



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE UN MOLDE DE
ESTIRADO-SOPLADO MEDIANTE SIMULACIÓN PARA UN ENVASE DE 500ml**

Análisis de caso previo a la obtención del

Título de ingeniero mecánico

AUTOR: KEVIN ADRIAN PASQUEL SALAS

TUTOR: LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN

Quito-Ecuador

2024

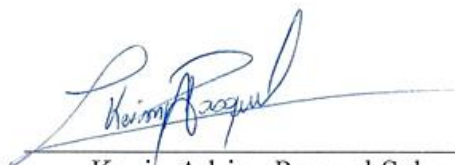
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Adrian Pasquel Salas con documento de identificación N°
1750904011 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera
total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de octubre del año 2024

Atentamente,



Kevin Adrian Pasquel Salas
1750904011

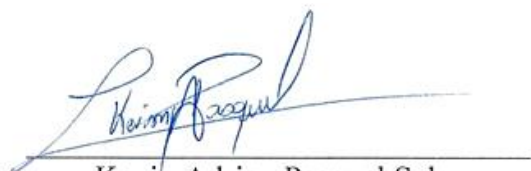
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Kevin Adrian Pasquel Salas con documento de identificación No. 1750904011, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Análisis de caso: “Análisis del proceso de enfriamiento de un molde de estirado-soplado mediante simulación para un envase de 500ml”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de octubre del año 2024

Atentamente,



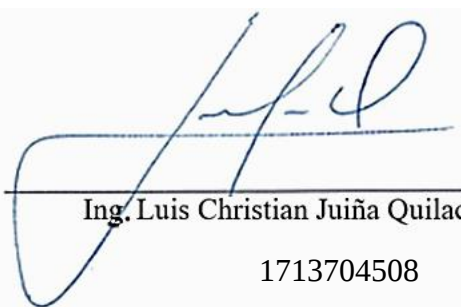
Kevin Adrian Pasquel Salas
1750904011

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Christian Juiña Quilachamín con documento de identificación N° 1713704508, docente de la Universidad Politécnica Salesiana , declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE UN MOLDE DE ESTIRADO-SOPLADO MEDIANTE SIMULACIÓN PARA UN ENVASE DE 500ML , realizado por Kevin Adrian Pasquel Salas con documento de identificación N° 1750904011, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Análisis de caso que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de octubre del año 2024

Atentamente,



Ing. Luis Christian Juiña Quilachamín M.Sc.
1713704508

DEDICATORIA

Esta parte de mi vida fue la más compleja, pero gracias a mi familia con el apoyo incondicional desde mi padre Eduardo Pasquel y mi madre Martha Salas que estuvieron en toda esta etapa de mi vida universitaria de principio a fin ayudándome en no perderme y con mucha fuerza y amor guiarme, aconsejarme y alentarme a seguir, de no rendirme a pesar de las circunstancias todo el tiempo, también la ayuda y el amor de mis hermanos sobre todo a mi hermanita Melanie Pasquel que, con su carisma y personalidad, me hace reír mucho provocando un escape de mis problemas agradezco, mucho a mi familia por eso esta tesis se las dedico a ustedes como muestra de gratitud infinita y con la mentalidad y ganas de siempre poder apoyar en casa para ser fuertes y unidos con mucho amor su hijo.

Kevin

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios por darme fuerza y bendiciones para lograr seguir este camino de conocimientos por la salud y la vida porque gracias a él nunca me faltó nada.

Quiero agradecer al Ingeniero tutor Christian Juiña por la paciencia y confianza de brindarme la oportunidad de realizar el proyecto de titulación.

Agradezco de igual forma al Ingeniero Fernando Toapanta por la paciencia y los conocimientos brindados para realizar el proyecto.

A mi querida novia Michelle Gaibor que siempre en todo momento está dándome ánimos y fuerzas para continuar mi camino, que con mucho amor ha estado apoyándome con sus gestos y detalles que nunca faltan.

A mis mejores amigos que han estado desde el principio a Sergio, Bryan, Isai, Christian Chávez, David Bravo y Luis Duran y Mario Pazmiño, agradezco todas las palabras de aliento que hicieron que nunca retroceda en mi camino.

También a mis amigos de la universidad a Steve Valencia, Bryan Vallejos, Juan Chávez y Sebastián Trujillo, por el trabajo en equipo de todos por las risas y momentos que hubo en el trayecto.

Kevin

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	4
CAPÍTULO I.....	5
MARCO TEÓRICO	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Aspectos teóricos de la investigación.....	6
1.2.1 El PET	6
1.2.2 Proceso de transformación del PET	7
1.2.3 Estados del PET	7
1.2.4 Máquinas sopladoras	11
1.2.5 Máquina de soplado lineal.....	12
1.2.6 Moldeo por estirado-soplado.....	13
1.2.7 Etapas del proceso de moldeo de envases	13
1.2.8 Transferencia de los envases	14
1.2.9 Dinámica de fluidos computacional (CFD)	14
1.2.10 ANSYS Fluent.....	15
CAPÍTULO II	16
ANÁLISIS TÉRMICO.....	16

2.1 Proceso de secado de PET.....	16
2.2 Comportamiento del molde inyección	17
2.3 Comportamiento en el molde de soplado	22
2.3.1 Relación de estiramiento natural o relación de estiramiento intrínseca	22
2.3.2 Relación entre el IV y la Relación de Estiramiento Natural (NSR).....	22
2.3.3 Diagramas ilustrativos de la tensión-deformación	23
2.3.4 Relación con el proceso RSBM	23
2.3.5 Deformación elástica.....	25
2.3.6 Yielding (Cedencia).....	25
2.3.7 Parámetros relevantes.....	25
2.3.8 Datos de propiedades para el PET.....	26
2.3.9 Acetaldehído (AA) en botellas de PET	27
2.4 Métodos de calentamiento.....	28
2.4.1 Lámparas infrarrojas	28
2.4.2 Otros métodos de calentamiento	30
2.4.3 Enfriamiento por ventilador	31
2.5 Funciones de transferencia	32
2.5.1 Relaciones de estiramiento	32
2.5.2 Transferencia de calor	34
2.5.3 Características de absorción de luz del PET	35
2.6 Temperatura óptima de la preforma	39
CAPÍTULO III	41
DISEÑO DEL MOLDE	41
3.1 Diseño del molde para envase de 500 ml.....	41
3.2 Condiciones de borde	41

3.3 Simulación CFD	43
3.4 Criterio de mallado.....	49
3.1.1 Parámetros y condiciones del molde de 500ml	51
3.1.2 Parámetros para la solución de temperaturas	69
CAPÍTULO IV	73
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN	73
4.1 Análisis térmico del molde.....	73
4.2 Resultados analíticos vs la simulación	77
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del PET que se benefician de un alto grado de orientación	27
Tabla 2 Relación entre el porcentaje de funcionamiento, los voltajes utilizados y la salida de temperatura de una lampara infrarroja común	28
Tabla 3 Ejemplo relación estiramiento	33
Tabla 4 Propiedades del fluido	42
Tabla 5 Parámetros del proceso	51
Tabla 6 Propiedades del Duraluminio_7075.	52
Tabla 7 Condiciones de entra del agua.	55
Tabla 8 Opciones y funciones de parámetros a utilizar.	56
Tabla 9 Propiedades del agua a 9 °C	57
Tabla 10 Resultados de temperaturas simulación CFD.....	77
Tabla 11 Resultados analíticos del molde.	78
Tabla 12 Resultados simulación vs resultados analíticos.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Simbología del PET y estructura molecular.....	6
Figura 2 Representación amorfa del PET en cadenas	7
Figura 3 Proceso de biorientación de la preforma de PET	8
Figura 4 Pellets.....	8
Figura 5 Pellets y preformas.....	9
Figura 6 Partes del envase	10
Figura 7 Sopladora de tipo lienal etapas del proceso	12
Figura 8 Relación entre humedad y el índice de viscosidad (IV)	16
Figura 9 Los diversos componentes de un molde de inyección.	18
Figura 10 Cavida de preforma vacia	18
Figura 11 Inyección 1	19
Figura 12 Inyección 2.....	19
Figura 13 Inyeccion 3.....	20
Figura 14 Fin de la inyeccion.....	20
Figura 15 Tiempo de enfriamiento	21
Figura 16 La deformación elástica ocurre cuando la varrilla de estiramiento comienza a mover el material hacia el molde de soplado	23
Figura 17 En la curva de tensión- deformación la región plana de la curva despues del punto de cedencia el material alcanza su límite	24
Figura 18 Alta presión de soplado obliga al material a endurecerse por deformación	24
Figura 19 Factores influyentes en la determinacion del NSR (Relación de estiramiento natural)	26
Figura 20 Proceso de fabricacion de preformas pet, sección 4 (calefactores infrarojos).	29
Figura 21 Emisión espectral de diferentes cuerpos negros a distintas temperaturas	30
Figura 22 Relación de estiramiento axial (NSR) de envase PET 500 ml.....	32

