 9 segundos de enfriamiento fue 23,56°C inferior a la temperatura de rocío, por lo que existe el riesgo que la condensación se presente en dicha superficie. En el caso de los resultados de los parámetros de mejora, todas las secciones tuvieron mejoras notables en la temperatura superficial, lo que implica que en el mismo intervalo de tiempo fue posible optimizar el proceso.

### 3.4 Análisis de costo

El análisis de costo de la solución fue planteado en base a los resultados de disipación térmica del molde tanto para los parámetros reales como los parámetros de mejora. De esta manera, fue posible conocer el consumo energético, costo del ciclo de producción por hora y costo por día. Dado que la empresa de plástico tiene

8 equipos de extrusión soplado de polímeros fue posible conocer el costo a gran escala por un día de producción.

**Tabla 3.3. Criterios valorizados sobre la solución. (Elaboración propia)**

|                                                 | <b>Parámetros reales</b> | <b>Parámetros de mejora</b> |
|-------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| <b>Consumo energético (KWh)</b>                 | 40,215                   | 38,12                       |
| <b>Costo del ciclo de producción por hora</b>   | \$ 3,45                  | \$ 3,27                     |
| <b>Costo por día</b>                            | \$ 83,00                 | \$ 78,67                    |
| <b>Costo por 8 equipos de extrusión soplado</b> | \$ 664                   | \$ 629,39                   |

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Este trabajo que ha sido desarrollado empleando varias herramientas de ingeniería, desde los modelos teóricos hasta modelos computacionales.
- La simulación permitió evidenciar los fenómenos físicos que ocurren en la etapa de enfriamiento de un molde de extrusión soplado para resolver el problema de condensación en la superficie de los moldes.
- El comportamiento del fluido fue turbulento en todas las secciones. Las validaciones computacionales bajo los parámetros de producción permitieron concluir que la interacción de los 6 cuerpos del sistema (cuello, cuerpo. Fondo, circuitos de refrigeración del cuello, cuerpo y fondo) es eficiente para que el envase sea producido a gran escala, pero no fue la forma ideal.
- Desde el punto de vista de la disipación térmica, tuvo como principal forma de transferencia a la conducción a pesar de que la ecuación gobernante de calor tomo en cuenta la convección del refrigerante.
- La disipación térmica del molde fue calculada por secciones debido a diversos factores mediante el método de diferencias finitas. Esto demostró que la sección del cuerpo tuvo una disipación de calor más alta que las otras secciones. Numéricamente, el cuello, cuerpo y fondo disipan 1,92, 17,49 y 5,95 Watts, respectivamente.
- La condición de temperatura de rocío es de 23,9°C, a esta temperatura a las condiciones de Guayaquil existe un problema de condensación en la sección del cuello de la botella.
- Para resolver las condensación se escogió el cambio de presión del refrigerante dado que un cambio en estos parámetros tiene un efecto cadena en todo el proceso, es decir, el aumento de presión provoca que el caudal y la disipación térmica disminuya para que el molde logre enfriarse de forma más lenta en el mismo tiempo de enfriamiento y la temperatura superficial de las secciones del molde no sea menor a la temperatura de rocío de la planta de producción evitando la condensación y problemas en la calidad del envase.

- El modelo propuesto de transferencia de calor puede ser utilizado para futuros trabajos que impliquen el diseño y optimización de procesos de extrusión soplado.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Es recomendable que el análisis sea llevado a cabo en forma bidimensional y tridimensional dado que estimaría un valor de disipación térmica más real que serviría para procesos que requieren mayor exactitud.
- Si bien es cierto, el método de diferencias finitas es una forma sencilla de resolver la ecuación de calor, es recomendable implementar y comparar otros métodos con mayor precisión de los resultados.
- Adicionalmente, estudiar varios puntos de la superficie de la cavidad del molde cercanos y lejanos al circuito de enfriamiento. Finalmente, para futuros estudios puede ser interesante cambiar las configuraciones de las variables de procesos en la simulación.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. O. Wilson, R. Bryan, R. Pablo, P. I. Monserrate, and S. J. Elizabeth, “Analysis of heat transfer between a coolant fluid and a plastic blowing matrix using the ANSYS CFD tool,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 746, pp. 280–288. doi: 10.1007/978-3-319-77712-2\_27.
- [2] C. L. Xiao and H. X. Huang, “Optimal design of heating system in rapid thermal cycling blow mold by a two-step method based on sequential quadratic programming,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 96, pp. 114–121, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.06.006.
- [3] S. L. Belcher, “Blow Molding of Polymers,” in *Practical extrusion blow molding*, 1st Edition., Sabel Plastechs, 1999, pp. 489–513.
- [4] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*, 1ra ed.
- [5] I. Martín, R. Salcedo, and R. Font, “Mecánica de fluidos: Tema 1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles,” 2014.
- [6] A. Chapman, *Transmisión del calor*, 3°. 1984.
- [7] Y. Cengel and A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa.- Fundamentos y aplicaciones*, Cuarta. 2011.
- [8] M. F. Edwards, P. K. Suvanaphen, and W. L. Wilkinson, “Heat Transfer in Blow Molding Operations.”
- [9] U. Departamento de Física, “Psicometría,” *Termodinamica*, Argentina, 2018.
- [10] W. Egle, “Evitación de agua condensada en moldes de inyección y de soplado,” *Plásticos Universales*, Austria, pp. 75–77, 1986. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1273>.
- [11] S. Romero, “Métodos de Diferencias Finitas: Ecuación de calor,” 2020.
- [12] M. Babanezhad, I. Behroyan, A. Taghvaie Nakhjiri, M. Rezakazemi, A. Marjani, and S. Shirazian, “Prediction of turbulence eddy dissipation of water flow in a heated metal foam tube,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76260-6.
- [13] I. ANSYS, *ANSYS CFX-Solver Theory*. Canonsburg, PA, 2011.