Figura 23 Rango típico de longitudes de onda emitidas por lámparas infrarrojas.....	36
Figura 24 El ajuste de las lámparas modifica el flujo de calor y desplaza la longitud de onda óptima hacia el rango indicado.....	36
Figura 25 Temperatura empírica de la pared interior y exterior de la preforma con un rendimiento de lámpara del 40%. La temperatura interior se retrasa.....	37
Figura 26 Ttemperatura empírica de la pared interior y exterior de la preforma con un rendimiento de lámpara del 70%. La alta absorción en la pared exterior conduce a una gran diferencia.....	38
Figura 27 Temperatura reales de la pared interior y exterior de la preforma al 100%	38
Figura 28 Imagen térmica de la preforma a la salida del horno.	40
Figura 29 Envase de 500ml de material PET.	41
Figura 30 Vista isométrica del molde.....	42
Figura 31 Ansys workbench 2024 R1.	43
Figura 32 Árbol de secuencia CFD.....	43
Figura 33 Proceso de importación de geometría.....	44
Figura 34 Molde, envase y ensable en formato STEP.....	44
Figura 35 Herramienta Geometry in DesignModeler.....	45
Figura 36 Parámetros para el modelado en CFD.	45
Figura 37 Molde y envase de 500ml generados para el proceso de simulación.	46
Figura 38 Corte del molde para la selección del las caras a aplicar el fluido.	46
Figura 39 Herramienta para implementar el fluido.....	47
Figura 40 Selleccion del canal por donde va a pasar el fluido.....	47
Figura 41 Generación del Fill (Relleno de volúmen).....	48
Figura 42 Secciones del modelado a simular.	48
Figura 43 Modelo de Skewness.	49
Figura 44 Entrada del fluido (agua) inlet.	49

Figura 45 Salida 1 del fluido (agua) outle_1.....	50
Figura 46 Salida 2 del fluido (agua) outlet_2.....	50
Figura 48 CFD solver.	51
Figura 49 Material seleccionado Duraluminio 7075.....	52
Figura 50 Fluido a seleccionar Agua.	53
Figura 51 Material Pet.....	53
Figura 52 Molde 1 a temperatura de 52°C.	54
Figura 53 Temperatura del envase PET.....	54
Figura 54 Condiciones de borde del molde 1.....	55
Figura 55 Parámetros a editar del sistema de refrigeracion del molde.	61
Figura 56 Condiciones de tranferencia de calor del sistema de refrigeración del molde.....	63
Figura 57 Parámetros de flujo de calor (heat flux) del molde de durluminio.	66
Figura 58 Condiciones de borde mixto (combinación de diferentes mecanismos de transferencia de calor) del molde de duraluminio.....	66
Figura 59 Condiciones de heat flux (flujo de calor) para el envase de 500 ml.....	68
Figura 60 Condiciones de borde mixto del envase PET de 500 ml.	69
Figura 61 Animación de contornos.	70
Figura 62 Selección del contorno de temperatura.	70
Figura 63 Plano de temperatura.	71
Figura 64 Contorno de temperaturas para el sistema de refrigeración del molde.....	71
Figura 65 Animación del contorno finalizado.....	72
Figura 66 Cortes para el análisis de temperatura del molde	73
Figura 67 Contorno para la animación de los cortes del molde.	73
Figura 68 Análisis de temperatura del molde en el corte del plano 1 con (profundidad de 37mm).	74
Figura 69 Molde análisis de la temperatura del corte 2 (profundidad:19mm).....	75

Figura 70 Molde análisis de la temperatura del corte 3 (profundidad:1mm).....	76
Figura 71 Análisis de temperatura de asiento del molde.....	76

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se centró en el análisis del comportamiento térmico del molde de estirado-soplado en diferentes puntos durante el proceso de refrigeración, utilizando software de simulación. El diseño del molde y del envase de 500 ml se realizó en SolidWorks, mientras que el estudio térmico se llevó a cabo en ANSYS Fluent. Los parámetros de simulación se resolvieron mediante ecuaciones de transferencia de calor de forma analítica, empleando la ley de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton. Estas ecuaciones fueron fundamentales para obtener los datos de entrada para el software, y las propiedades del material del molde y el envase se obtuvieron de tablas a las temperaturas deseadas para la simulación. Para evaluar el comportamiento térmico en distintos puntos, el molde se dividió en tres planos con profundidades de 10 mm, 19 mm y 37 mm. Estas medidas permitieron conocer las temperaturas en el sistema de refrigeración del molde para un envase de 500 ml. En la profundidad de 37 mm se encuentra el sistema de refrigeración, donde el flujo de agua transfiere y disipa el calor generado por el ambiente y el proceso de enfriamiento del envase PET, manteniendo el molde a temperaturas entre 16 °C y 20 °C. En el plano de 19 mm, que es un punto intermedio entre el sistema de refrigeración y la temperatura ambiente, se observa un proceso de conducción de calor con temperaturas que oscilan entre 26 °C y 40 °C. En el plano de 10 mm, cercano al punto de contacto con la botella, se nota un incremento de temperatura debido al calor del envase, con rangos de 90 °C a 97 °C y una temperatura máxima del molde de 83 °C en ciertas partes.

El diseño del sistema de refrigeración se basó en un modelo preexistente, adaptado con cambios en las dimensiones internas para mejorar el enfriamiento del molde. Las dimensiones internas, con tres cortes (dos verticales y uno horizontal) que se conectan entre sí, permitieron una distribución más homogénea del flujo de agua, minimizando las variaciones de temperatura.

Con este enfoque, se buscó asegurar que el envase de PET se moldeara adecuadamente, evitando problemas como la cristalización excesiva o la fragilidad del material, lo cual es crucial para la producción eficiente y buena calidad en el producto final.

Palabras clave: análisis térmico, CFD, estirado-soplado, molde, PET

ABSTRACT

In the present research, the focus was on analyzing the thermal behavior of the stretch-blow mold at various points during the cooling process, using simulation software. The design of the mold and the 500 ml container was carried out in SolidWorks, while the thermal study was conducted in ANSYS Fluent. The simulation parameters were determined analytically through heat transfer equations, employing Fourier's law and Newton's law of cooling. These equations were fundamental for obtaining the input data for the software, and the material properties of the mold and the container were obtained from tables at the desired temperatures for the simulation. To evaluate the thermal behavior at different points, the mold was divided into three planes with depths of 10 mm, 19 mm, and 37 mm. These measurements allowed for the determination of temperatures in the mold's cooling system for a 500 ml container. At a depth of 37 mm is the cooling system, where the water flow transfers and dissipates the heat generated by the environment and the PET container cooling process, maintaining the mold at temperatures between 16 °C and 20 °C. At the 19 mm plane, an intermediate point between the cooling system and the ambient temperature, a heat conduction process is observed with temperatures ranging from 26 °C to 40 °C. At the 10 mm plane, near the contact point with the bottle, a temperature increase is noted due to the container's heat, with ranges from 90 °C to 97 °C and a maximum mold temperature of 83 °C in certain areas.

The cooling system design was based on a pre-existing model, adapted with changes in internal dimensions to improve mold cooling. The internal dimensions, with three cuts (two vertical and one horizontal) that connect to each other, allowed for a more homogeneous water flow distribution, minimizing temperature variations.

This approach aimed to ensure that the PET container was molded adequately, avoiding issues such as excessive crystallization or material fragility, which are crucial for efficient production and high-quality final products.

Keywords: thermal analysis, CFD, stretch-blow molding, mold, PET

INTRODUCCIÓN

La industria de envases plásticos ha experimentado un significativo crecimiento en las últimas décadas donde impulsada por la demanda de soluciones se requiere cambiar y experimentar nuevos diseños que aporte a la fabricación del producto. Entre los métodos de fabricación de envases plásticos más utilizados se encuentra el estirado-soplado, un proceso que combina el estiramiento y el soplado de un polímero fundido para así dar forma a un envase hueco. El tereftalato de polietileno (PET) es de los materiales poliméricos que más se emplean en el proceso debido a que tiene un excelente balance por las propiedades, incluyendo resistencia química, transparencia y barrera al gas.

En el proceso térmico donde la etapa de enfriamiento en el estirado-soplado es crucial en la calidad final del envase. Donde se requiere un enfriamiento adecuado permitiendo la solidificación uniforme del plástico, de esta manera se puede evitar la formación de defectos como el agrietamiento, delaminación y distorsiones dimensionales lo cual estos defectos pueden llegar afectar de manera negativa a la integridad estructural del envase por ende su apariencia estética y su capacidad de barrera.

El proceso de enfriamiento en el estirado-soplado se ve afectado por un sin números de factores, como la geometría del molde de igual forma las condiciones al momento de operar y las propiedades térmicas del material en este caso plástico, por lo tanto, la complejidad en estos factores dificulta la predicción precisa del comportamiento del enfriamiento en el proceso. Existen también otros factores que afectan de manera significativa como la geometría del molde donde la forma y dimensiones del molde influyen en la transferencia de calor desde el plástico al molde. Las condiciones de enfriamiento que la temperatura del molde, la distribución y el flujo de aire de los canales de enfriamiento afectan la tasa de enfriamiento del plástico. Los parámetros requeridos para que el proceso sea correcto; son la temperatura del plástico fundido y la presión del soplado con la velocidad al estirarse, esto influye con la distribución de temperatura inicial y en la tasa de enfriamiento.