- [14] J. Peiró and S. Sherwin, "Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations," 2005, pp. 2415–2446. doi: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3286-8\\_127](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3286-8_127).
- [15] M. E. Ryan and A. Dutta, "Mathematical Modeling of the Blow-Molding Process."
- [16] F. Kreith, R. Manglik, and M. Bohn, *Principios de transferencia de calor*, Séptima edición. Santa Cruz, 2012.
- [17] Böhler, "Aceros para moldes de plástico - Aceros para tratamiento térmico resistentes a la corrosión: M303," Mariazeller Straße 25, 2022. [Online]. Available: [www.acerosbohler.com](http://www.acerosbohler.com)
- [18] ASTECO, "Duraluminio 7075".
- [19] M. R. Kamal and G. L. Bata, "Current trends in the analysis of polymer shaping operations," in *Polymer Processing and Properties*, Springer Science & Business Media, Ed. 2012.

# **APÉNDICES**



## APÉNDICE A.- Método de diferencias finitas

**Tabla A.1. Iteraciones del método de diferencias finitas para la ecuación de calor para el cuello.**

|      |    |       |       |       |       |       |       |       |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 0  | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,01  | 0,012 | 0,014 |
| 0    | 17 | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 37,37 |
| 0,2  | 17 | 21,63 | 24,99 | 24,99 | 24,99 | 24,99 | 30,19 | 36,55 |
| 0,40 | 17 | 21,09 | 23,56 | 24,97 | 24,97 | 27,16 | 30,66 | 35,77 |
| 0,6  | 17 | 20,41 | 23,10 | 24,36 | 25,88 | 27,70 | 31,33 | 35,04 |
| 0,80 | 17 | 20,11 | 22,49 | 24,46 | 25,99 | 28,44 | 31,35 | 34,34 |
| 1    | 17 | 19,80 | 22,30 | 24,26 | 26,36 | 28,62 | 31,37 | 33,68 |
| 1,20 | 17 | 19,67 | 22,06 | 24,31 | 26,41 | 28,81 | 31,17 | 33,06 |
| 1,4  | 17 | 19,55 | 21,99 | 24,23 | 26,52 | 28,78 | 30,96 | 32,47 |
| 1,60 | 17 | 19,50 | 21,89 | 24,24 | 26,49 | 28,73 | 30,67 | 31,92 |
| 1,8  | 17 | 19,46 | 21,86 | 24,19 | 26,47 | 28,59 | 30,37 | 31,40 |
| 2,00 | 17 | 19,43 | 21,81 | 24,15 | 26,39 | 28,43 | 30,04 | 30,92 |
| 2,2  | 17 | 19,41 | 21,78 | 24,09 | 26,29 | 28,23 | 29,72 | 30,46 |
| 2,40 | 17 | 19,39 | 21,74 | 24,03 | 26,17 | 28,03 | 29,39 | 30,04 |
| 2,6  | 17 | 19,38 | 21,70 | 23,95 | 26,04 | 27,81 | 29,08 | 29,64 |
| 2,80 | 17 | 19,36 | 21,66 | 23,87 | 25,89 | 27,58 | 28,77 | 29,27 |
| 3    | 17 | 19,33 | 21,61 | 23,77 | 25,74 | 27,35 | 28,47 | 28,93 |
| 3,20 | 17 | 19,31 | 21,55 | 23,67 | 25,58 | 27,13 | 28,18 | 28,62 |
| 3,4  | 17 | 19,28 | 21,49 | 23,57 | 25,41 | 26,90 | 27,91 | 28,32 |
| 3,60 | 17 | 19,25 | 21,42 | 23,45 | 25,25 | 26,68 | 27,65 | 28,05 |
| 3,8  | 17 | 19,22 | 21,35 | 23,34 | 25,08 | 26,47 | 27,40 | 27,80 |
| 4,00 | 17 | 19,18 | 21,27 | 23,22 | 24,92 | 26,26 | 27,16 | 27,58 |
| 4,2  | 17 | 19,14 | 21,20 | 23,10 | 24,76 | 26,06 | 26,94 | 27,37 |
| 4,40 | 17 | 19,11 | 21,12 | 22,98 | 24,59 | 25,87 | 26,74 | 27,18 |
| 4,6  | 17 | 19,07 | 21,04 | 22,86 | 24,44 | 25,68 | 26,54 | 27,01 |
| 4,80 | 17 | 19,01 | 20,96 | 22,74 | 24,29 | 25,51 | 26,36 | 26,85 |
| 5    | 17 | 18,97 | 20,88 | 22,63 | 24,14 | 25,34 | 26,19 | 26,71 |
| 5,20 | 17 | 18,93 | 20,80 | 22,51 | 23,99 | 25,18 | 26,04 | 26,58 |
| 5,4  | 17 | 18,89 | 20,72 | 22,40 | 23,85 | 25,03 | 25,89 | 26,47 |
| 5,60 | 17 | 18,85 | 20,64 | 22,29 | 23,72 | 24,88 | 25,76 | 26,36 |
| 5,8  | 17 | 18,81 | 20,57 | 22,18 | 23,59 | 24,75 | 25,63 | 26,27 |
| 6,00 | 17 | 18,77 | 20,49 | 22,08 | 23,47 | 24,62 | 25,51 | 26,18 |
| 6,2  | 17 | 18,74 | 20,42 | 21,98 | 23,36 | 24,50 | 25,40 | 26,11 |
| 6,40 | 17 | 18,70 | 20,36 | 21,89 | 23,25 | 24,38 | 25,30 | 26,04 |
| 6,6  | 17 | 18,67 | 20,29 | 21,80 | 23,14 | 24,28 | 25,21 | 25,97 |