PROBLEMA

El problema en cuestión se enfoca en la ausencia de una trayectoria de enfriamiento buena donde para poder comprender el proceso de elaboración de envases, es necesario saber que función tiene el sistema de refrigeración ya que es importante en la fase del procedimiento del moldeo de en la forma de estirado-soplado por lo que la en esta fase es donde culmina en al elaborar del producto final. De esta manera el problema puede impactar negativamente tanto en la calidad del producto final como en la duración total del ciclo de inyección. La complejidad aumenta significativamente en aplicaciones que emplean resinas semicristalinas, como el moldeo de productos de tereftalato de polietileno (PET). Durante la fase de este proceso de moldeo en estirado-soplado, la preforma se expande y toma la forma del molde. El enfriamiento del molde se lleva a cabo mediante la circulación de un fluido, sin embargo, este proceso puede provocar la formación de zonas cristalinas indeseables, afectando la calidad del producto final.

Existen efectos que ocurren de manera común como que la preforma al ser extraída de manera rápida del molde con la finalidad de acortar el ciclo, no se enfría de manera uniforme provocando que la porción de la base se cristalice; la cantidades de calor que se acumulan en las paredes de la preforma en el proceso de inyección se mantiene en niveles altos para así inducir la cristalinidad de post-moldeo por lo tanto en el área de entrada del molde donde es un punto crítico que el enfriamiento de la porción no llega a ser de manera efectiva ya que provoca una baja en la calidad del producto. La distribución de temperatura al llegar al molde y el envase durante la fase de enfriamiento es un proceso complejo que no se puede predecir de manera analítica debido a la geometría intrincada del molde y las propiedades no lineales del plástico, así como a las condiciones de enfriamiento variables. Esto dificulta la identificación de zonas críticas de enfriamiento y la predicción de la formación de defectos.

JUSTIFICACIÓN

En la sección industrial donde el campo del moldeo por estirado-soplado, se enfrentan desafíos que se asocia con el sistema de enfriamiento que tiene un impacto significativo en la calidad del producto final. Los problemas de enfriamiento pueden provocar ciertos defectos en el envase, como en áreas cristalinas no deseadas o también deformaciones, lo que a su vez lleva a una reducción en la calidad percibida en el producto y en última instancia a una pérdida de clientes y oportunidades en el mercado por lo tanto es necesario el resolver e identificar las deficiencias, para la mejora en la calidad del material y eficiencia en la refrigeración, en esta fase del procedimiento de moldeo por estirado-soplado de las preformas el análisis del proceso de enfriamiento mediante simulación computacional utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD), llega a ser de gran importancia por lo que nos ayuda de forma complementaria de esta manera es una herramienta útil y cercana a la realidad de los proceso de refrigeración que se requieren para comprender el sistema de enfriamiento en la simulación y en la industria, realizando la simulación con datos y parámetros reales para el moldeo por estirado-soplado. La simulación permitirá evaluar diferentes estrategias de enfriamiento o diseñar trayectorias correctas añadiendo también a prever posibles problemas antes de la implementación práctica. La información detalla el proceso y comportamiento del fluido agregando de forma significativa a la dinámica en los procesos térmicos como la transferencia de calor en una de las fases del moldeo en el sistema de refrigeración del molde. Los datos y resultados que se obtienen a través de simulaciones computacionales avanzadas proporcionan datos precisos y replicables que pueden ser empleados por futuras empresas del sector para validar envases fabricados mediante moldes. Este enfoque innovador elimina la necesidad de fabricar prototipos costosos y reduce la dependencia de la logística humana necesaria para la realización de pruebas in situ. Además, la ayuda a la comprensión de estos procesos en este caso al mejorar la eficiencia en la operación, que a su vez incrementa la viabilidad económica y técnica de las soluciones implementadas en la producción industrial de envases. La elección del software ANSYS para realizar las simulaciones CFD en el análisis de caso se basa en la realizar simulaciones de forma computacional por lo que tiene una amplia variedad de herramientas y capacidades para solucionar y obtener análisis de fluidos como también información que es crítica como la transferencia de calor y en estructuras donde se ha utilizado con éxito para diversos estudios de casos en procesos de enfriamiento en la industria de plásticos.

OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

Objetivo general:

Analizar el proceso de enfriamiento de un molde de estirado-soplado mediante simulación para un envase de 500 ml.

Objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento térmico de un molde de estirado-soplado en diferentes puntos durante el proceso de enfriamiento con el uso de CFD.
- Identificar las condiciones de enfriamiento para el PET.
- Simular las condiciones de enfriamiento para un envase de 500 ml.
- Analizar de manera comparativa los resultados analíticos vs los resultados de la simulación.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Estado del arte

El proceso de estirado-soplado es fundamental en la fabricación de envases plásticos, particularmente aquellos elaborados con PET, debido a su capacidad para producir envases con geometrías y diseños complejos, mientras se mantienen las propiedades mecánicas necesarias para aplicaciones industriales, como el envasado de alimentos y bebidas. La eficiencia en el enfriamiento del molde es crucial para asegurar tanto la calidad del material y para la obtención de un producto final de forma eficaz en el proceso de producción.

Para realizar la simulación por el método de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como herramienta primordial además de complementar en el análisis detallado del proceso. Esta simulación permite evaluar cómo el enfriamiento del molde impacta la distribución térmica dentro del molde, afectando directamente la homogeneidad del enfriamiento y, por ende, la calidad y consistencia del envase final. Una temperatura no controlada puede resultar en defectos como cristalinidad no deseada y tensines internas que pueden comprometer a la integridad estructural del envase.

El (CFD) se utiliza para modelar el comportamiento térmico y de flujo de fluidos en el proceso de enfriamiento del molde. CFD Permite predecir como varían las temperaturas en puntos diferentes del molde durante el proceso, lo cual es importante para diseñar sistemas de enfriamiento más eficientes. El comportamiento térmico del molde de estirado-soplado en diversos estudios abordan la distribución térmica en moldes. El moldeo por estirado-soplado es un proceso versátil y económico que dispone la industria para moldear materiales huecos.

Cuando el material se estira, exhibe propiedades de endurecimiento por deformación que, al depender de la temperatura, presión y la velocidad de deformación llega a obtener una forma deseada mediante un molde diseñado. La preforma se fabrica por extrusión y se fuerza entre dos mitades por presurización [1]. Al realizar la fase del procedimiento del moldeo mediante estirado-soplado, donde la temperatura del material se puede controlar mediante parámetros específicos para lograr buenas condiciones en el conformado del material.

Por medio del software de ANSYS Fluent permite determinar el grado de temperatura y de igual forma la transferencia de calor que se conduce a través del envase hasta el fluido, en este caso es la preforma sólida en la etapa transitoria. Con estos datos puede determinar una aproximación del grado de enfriamiento a través de la pared del envase [2]. En el caso de las preformas existe una relajación de la fase amorfa donde se tiene mayor impacto en la estabilidad térmica y la resistencia a la presión en la botella.

Al mismo tiempo, la estabilidad térmica de la botella aumenta y la fuerza de presión comienza a disminuir cuando aumenta la relajación de la fase amorfa además los cristalitos aumentan al mayor tamaño posible sin causar blanqueamiento térmico del material es importante mencionar que los principales parámetros del proceso del soplado de preformas de molde caliente afectan la propiedades de la botella [3].

1.2 Aspectos teóricos de la investigación

1.2.1 El PET

El PET, conocido también como tereftalato de polietileno, es una clase de plástico ampliamente utilizado en la industria alimentaria y textil. Se caracteriza por su alta resistencia, transparencia, barrera contra gases y humedad, ligereza y reciclabilidad. La configuración molecular junto con la simbología se ilustra en la figura 1 [4].

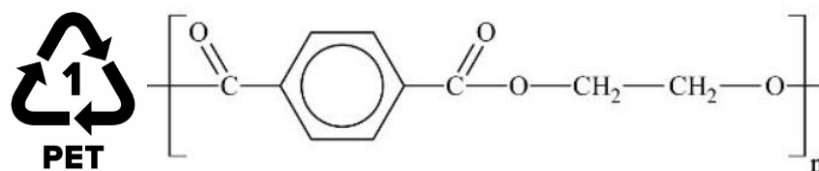


Figura 1. Simbología del PET y estructura molecular [4].

Donde "n" indica el número de unidades repetitivas del monómero. El PET se obtiene a partir de dos derivados del petróleo: el ácido tereftálico y el etilenglicol. Estos compuestos se someten a un proceso de purificación y luego se combinan en una reacción química para formar el polímero PET.

1.2.2 Proceso de transformación del PET

El tereftalato de polietileno (PET) se obtiene a partir de derivados del petróleo a través de un proceso de polimerización. Durante este proceso, los monómeros de etilenglicol y ácido tereftálico reaccionan para formar largas cadenas poliméricas de PET. Este material polimérico se somete posteriormente a una secuencia de procesos térmicos y mecánicos para mejorar sus propiedades para que posteriormente ser uso en la producción de las botellas y envases, asegurando así su idoneidad para aplicaciones industriales específicas; El PET pasa por un proceso de extraído y después de refinado donde se llega a la etapa de polimerización que después de pasar el proceso de inyección se obtiene como resultado gránulos que se denominan como Pellets [4].

1.2.3 Estados del PET

Cristalino: El PET en este estado tiene características de ser opaco, lechoso y puede ser quebradizo; En este estado se caracteriza por tener la menor energía, lo cual se forma al enfriarse el PET fundido de manera lenta, o también si en el estado amorfo se calienta de manera progresiva a una temperatura por superando los 80 °C [4].

Amorfo: las moléculas del PET son aleatorias, en este estado, las cadenas poliméricas se encuentran sin ningún orden como se puede visualizar en la figura 2.

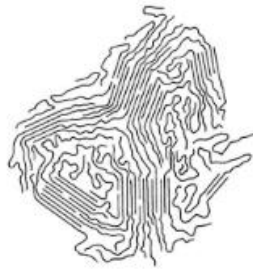


Figura 2. Representación amorfa del PET en cadenas [5].

El polímero aún no ha alcanzado su estado cristalino ni ha sido orientado molecularmente, lo que resulta en propiedades de barrera deficientes frente a gases, baja rigidez estructural y alta transparencia óptica [4]. Por lo tanto, En este caso el polímero amorfo, la entropía es mayor a uno similar en cristalino donde la densidad es mayor y no experimenta esfuerzo en pruebas de tracción (estrés-elongación) [5].

Biorientado: este proceso se produce cuando el PET, inicialmente en estado amorfo, es sometido a estiramiento mecánico y soplado a temperaturas superiores a 80 °C. En esta condición, la estructura del PET se transforma, resultando en un material que es transparente, posee alta resistencia en caso de la presión y mejora en las propiedades de barrera contra gases [4]. Para así llegar a la temperatura de tracción vítrea para de esa manera moldearse. En la figura 3 se tiene un ejemplar de los pasos del proceso de biorientación.

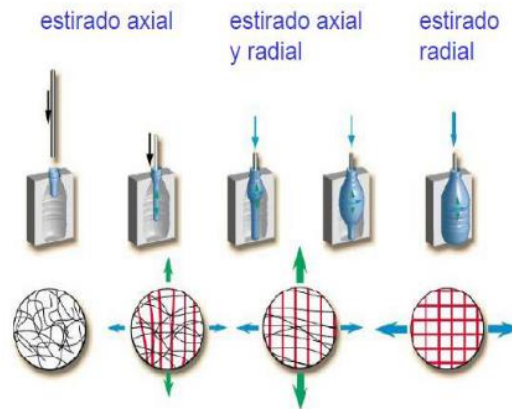


Figura 3. Proceso de biorientación de la preforma de PET [5].

Pellets: También conocidos como gránulos, son pequeñas partículas que generalmente son de forma cilíndrica o de forma de lenteja. Los pellets son polímeros de aproximadamente 3 mm donde el corte es de una longitud de 5 mm que se obtiene mediante el proceso de calentamiento, extracción, corte y secado. Es material de al momento de ser usado como materia prima, es crucial para la producción de preformas [6]. En la figura 4 se puede observar la forma del Pellet.

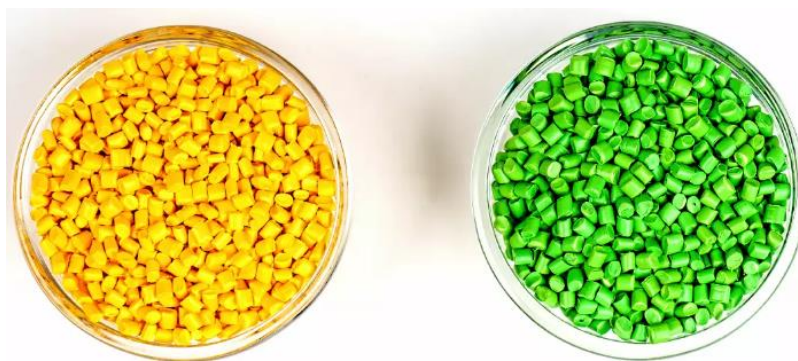


Figura 4. Pellets.

Preformas: Las preformas de tereftalato de polietileno (PET), que son componentes preformados de polímero, se emplean como materia prima para el proceso de moldeo. Las preformas desempeñan un papel importante como las fases intermedias en la producción de envases de PET. Se calientan y expanden dentro de un molde para adquirir la forma definitiva del producto. Estas preformas suelen ser diseñadas de forma cilíndrica y cónica que presentan una cavidad interna que define la forma final del envase. El material PET es un plástico de alta resistencia, transparencia y barrera de gases y líquidos añadiendo que es un material reciclable y ampliamente utilizado en la industria de envases gracias a las propiedades que son favorables. En el proceso de inyección se logra la obtención de preformas donde llega a tener una forma cilíndrica hueca con un cuello y una rosca en el extremo superior como se logra observar en la ilustración de la figura 5 que se denomina finish por el cual tiene variaciones de tamaño y volumen del envase [6].



Figura 5. Pellets y preformas [6].

Los métodos empleados para dar forma a los polímeros y crear preformas destinadas a botellas y envases (PET) son que se muestran a continuación:

1. Estirado-soplado.
2. Inyección y soplado.
3. Extracción y soplado.

En la fabricación de envases, la elección del material influye significativamente. En la sección industrial dedicadas a la fabricación de bebidas, el proceso de estirado-soplado se destaca por su eficiencia y confiabilidad, permitiendo lograr altas tasas de producción. La implementación de esta metodología resulta esencial para cumplir eficazmente con las expectativas del cliente, al tiempo que mejora tanto la calidad del envase como la eficiencia en las operaciones [6].

Envases: Se denomina envases al contenedor de forma cilíndrica hueca el cual es fabricado de diferentes formas que sirve para almacenar, manipular, preservar y proteger generalmente líquidos que son para el consumo del ser humano, ya sea de venta o de distribución del producto. El envase final debe cumplir con las especificaciones tanto del cliente como de los requisitos de la planta embotelladora, siendo estas especificaciones fundamentales para el control de calidad del producto. Principalmente, los envases se componen de varias partes críticas, como la rosca, que aloja la tapa; el cuello, que constituye la mayor parte del envase; y la base, que a menudo presenta una geometría petaloide. La integridad y precisión de estas componentes son determinantes en la apariencia y calidad del producto final, y por ende, en la conformidad con los estándares de calidad [6]. Las partes de la botella se ilustran en la figura 6.



Figura 6. Partes del envase [6].

Diversos elementos afectan la producción de envases, sobre todo durante el tratamiento del material. Durante la producción, las botellas y preformas experimentan múltiples ciclos de calentamiento, lo cual puede causar variaciones significativas en parámetros críticos como el porcentaje de acetaldehído, la cristalinidad y la viscosidad intrínseca. Estos parámetros son

esenciales para determinar las propiedades finales del envase y, por ende, afectan su calidad y rendimiento en aplicaciones industriales.

Viscosidad intrínseca del PET: es una propiedad física importante del tereftalato de polietileno (PET), un polímero termoplástico que es utilizado ampliamente en la industria textil y de envases. La (IV) se conoce como medida de resistencia a la fluidez de una solución de polímeros diluida y se expresa típicamente en unidades de decilitros por gramo (dL/g). “El tamaño promedio de las cadenas moleculares y la masa total del polímero, a medida que aumenta la masa molecular, las cadenas poliméricas se alargan, lo que mejora diversas propiedades el en material, en este caso la resistencia mecánica y además la impermeabilidad. Añadido de un mayor peso molecular generalmente reduce la velocidad de cristalización del polímero, contribuyendo a una mayor estabilidad estructural y desempeño del material en aplicaciones prácticas. Donde la viscosidad intrínseca en la resina de PET puede estar en un rango comprendido de entre los 0.715 y 0.85 dL/g [6].

Acetaldehído: Es un líquido volátil e incoloro que, aunque no es tóxico, se encuentra en bajas concentraciones en bebidas alcohólicas y alimentos. En las resinas de PET, el acetaldehído puede estar presente en concentraciones medidas en partes por millón (ppm). Este compuesto se forma como un subproducto de la degradación térmica del PET cuando se somete a temperaturas superiores a 150 °C. El monitoreo de los niveles de acetaldehído en botellas y preformas es crucial, especialmente en la producción de envases para agua, ya que una concentración elevada de acetaldehído puede alterar el sabor del líquido contenido. Por lo tanto, es esencial mantener las ppm de acetaldehído lo más bajas posible para preservar la integridad sensorial del agua, que es una bebida incolora e insípida [6].

1.2.4 Máquinas sopladoras

Las máquinas de soplado se componen de sistemas eléctricos y mecánicos que facilitan el conformado de envases al inyectar de aire comprimido a una presión alta dentro de la cavidad del molde previamente instalado. Estas máquinas se clasifican principalmente en configuraciones lineales y rotativas. Entre las características más relevantes se incluyen el número de moldes, la cantidad de hornos empleados en el acondicionamiento térmico de las preformas, la velocidad de producción de envases, la capacidad de aire comprimido del sistema y la eficiencia en la refrigeración del sistema. El proceso de funcionamiento en las máquinas

está complementado por equipos auxiliares, como un chiller para la refrigeración del agua y un compresor de alta presión para el suministro de aire comprimido [7].

1.2.5 Máquina de soplado lineal

Las máquinas sopladoras lineales, utilizadas en la producción de envases, incorporan un mecanismo de movimiento lineal. Este mecanismo se compone de columnas, eslabones, guías y rodamientos dispuestos en una configuración lineal. Su principal tarea consiste en controlar el desplazamiento horizontal para abrir y cerrar los moldes durante el proceso de soplado. A diferencia de las máquinas rotativas, que también se emplean en la fabricación de envases, las sopladoras lineales presentan una organización más eficiente debido a su disposición lineal de equipos. Esta estructura permite una secuencia de operaciones organizada y optimizada en la formación de envases [8]. En la ilustración de la siguiente figura 7 donde se comprende el procedimiento de la fabricación de envases de una máquina de soplado lineal.