|      |    |       |       |       |       |       |       |       |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6,80 | 17 | 18,63 | 20,23 | 21,72 | 23,04 | 24,18 | 25,12 | 25,91 |
| 7    | 17 | 18,60 | 20,17 | 21,63 | 22,95 | 24,08 | 25,04 | 25,85 |
| 7,20 | 17 | 18,57 | 20,11 | 21,56 | 22,86 | 23,99 | 24,97 | 25,80 |
| 7,4  | 17 | 18,54 | 20,06 | 21,48 | 22,77 | 23,91 | 24,89 | 25,74 |
| 7,60 | 17 | 18,52 | 20,01 | 21,41 | 22,69 | 23,83 | 24,82 | 25,69 |
| 7,8  | 17 | 18,49 | 19,96 | 21,35 | 22,62 | 23,76 | 24,76 | 25,63 |
| 8,00 | 17 | 18,47 | 19,91 | 21,28 | 22,55 | 23,68 | 24,69 | 25,57 |
| 8,2  | 17 | 18,44 | 19,87 | 21,22 | 22,48 | 23,61 | 24,62 | 25,51 |
| 8,40 | 17 | 18,42 | 19,82 | 21,17 | 22,41 | 23,55 | 24,56 | 25,44 |
| 8,6  | 17 | 18,40 | 19,78 | 21,11 | 22,35 | 23,48 | 24,49 | 25,37 |
| 8,80 | 17 | 18,38 | 19,75 | 21,06 | 22,29 | 23,42 | 24,42 | 25,29 |
| 9    | 17 | 18,36 | 19,71 | 21,01 | 22,23 | 23,35 | 24,35 | 25,20 |

**Tabla A.2. Iteraciones del método de diferencias finitas para la ecuación de calor para el cuerpo.**

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,02 | 23,44 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 37,28 |
| 0,04 | 22,94 | 24,24 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 30,99 | 37,20 |
| 0,06 | 22,42 | 23,98 | 24,63 | 25,00 | 25,00 | 27,92 | 31,10 | 37,12 |
| 0,08 | 22,12 | 23,53 | 24,49 | 24,82 | 26,42 | 28,05 | 32,48 | 37,03 |
| 0,1  | 21,81 | 23,31 | 24,18 | 25,44 | 26,43 | 29,42 | 32,54 | 36,95 |
| 0,12 | 21,61 | 23,01 | 24,37 | 25,31 | 27,40 | 29,48 | 33,17 | 36,87 |
| 0,14 | 21,39 | 22,99 | 24,16 | 25,87 | 27,40 | 30,27 | 33,18 | 36,79 |
| 0,16 | 21,31 | 22,78 | 24,43 | 25,78 | 28,05 | 30,29 | 33,52 | 36,71 |
| 0,18 | 21,19 | 22,87 | 24,29 | 26,23 | 28,04 | 30,77 | 33,50 | 36,63 |
| 0,2  | 21,19 | 22,74 | 24,54 | 26,16 | 28,49 | 30,77 | 33,70 | 36,55 |
| 0,22 | 21,13 | 22,86 | 24,45 | 26,51 | 28,47 | 31,08 | 33,66 | 36,47 |
| 0,24 | 21,17 | 22,79 | 24,68 | 26,46 | 28,79 | 31,06 | 33,77 | 36,39 |
| 0,26 | 21,15 | 22,92 | 24,63 | 26,73 | 28,76 | 31,27 | 33,73 | 36,31 |
| 0,28 | 21,20 | 22,89 | 24,82 | 26,70 | 28,99 | 31,25 | 33,79 | 36,23 |
| 0,3  | 21,21 | 23,01 | 24,79 | 26,90 | 28,97 | 31,39 | 33,74 | 36,15 |
| 0,32 | 21,26 | 23,00 | 24,95 | 26,88 | 29,14 | 31,36 | 33,77 | 36,08 |
| 0,34 | 21,28 | 23,10 | 24,94 | 27,04 | 29,12 | 31,45 | 33,72 | 36,00 |
| 0,36 | 21,33 | 23,10 | 24,97 | 27,03 | 29,15 | 31,42 | 33,73 | 35,92 |
| 0,38 | 21,35 | 23,11 | 25,00 | 27,04 | 29,17 | 31,44 | 33,67 | 35,85 |
| 0,4  | 21,36 | 23,12 | 25,01 | 27,05 | 29,18 | 31,42 | 33,64 | 35,77 |
| 0,42 | 21,37 | 23,14 | 25,03 | 27,06 | 29,19 | 31,41 | 33,60 | 35,70 |
| 0,44 | 21,38 | 23,15 | 25,04 | 27,07 | 29,20 | 31,40 | 33,56 | 35,62 |
| 0,46 | 21,39 | 23,16 | 25,06 | 27,08 | 29,20 | 31,38 | 33,51 | 35,55 |
| 0,48 | 21,40 | 23,18 | 25,07 | 27,09 | 29,21 | 31,36 | 33,46 | 35,47 |
| 0,5  | 21,41 | 23,19 | 25,08 | 27,10 | 29,21 | 31,34 | 33,42 | 35,40 |

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,52 | 21,42 | 23,20 | 25,10 | 27,11 | 29,20 | 31,31 | 33,37 | 35,33 |
| 0,54 | 21,42 | 23,21 | 25,11 | 27,11 | 29,20 | 31,29 | 33,32 | 35,25 |
| 0,56 | 21,43 | 23,22 | 25,12 | 27,12 | 29,20 | 31,26 | 33,27 | 35,18 |
| 0,58 | 21,44 | 23,23 | 25,13 | 27,13 | 29,19 | 31,23 | 33,22 | 35,11 |
| 0,6  | 21,45 | 23,24 | 25,14 | 27,13 | 29,18 | 31,21 | 33,17 | 35,04 |
| 0,62 | 21,46 | 23,25 | 25,15 | 27,14 | 29,17 | 31,18 | 33,12 | 34,96 |
| 0,64 | 21,46 | 23,26 | 25,16 | 27,14 | 29,16 | 31,15 | 33,07 | 34,89 |
| 0,66 | 21,47 | 23,27 | 25,16 | 27,14 | 29,15 | 31,12 | 33,02 | 34,82 |
| 0,68 | 21,48 | 23,28 | 25,17 | 27,14 | 29,14 | 31,09 | 32,97 | 34,75 |
| 0,7  | 21,48 | 23,29 | 25,18 | 27,14 | 29,13 | 31,06 | 32,92 | 34,68 |
| 0,72 | 21,49 | 23,29 | 25,18 | 27,14 | 29,11 | 31,03 | 32,87 | 34,61 |
| 0,74 | 21,49 | 23,30 | 25,19 | 27,14 | 29,10 | 30,99 | 32,82 | 34,54 |
| 0,76 | 21,50 | 23,31 | 25,19 | 27,13 | 29,09 | 30,96 | 32,77 | 34,48 |
| 0,78 | 21,50 | 23,31 | 25,20 | 27,13 | 29,07 | 30,93 | 32,72 | 34,41 |
| 0,8  | 21,51 | 23,32 | 25,20 | 27,13 | 29,05 | 30,90 | 32,67 | 34,34 |
| 0,82 | 21,51 | 23,32 | 25,20 | 27,12 | 29,04 | 30,86 | 32,62 | 34,27 |
| 0,84 | 21,52 | 23,33 | 25,20 | 27,12 | 29,02 | 30,83 | 32,57 | 34,20 |
| 0,86 | 21,52 | 23,33 | 25,20 | 27,11 | 29,00 | 30,79 | 32,52 | 34,14 |
| 0,88 | 21,52 | 23,34 | 25,20 | 27,10 | 28,98 | 30,76 | 32,47 | 34,07 |
| 0,9  | 21,52 | 23,34 | 25,20 | 27,09 | 28,96 | 30,72 | 32,42 | 34,01 |
| 0,92 | 21,53 | 23,34 | 25,20 | 27,09 | 28,94 | 30,69 | 32,37 | 33,94 |
| 0,94 | 21,53 | 23,34 | 25,20 | 27,08 | 28,92 | 30,65 | 32,32 | 33,87 |