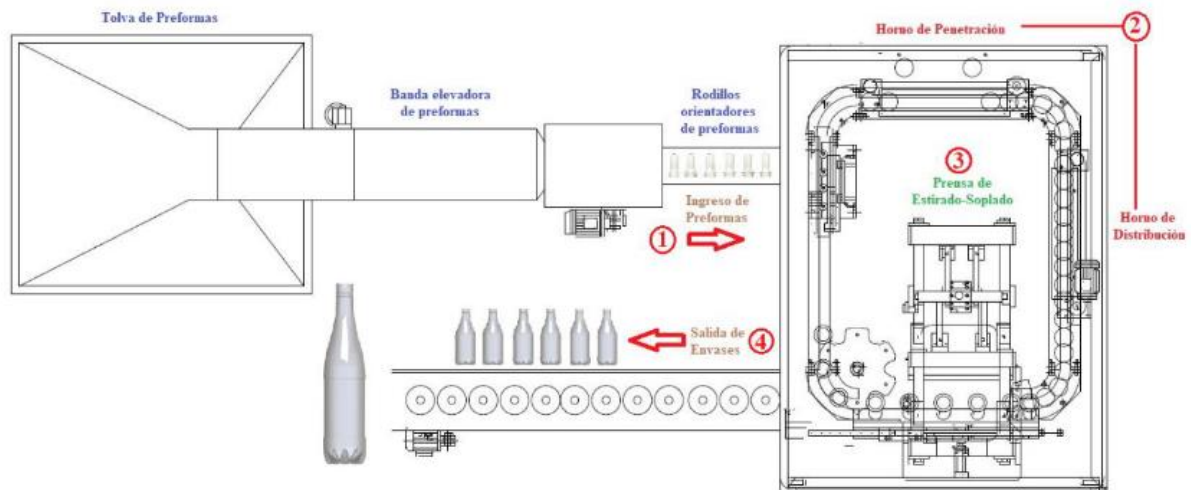


Figura 7. Sopladora de tipo lineal etapas del proceso [8].

1.2.6 Moldeo por estirado-soplado

En el procedimiento de la fase de moldeo en estirado-soplado (MES), también conocido en inglés como stretch blow moulding (SBM), En los métodos principales en la producción en masa de envases PET. Es importante comprender como se comporta el PET durante este proceso fundamental para el diseño de productos y procesos óptimos. En el proceso el material experimenta una deformación biaxial de alta velocidad y también una gran deformación. Se calienta primeramente la preforma por encima de la Tg de material PET, Posteriormente la preforma caliente ingresa a una etapa de soplado con aire comprimido sin molde. Se observa la evolución de una preforma inflada dentro de un molde cerrado [9].

1.2.7 Etapas del proceso de moldeo de envases

Alimentación de preformas: Se asegura un flujo eficiente y continuo de preformas para abastecer adecuadamente la máquina. Las preformas son transportadas hacia la sección denominada "orientador" mediante una cinta transportadora de goma. El orientador se encarga de alinear y posicionar las preformas antes de que sean dirigidas a la unidad de alimentación, garantizando así un suministro homogéneo y ordenado al proceso de producción [10].

Carga y transferencia de preformas: Durante el proceso, el movimiento vertical de microrodillos neumáticos asegura la sujeción adecuada de los cuellos de las preformas a los ejes rotativos, conocidos como porta-preformas. Estos microrodillos están diseñados para realizar un agarre preciso y uniforme. El ciclo de transferencia está controlado por un perfil de movimiento, que garantiza que las preformas deformadas o mal posicionadas sean identificadas y segregadas, evitando su entrada en la fase de acondicionamiento y asegurando la calidad del proceso de producción [10].

El proceso de acondicionamiento de las preformas inicia con su transferencia a los hornos de penetración y distribución, que involucra dos movimientos coordinados: traslacional y rotacional. El desplazamiento progresivo de las preformas a lo largo del contorno del bastidor del horno se logra mediante un movimiento traslacional, por lo tanto, el movimiento de rotacional asegura que giren el material alrededor del eje longitudinal. Esta rotación es esencial para lograr un calentamiento uniforme de las preformas. Solo después de un enfriamiento controlado, conocido como inversión térmica (enfriamiento ambiental), las preformas alcanzan el perfil térmico deseado.

Durante este proceso, un pirómetro supervisa y ajusta la energía térmica de los hornos en función de los datos de retroalimentación. Tras este proceso, las preformas se enfrían en un trayecto externo a los hornos, siendo transportadas por cadenas en los carros porta-preformas, previo al ingreso del proceso de moldeado por estirado-soplado (MES) [10].

1.2.8 Transferencia de los envases

Una vez completadas las fases de estirado y soplado, las preformas son retiradas de los moldes y trasladadas al extremo de la línea de producción. Esta operación al hacerse de forma similar a la fase de traslación inicial, empleando un sistema de transporte por cadena que incorpora unidades de soporte para preformas. Este sistema mejora el desplazamiento controlado y eficiente del envases por toda la cadena de producción, garantizando la preservación de la integridad estructural del producto y facilitando su manejo y procesamiento subsiguiente [10].

1.2.9 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

EL CFD demuestra ser una herramienta de gran utilidad para realizar procesos complejos, análisis y diseños de envases de PET, ofreciendo información de suma importancia sobre el comportamiento del proceso de fabricación y de uso. Donde se puede detallar algunos de los beneficios específicos del uso del CFD para el análisis de envases de PET:

Compresión del fluido y transferencia de calor: El método CFD permite visualizar y analizar el flujo de aire, agua u otros fluidos dentro y alrededor del envase. Esto proporciona información crítica sobre la distribución térmica, la eficiencia del sistema de enfriamiento, la potencial formación de defectos y la condensación. Además, implica la aplicación de técnicas numéricas y computacionales avanzadas para abordar problemas físicos asociados con el flujo de fluidos, así como fenómenos adicionales relacionados con la transferencia de calor y reacciones químicas. Estas técnicas permiten una simulación y análisis detallado de las variables involucradas, donde al mejorar el proceso y el rendimiento del sistema, se garantiza la calidad del proceso [11].

1.2.10 ANSYS Fluent

La incorporación de ANSYS Fluent al análisis de envases de PET mediante Dinámica de fluidos computacional (CDF) aporta importantes beneficios que enriquecen y fortalecen el estudio: simulación precisa y detallada por lo que su capacidad para realizar simulaciones complejas y de manera eficiente. Aporta con una amplia gama de modelos matemáticos y herramientas de análisis que permiten modelar con gran detalle los fenómenos físicos involucrados en el comportamiento de los envases PET, como el flujo de una gran parte de fluidos conocidos como también en la transferencia de calor de cada material y las tensiones mecánicas. Añadiendo la visualización avanzada de resultados que permiten representar de manera gráfica y detallada los resultados de las simulaciones lo cual facilita la comprensión del comportamiento del envase y el molde en diferentes condiciones y la identificación de zonas críticas o puntos de falla potenciales.

ANSYS fluent ofrece una amplia gama de opciones de análisis que permiten estudiar diversos aspectos del comportamiento del envase de PET los cuales incluyen:

- Distribución de la temperatura.
- Flujo del fluido y fluidos.
- Transporte de gases y líquidos.
- Capacidad en modelar casos de geometrías complejas.

ANSYS fluent se puede integrar con otras herramientas de diseño CAD, como SolidWorks o Autodesk inventor que nos aporta de gran medida al flujo de trabajo y permite transferir los modelos de diseños a la simulación CFD [12].

CAPÍTULO II

ANÁLISIS TÉRMICO

2.1 Proceso de secado de PET

El PET antes de ser inyectado debe ser secado debido a que el PET es higroscópico, el material higroscópico tiene la capacidad de absorber y retener humedad del ambiente. La máxima cantidad de agua que puede tener la resina cuando está en la garganta del extrusor es de 50 ppm, por lo tanto, esta humedad residual reacciona con el PET en la extrusora lo cual da lugar a una caída aceptable de 0.03 a 0.04 en IV [13]. Los niveles más altos de humedad provocan caídas de IV haciendo que el material no sea adecuado para la aplicación. En la siguiente figura 8 se puede apreciar el comportamiento del índice de viscosidad frente a diferentes niveles de humedad.

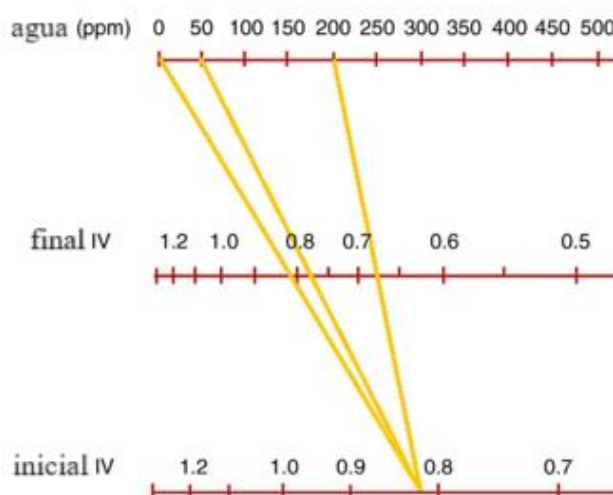


Figura 8. Relación entre humedad y el índice de viscosidad (IV) [13].