**Tabla A.3. Iteraciones del método de diferencias finitas para la ecuación de calor para el fondo.**

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0    | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    | 37,06 |
| 0,02 | 24,77 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 26,37 | 37,04 |
| 0,04 | 24,58 | 24,97 | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,16 | 27,43 | 37,02 |
| 0,06 | 24,41 | 24,93 | 25,00 | 25,00 | 25,02 | 25,40 | 28,27 | 37,01 |
| 0,08 | 24,26 | 24,88 | 24,99 | 25,00 | 25,06 | 25,68 | 28,94 | 36,99 |
| 0,1  | 24,13 | 24,82 | 24,98 | 25,01 | 25,12 | 25,98 | 29,48 | 36,97 |
| 0,12 | 24,01 | 24,76 | 24,96 | 25,02 | 25,21 | 26,28 | 29,94 | 36,95 |
| 0,14 | 23,90 | 24,70 | 24,95 | 25,03 | 25,31 | 26,58 | 30,32 | 36,93 |
| 0,16 | 23,79 | 24,64 | 24,93 | 25,05 | 25,42 | 26,86 | 30,65 | 36,92 |
| 0,18 | 23,70 | 24,57 | 24,91 | 25,08 | 25,54 | 27,13 | 30,93 | 36,90 |
| 0,2  | 23,61 | 24,51 | 24,89 | 25,12 | 25,67 | 27,38 | 31,18 | 36,88 |
| 0,22 | 23,53 | 24,45 | 24,87 | 25,15 | 25,80 | 27,62 | 31,39 | 36,86 |
| 0,24 | 23,45 | 24,39 | 24,86 | 25,20 | 25,94 | 27,84 | 31,59 | 36,84 |
| 0,26 | 23,37 | 24,34 | 24,84 | 25,24 | 26,07 | 28,05 | 31,76 | 36,82 |
| 0,28 | 23,31 | 24,29 | 24,83 | 25,29 | 26,20 | 28,25 | 31,91 | 36,80 |

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,3  | 23,24 | 24,24 | 24,82 | 25,34 | 26,33 | 28,43 | 32,05 | 36,78 |
| 0,32 | 23,18 | 24,19 | 24,81 | 25,39 | 26,46 | 28,61 | 32,18 | 36,76 |
| 0,34 | 23,12 | 24,15 | 24,81 | 25,45 | 26,58 | 28,77 | 32,29 | 36,75 |
| 0,36 | 23,06 | 24,05 | 24,79 | 25,56 | 26,84 | 28,92 | 32,40 | 36,73 |
| 0,38 | 23,01 | 23,98 | 24,79 | 25,68 | 27,03 | 29,08 | 32,50 | 36,71 |
| 0,4  | 22,95 | 23,93 | 24,80 | 25,79 | 27,20 | 29,24 | 32,59 | 36,69 |
| 0,42 | 22,89 | 23,89 | 24,82 | 25,89 | 27,35 | 29,39 | 32,67 | 36,67 |
| 0,44 | 22,84 | 23,87 | 24,85 | 25,98 | 27,48 | 29,53 | 32,75 | 36,65 |
| 0,46 | 22,79 | 23,85 | 24,88 | 26,06 | 27,61 | 29,66 | 32,83 | 36,63 |
| 0,48 | 22,75 | 23,83 | 24,91 | 26,14 | 27,73 | 29,79 | 32,90 | 36,61 |
| 0,5  | 22,71 | 23,82 | 24,94 | 26,22 | 27,84 | 29,91 | 32,97 | 36,59 |
| 0,52 | 22,68 | 23,82 | 24,97 | 26,30 | 27,94 | 30,02 | 33,03 | 36,57 |
| 0,54 | 22,65 | 23,81 | 25,01 | 26,37 | 28,04 | 30,13 | 33,09 | 36,55 |
| 0,56 | 22,62 | 23,81 | 25,04 | 26,44 | 28,14 | 30,23 | 33,15 | 36,53 |
| 0,58 | 22,60 | 23,81 | 25,07 | 26,51 | 28,23 | 30,32 | 33,20 | 36,51 |
| 0,6  | 22,58 | 23,82 | 25,11 | 26,57 | 28,31 | 30,41 | 33,25 | 36,49 |
| 0,62 | 22,56 | 23,82 | 25,14 | 26,63 | 28,39 | 30,50 | 33,30 | 36,47 |
| 0,64 | 22,55 | 23,83 | 25,18 | 26,69 | 28,47 | 30,58 | 33,34 | 36,45 |
| 0,66 | 22,54 | 23,84 | 25,21 | 26,75 | 28,54 | 30,65 | 33,38 | 36,43 |
| 0,68 | 22,53 | 23,85 | 25,24 | 26,80 | 28,61 | 30,72 | 33,41 | 36,40 |
| 0,7  | 22,53 | 23,86 | 25,28 | 26,86 | 28,68 | 30,79 | 33,45 | 36,38 |
| 0,72 | 22,52 | 23,87 | 25,31 | 26,91 | 28,74 | 30,85 | 33,48 | 36,36 |
| 0,74 | 22,52 | 23,89 | 25,34 | 26,96 | 28,80 | 30,91 | 33,51 | 36,34 |
| 0,76 | 22,52 | 23,90 | 25,37 | 27,01 | 28,86 | 30,97 | 33,54 | 36,32 |
| 0,78 | 22,52 | 23,91 | 25,41 | 27,05 | 28,92 | 31,02 | 33,56 | 36,30 |
| 0,8  | 22,53 | 23,93 | 25,44 | 27,10 | 28,97 | 31,07 | 33,58 | 36,28 |
| 0,82 | 22,53 | 23,95 | 25,47 | 27,14 | 29,02 | 31,12 | 33,60 | 36,26 |
| 0,84 | 22,54 | 23,96 | 25,50 | 27,18 | 29,06 | 31,16 | 33,62 | 36,24 |
| 0,86 | 22,54 | 23,98 | 25,53 | 27,22 | 29,11 | 31,20 | 33,64 | 36,21 |
| 0,88 | 22,55 | 24,00 | 25,56 | 27,26 | 29,15 | 31,24 | 33,66 | 36,19 |
| 0,9  | 22,56 | 24,02 | 25,59 | 27,30 | 29,19 | 31,28 | 33,67 | 36,17 |
| 0,92 | 22,57 | 24,04 | 25,61 | 27,34 | 29,23 | 31,31 | 33,68 | 36,15 |

## APÉNDICE B.- Evidencias fotográficas



Figura B.1. Presión de entrada y salida del agua al sistema.



Figura B.2. Envase elaborado durante el inicio del proceso.



Figura B.3. Expulsión del parison



Figura B.4. Control de temperatura del circuito de enfriamiento.

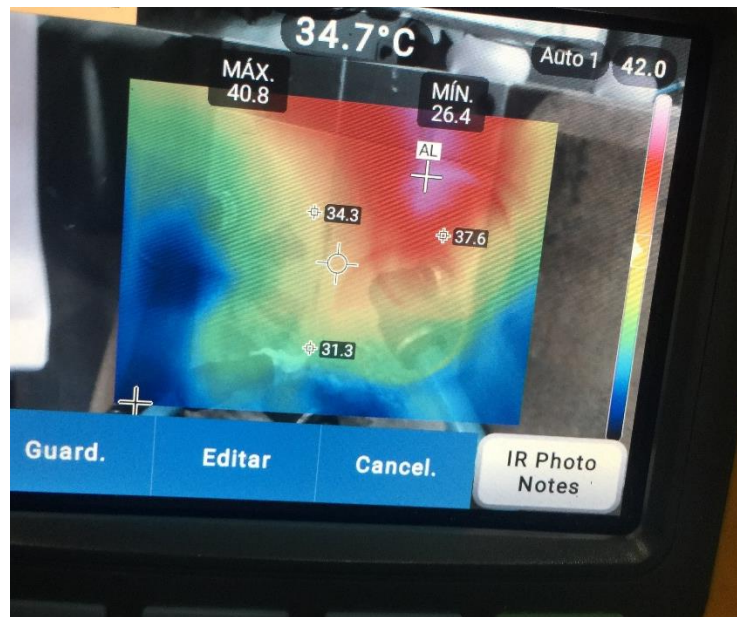


Figura B.5. Temperatura del molde durante la configuración de los parámetros de proceso.