En el secado existe parámetros que hacen una combinación de temperatura y tiempo a un flujo de aire determinado. Actualmente los secadores modernos generan el flujo de aire necesario de 4 m³/h por kg, estas condiciones hacen que los procesadores deben determinar un cálculo mediante practicas experimentales en el cual el tiempo de residencia de la resina en la tolva para un trabajo determinado, para realizar esto se coloca una cantidad de pellets encima de la resina de la tolva con el tiempo anotado. Los pellets eventualmente aparecerán en las preformas posterior al proceso se podrá medir el tiempo, dependiendo de la posición de la resina en la tolva, los tiempos en el secado difieren y la resina de la tolva fluye hasta un 20 % más rápido,

con lo que se debe escoger un tiempo de residencia medio. Una vez establecido este tiempo de residencia, se puede elegir la temperatura de secado adecuado. El contenido es proporcional al tiempo de residencia escogido. El flujo de aire se controla mediante un inversor en el motor del ventilador lo cual provoca que se reduzca el flujo de aire cuando la secadora detecta un tiempo de residencia que es demasiado largo.

La temperatura máxima del secado es de 356 °F (180 °C). Por lo tanto, esta temperatura provoca oxidación, que se manifiesta como un color amarillento en la resina, esto sucede ya que la resina no está expuesta todo el tiempo durante el proceso de secado. El aire que entra por el inferior se enfría de manera gradual a medida que se mueve hacia arriba por lo tanto facilita la visión del indicador de salida de aire. Sin embargo, al ya secarse en altas temperaturas es importante que se respete el tiempo de residencia de máximo 6 h. Eso significa que la temperatura de la secadora debe reducirse a un valor de espera de alrededor de 212 °F (100 °C) en el caso de que exista una interrupción de la producción [13].

Es relevante mencionar que un secado inadecuado y la caída resultante en IV puede cambiar el comportamiento de inflación de la preforma haciendo que la preforma se infle bajo una presión más baja porque la NSR es mayor donde NSR significa Non-Scrap Rate o tasa de no-desperdicio. Qué se refiere al porcentaje de material que se convierte en preformas útiles durante el proceso de soplado. Un NSR alto indica que el proceso es eficiente y que se produce poco desperdicio [14].

2.2 Comportamiento del molde inyección

Es de gran importancia que los diseñadores comprendan la parte de la inyección debido a las características y oportunidades particulares y los límites del proceso, así como los posibles defectos que luego pueden afectar a las botellas sopladas a continuación se puede observar los componentes de un molde de inyección en la figura 9.

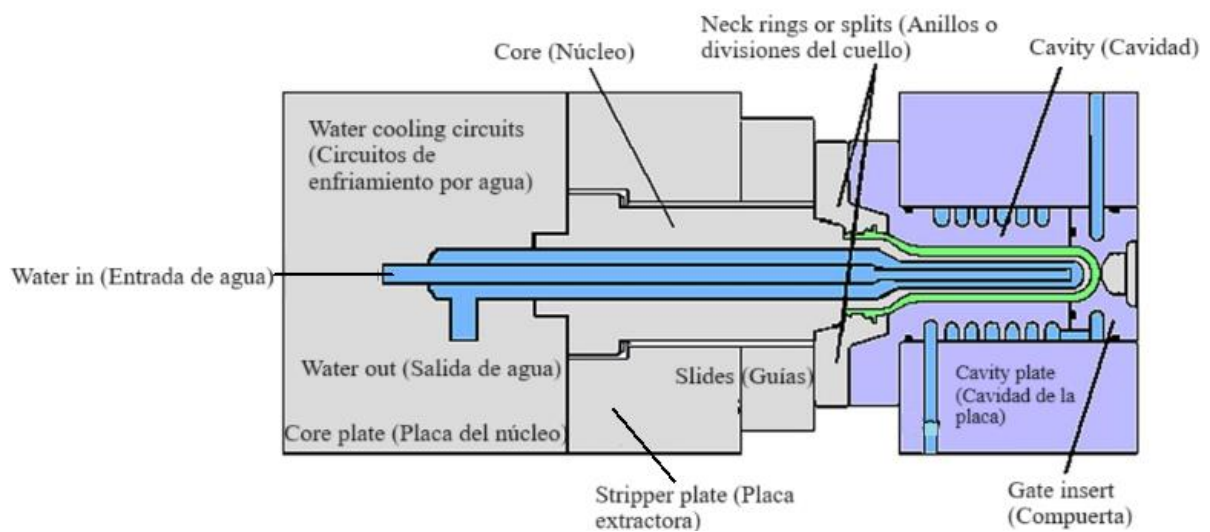


Figura 9. Los diversos componentes de un molde de inyección.

Los moldes de inyección se componen de núcleo macho, la cavidad hembra y el cuello con inserciones, estos últimos deben moverse durante la expulsión de la pieza para liberar el socavado creados por cuentas de hilo. Para este proceso se montan sobre correderas, de esta manera se accionan por levas. Los núcleos y las cavidades son enfriadas con agua. El moldeo por inyección en la que la pared de la preforma es relativamente gruesa, las presiones de inyección son bajas y la velocidad de inyección es baja para así no provocar cortes en el material.

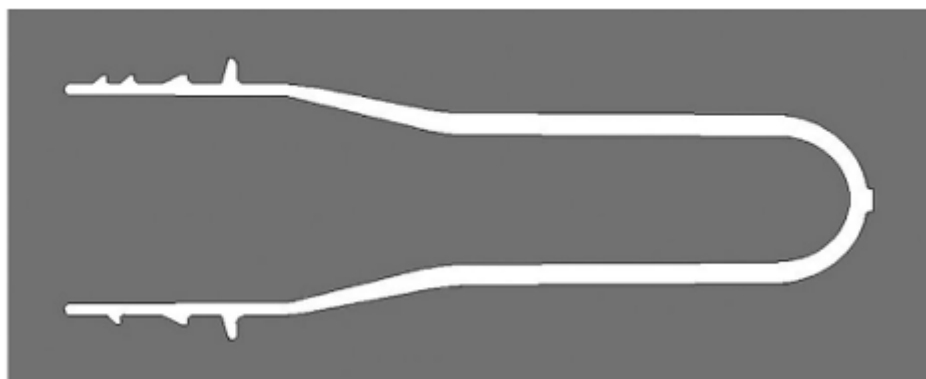


Figura 10. Cavida de preforma vacia [13].

Se inicia la inyección con la herramienta cerrada formando una cavidad vacía como en la figura 11, el material ingresa a la cavidad a través del canal de inyección. De esta manera a pesar de que la presión de inyección sea baja, la presión del material puede doblar el núcleo de inyección

hacia un lado y provocar lo que se conoce como “core shift” desplazamiento del núcleo, con lo que el espesor de la pared de la preforma resultante se vuelve desigual.

Esto aplica para los núcleos delgados de menos de 17 mm, pero también puede ocurrir con los núcleos estándar cuando las guías están desgastadas como se aprecia en la figura 10 y 12 [13].

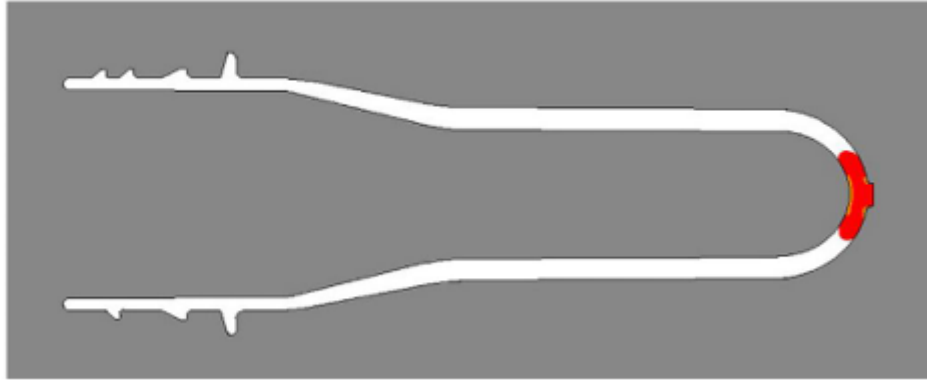


Figura 11. Inyección 1 [13].

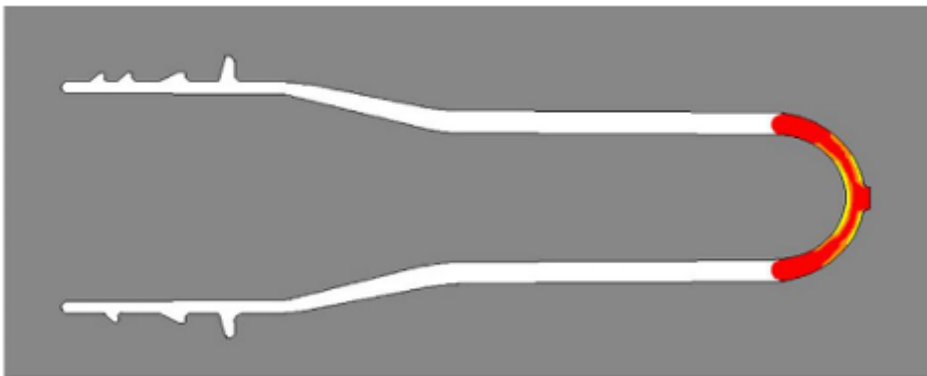


Figura 12. Inyección 2 [13].