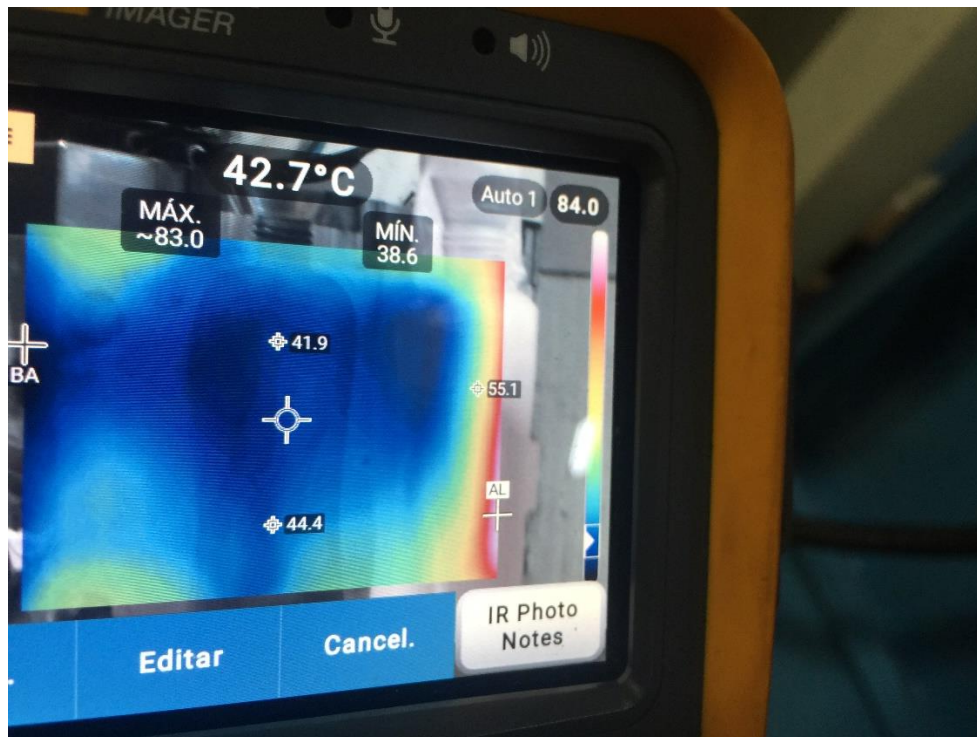


Figura B.6. Temperatura inicial del molde sin enfriamiento.



Figura B.7. Temperatura del molde después de 30 minutos de proceso continuo.

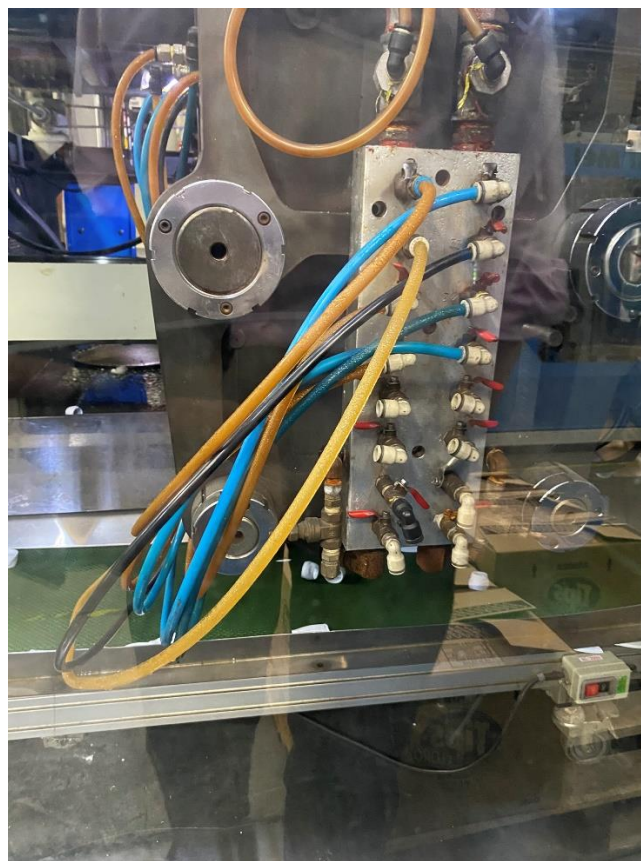


Figura B.8. Manifold del molde para extrusión soplado





Figura B.9. Punto de rocío dentro de la planta.

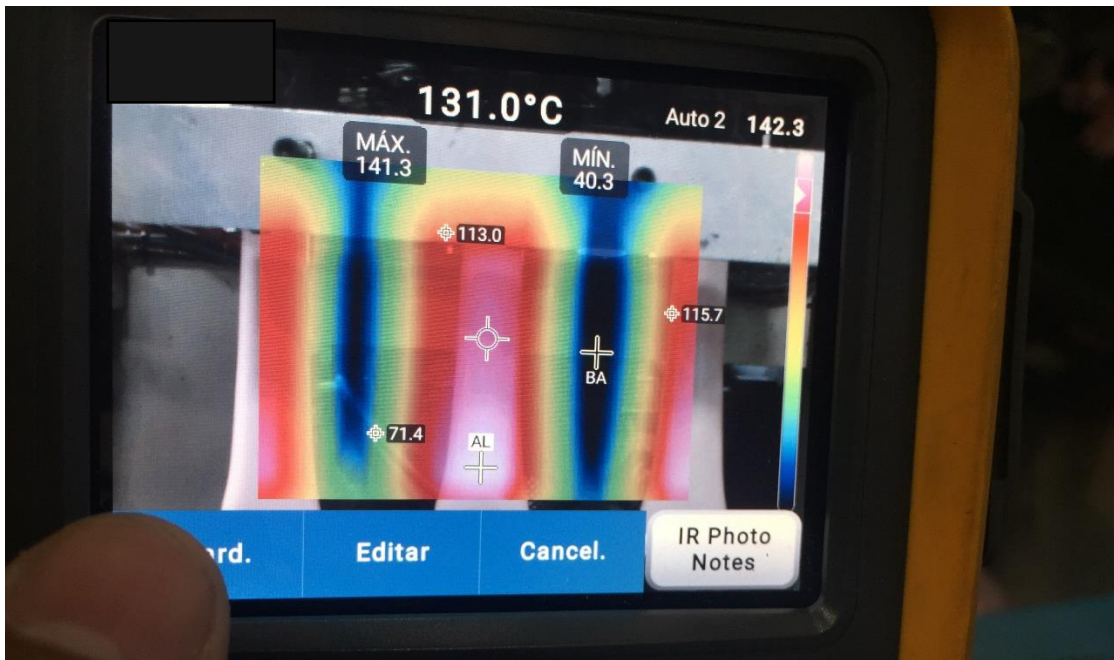


Figura B.10. Temperatura del parison previo al inicio de la etapa de soplado



**Figura B.11. Envase sin defectos superficiales.**

## **APÉNDICE C.- Anexo de reconocimiento de responsabilidades éticas y profesionales**

Por medio de la presente tesis, se plantea resolver un problema técnico especializado en proceso en una industria dedicada a la elaboración de productos plásticos. El problema que se pretende resolver fue la condensación de los moldes debido a las altas temperatura en el interior de la planta. Para esto, fueron planteadas tres alternativas de solución: la adquisición de un chiller, extractor de aire y optimización de procesos.

Desde el punto de vista ambiental, los materiales plásticos como los termoplásticos permiten que sean reutilizados, por ello las empresas usan este tipo de material dado que por cada proceso existe residuos generados por la producción denominado como scrap. Generalmente, el scrap son residuos de piezas plásticas defectuosas que en los estrictos controles de calidad no permiten que sean usados en el mercado. Por otro lado, capacidad de los termoplásticos, el scrap es reutilizado para el siguiente proceso. No obstante, es contraproducente reutilizar varias veces, puesto que disminuiría la calidad del envase. Para disminuir los efectos adversos de la reutilización del plástico, las empresas optan realizar una mezcla tanto del scrap como del material virgen. La optimización de proceso planteada en este proyecto busco reducir el scrap durante la producción para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Otra ventaja de la optimización de proceso es la reducción de los recursos energéticos. Esta ventaja tiene un gran impacto en la reducción de combustibles fósiles dañinos al ambiente y en consecuencia a la economía global. Como se expresó en el análisis de costos, es evidente que optimizar los procesos de extrusión soplado con ayuda de las herramientas computacionales para los envases actuales y futuros representa beneficios tanto económicos como ambientales. Actualmente, la industria del plástico que ha permitido ejecutar este proyecto tiene una visión enfocada en inversión tecnológica de alto nivel para el crecimiento industrial en el país. Esta razón fue un factor importante para la toma de decisión de las tres alternativas de solución.

El dilema ético de este proyecto es la implementación de una tecnología computacional como las simulaciones para reemplazar el método tradicional por prueba y error que los ingenieros de procesos ejecutan para optimizar el proceso. Sin embargo, el método tradicional no es tan eficiente dado la gran variabilidad en el manejo de las variables de procesos.

Eventualmente, las partes interesadas directamente en la ejecución del proyecto fue una empresa de plásticos ubicada en Guayaquil, Ecuador. Mientras que la parte indirecta fue el municipio local dado que una de sus funciones es regular, controlar y gestionar el desarrollo de las empresas plásticas. Adicionalmente, los responsables para permitir la ejecución de la solución planteada en este proyecto en otras empresas recaen en los ministerios ligados a la industria y organizaciones ambientales para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

La primera alternativa de solución considerada en el proyecto fue la adquisición de un chiller, no obstante, fue descartada debido a las limitaciones económicas en la empresa impactado principalmente por las readecuaciones de la planta y la paralización de algunos sectores de la empresa en la producción programada. De la misma manera, la adquisición e instalación de los extractores de aires limitaban el tiempo de cumplimiento de contratos. Sin embargo, la optimización de procesos por medio de una herramienta digital permitió que se reduzca los tiempos empleados para la configuración de las variables de procesos de un molde evitando que existan paralización en la empresa o readecuaciones de la planta costosas. A la vez, tanto la adquisición de un chiller y el extractor de aire contribuyen al consumo energético de la empresa, esto es perjudicial por lo que no es una opción factible para disminuir la contaminación ambiental.

La utilización de la herramienta computacional proporcionó un análisis del molde completo que fue validado por fotos e imágenes en tiempo real. Como consecuencia, proporcionó una reducción de tiempo en los intentos de alinear los parámetros de procesos para la obtención de una pieza plástica en buenas condiciones.