Cuando el material caliente golpea las paredes frías del molde, la resina en contacto directo con la pared se congela y forma una capa límite. El material de esta capa no cambiará durante la inyección por lo tanto el espesor restringe el canal del molde que es una de las razones por las que se debe mantener un espesor mínimo de pared en el área de la entrada de la preforma como se observa en la figura 13.

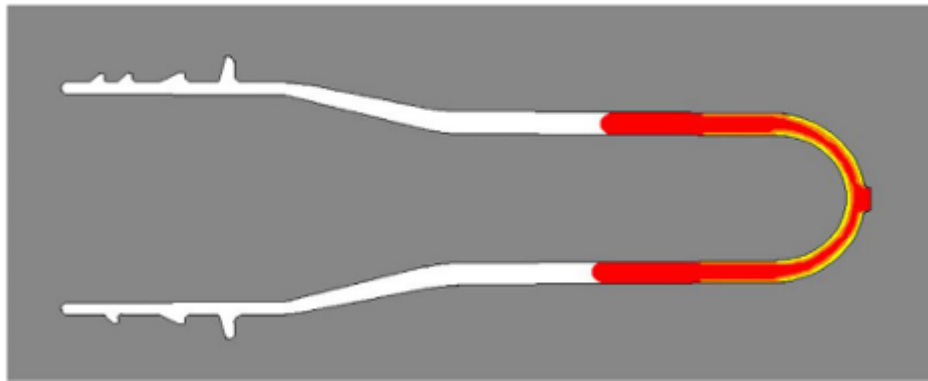


Figura 13. Inyeccion 3 [13].

A medida que entra más material en la cavidad, la capa límite se expande a lo largo de la preforma. Su espesor permanece igual mientras fluye material caliente. El aire que se encuentra dentro de la cavidad del molde debe tener una vía de escape. De lo contrario, el aire atrapado provocaría marcas de hundimiento en las preformas. Se mecanizan de cuatro a ocho respiraderos de aproximadamente 0.001 a 0.0015 mm de profundidad en el área del cuello de la preforma, lo que permite que el aire salga. También se evitan las marcas de hundimiento y se mejora el flujo de material al darle a los núcleos un acabado en la dirección del flujo de material en lugar de radialmente [13]. Esto se logra mediante una maquinaria especial que gira los núcleos y al mismo tiempo mueve una piedra de pulido hacia adelante y hacia atrás del eje longitudinal del núcleo en la ilustración de la figura 14.

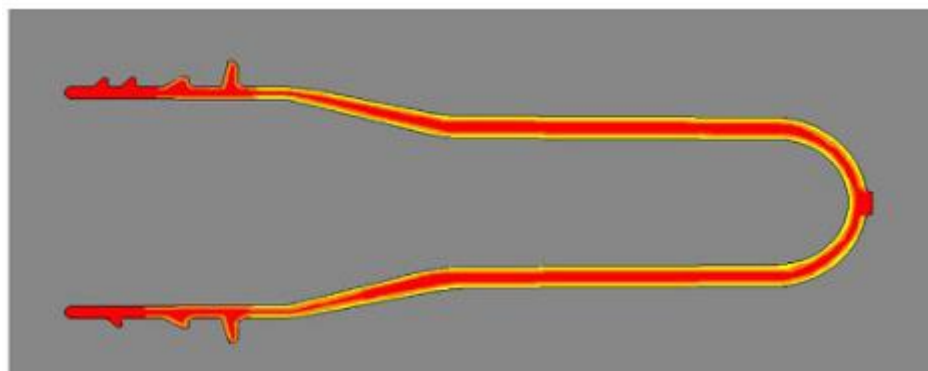


Figura 14. Fin de la inyeccion [13].

En este punto del proceso de inyección, la cavidad ya está llena. La resistencia adicional hace que la presión hidráulica aumente y es aquí donde es necesario cambiar la máquina de inyección a retención de empaque.

Esto se puede hacer usando la presión real como ajuste para activar la presión de retención, pero para el PET un disipador basado en la posición ha demostrado ser más consistente y por lo tanto se usa de manera exclusiva. El punto ocurre en el que ocurre este suceso se llama punto de tracción o cambio. Durante la fase de retención, el material que ahora comienza a encogerse a medida que se enfría se reemplaza a través del centro aun abierto de la corriente fundida. Esto es necesario para evitar marcas de hundimiento en la ilustración de la figura 15.

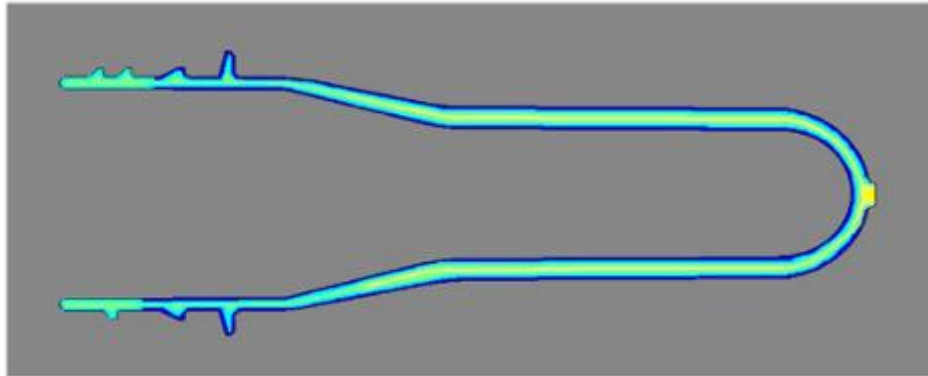


Figura 15. Tiempo de enfriamiento [13].

Durante el tiempo de enfriamiento, el material ahora se enfría de forma rápida y se contrae sobre el núcleo en el proceso. Principalmente el área de entrada de la preforma siempre permanece más caliente por lo que es la última parte de la preforma en recibir material caliente. La mayoría de los defectos de las preformas como la turbidez o se ve opaco [13].

En el moldeo por estirado-soplado de monoetapa, la zona caliente del canal de inyección limita la procesabilidad de la preforma ya que la temperatura no se puede ajustar completamente, sino que es el resultado del espesor de la pared y los parámetros de inyección.

Cuando surgen problemas con una preforma particular, los diseñadores deben tener en cuenta los diversos aspectos del proceso del moldeo por inyección y los parámetros de secado. En Primer lugar, deben asegurarse de que las preformas se procesaron de manera correcta antes de realizar cambios en la forma de la preforma [13].

2.3 Comportamiento en el molde de soplado

2.3.1 Relación de estiramiento natural o relación de estiramiento intrínseca

La relación de estiramiento o alargamiento de un polímero es la razón entre la longitud final (en la dirección del esfuerzo aplicado) y la longitud original. Cuando el PET se estira, por ejemplo, durante el moldeo por soplado, donde llega a un punto límite en el que se requiere aumentar la fuerza para seguir estirándolo. El punto en el que el PET requiere esta fuerza adicional se denomina NSR (Natural Stretch Ratio), para un conjunto específico de condiciones de estiramiento. La NSR se alcanza cuando se produce un endurecimiento por deformación (o trabajo) en la curva de tensión-deformación de los materiales. Recuerde que antes de que un material ceda, una vez que se elimina la fuerza aplicada, puede volver a sus dimensiones originales. El estiramiento más allá del punto de fluencia produce una deformación permanente, y un estiramiento adicional provocará una fractura. En algunos materiales, incluido el PET, el endurecimiento por deformación puede ocurrir antes de la fractura, que es esencialmente la alineación (u orientación) de las regiones estructurales del material en la dirección del esfuerzo aplicado, lo que puede resultar en mejores propiedades físicas del material.

El diseño de una preforma de PET es tal que durante el estirado-soplado, la orientación óptima se logra justo cuando las paredes estiradas se encuentran con el molde. Este punto ocurre justo después de la NSR. Un estiramiento adecuado da como resultado una vida útil más larga y menor permeabilidad al gas, por ejemplo, una mayor retención de dióxido de carbono para las bebidas gaseosas. El estiramiento excesivo da como resultado una apariencia "perlada" a la botella, lo que indica microgrietas (fractura) y una deformación excesiva [13].

2.3.2 Relación entre el IV y la Relación de Estiramiento Natural (NSR)

Una resina con un IV bajo tiene una NSR más alta que una resina con un IV alto. Las cadenas poliméricas en una resina de IV bajo son más cortas, por lo tanto, están menos enredadas y se pueden estirar fácilmente más que una resina de IV alto. En la resina de IV alto, el enredo de cadenas limita la cantidad de estiramiento; similar a tratar de tirar de un extremo de una bola de hilo enredada donde los nudos limitan la longitud que se puede extraer. Por esta razón, los diseños de preformas difieren cuando se considera PET de IV bajo o alto [13].

2.3.3 Diagramas ilustrativos de la tensión-deformación

Los siguientes diagramas ilustran el estiramiento del material en el molde de soplado sin relacionarse con datos reales. La deformación (alargamiento) se representa en el eje horizontal y la tensión correspondiente en el eje vertical. Para obtener estos datos, se podría tirar de una tira de prueba de PET calentada en una máquina especial que registra la fuerza de tracción y el alargamiento de la tira [13].

2.3.4 Relación con el proceso RSBM

En la fase de moldeo por estirado-soplado por rehervido (RSBM), la varilla de estiramiento y el aire de soplado proporcionan la tensión necesaria para transformar la preforma en una botella. Las Figuras 16–18 indica la etapa de la preforma en el molde de soplado.

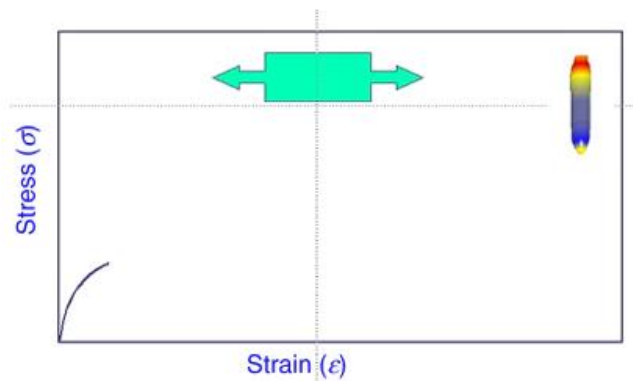


Figura 16. La deformación elástica ocurre cuando la varrilla de estiramiento comienza a mover el material hacia el molde de soplado [13].

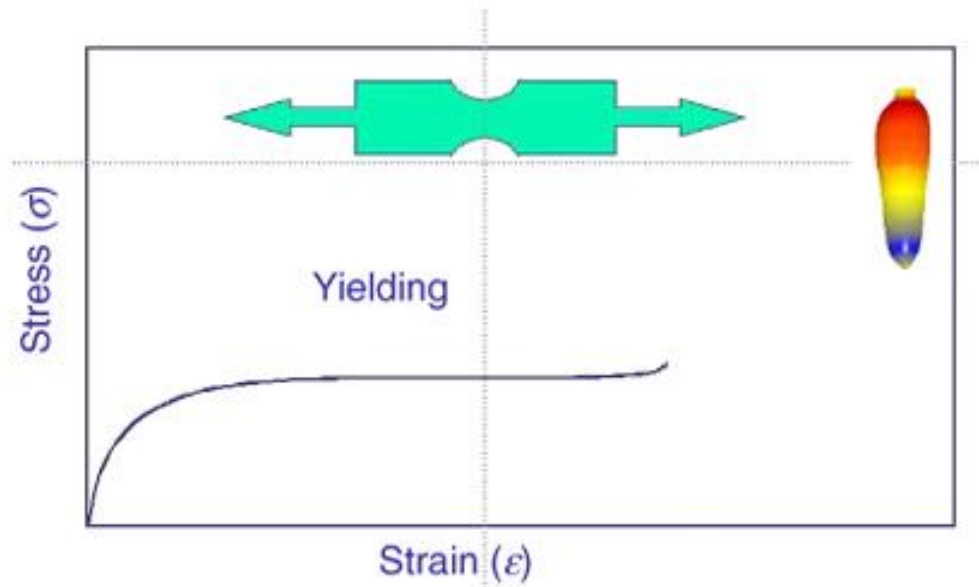


Figura 17. En la curva de tensión- deformación la región plana de la curva despues del punto de cedencia el material alcanza su límite [13].

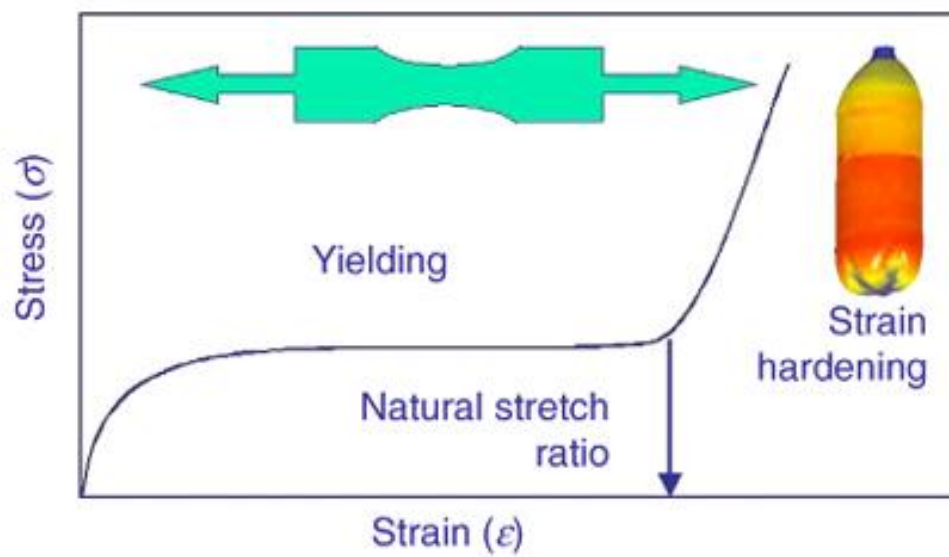


Figura 18. Alta presión de soplado obliga al material a endurecerse por deformación [13].

2.3.5 Deformación elástica

La primera etapa es la zona de deformación elástica. En esta etapa, el material se estira, pero volverá a su forma original si se elimina la tensión. Esto es similar a cómo se comportan los metales, aunque la forma de la curva es ligeramente diferente. Observando que la preforma en esta etapa se puede comparar al momento en que la varilla de estiramiento comienza a empujarla. Si se retrae la varilla de estiramiento, la preforma se encogería casi hasta su longitud original [13].

2.3.6 Yielding (Cedencia)

La segunda etapa es la cedencia. Sin un aumento en la tensión, el material "cede", elongándose fácilmente. Esto es lo que sucede en el molde de soplado cuando el aire de pre-soplado infla parcialmente la preforma. La preforma continuará inflando hasta alcanzar la NSR (Relación de Estiramiento Natural), el punto después del cual se necesita una tensión más alta para lograr un mayor alargamiento.

La tercera etapa se llama endurecimiento por deformación. Los niveles de tensión aplicados deben aumentar exponencialmente para obligar al material a estirarse aún más. Este es el punto en el proceso de soplado cuando el aire a alta presión ingresa a la preforma y la obliga a estirarse desde una burbuja hasta las paredes de la cavidad de soplado, donde se enfría rápidamente. Es durante la fase de endurecimiento por deformación que el material logra la orientación [13].

2.3.7 Parámetros relevantes

El IV, la temperatura y el contenido de copolímero son de importancia en determinar, cuánto se estira el material durante la cedencia y qué fuerza se requiere para estirarlo aún más. El acondicionamiento de temperatura permite al operador mejorar el proceso de moldeo por soplado al hacer que ciertas partes de la preforma estén más calientes o frías, y así modificar la forma en que se estirarán como en la figura 19.

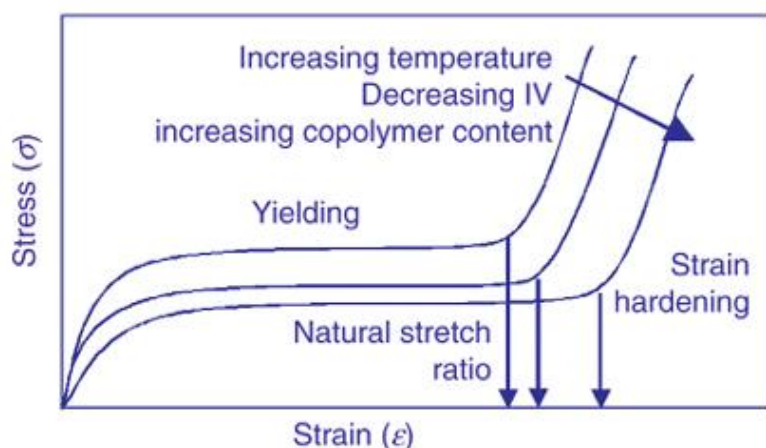


Figura 19. Factores influyentes en la determinación del NSR (Relación de estiramiento natural) [13].

2.3.8 Datos de propiedades para el PET

Como la fase de endurecimiento por deformación del proceso es tan importante para el rendimiento de la botella, el diseño correcto de la preforma, el perfil de temperatura y la temporización del aire de soplado son necesarios para garantizar la mejor botella. Si la preforma inflada llega al molde de la botella durante la etapa de pre-soplado, la orientación no ocurre en un grado suficiente y la botella terminada podría fallar en varias pruebas en la Tabla 1.

El objetivo del diseño (o selección) de la preforma y del proceso de moldeo por soplado es lograr una adecuada coincidencia entre la NSR (Relación de Estiramiento Natural) de la preforma en las condiciones de moldeo y las relaciones de estiramiento del diseño de la combinación preforma/botella.

Tabla 1. Propiedades del PET que se benefician de un alto grado de orientación [13].

Propiedades	No orientado	Orientado
Espesor (mm)	0.36	0.36
Tasa de transmisión de vapor de agua ($\text{g/m}^3 \times 24 \text{ h}$)	3.4	2.3
Permeabilidad al oxígeno ($\text{cm}^3 \times \text{mm/m}^2 \times 24 \text{ h} \times \text{atm}$)	2.9	2.2
Permeabilidad al dióxido de carbono ($\text{cm}^3 \times \text{mm/m}^2 \times 24 \text{ h} \times \text{atm}$)	15.7	14
Módulo de elasticidad a la tracción (MPa)	3170	4960
Esfuerzo de tracción en el límite elástico (MPa)	82	172

2.3.9 Acetaldehído (AA) en botellas de PET

El acetaldehído (AA) es un edulcorante natural presente en todos los cítricos y se utiliza a menudo como edulcorante en bebidas. También es un subproducto del calentamiento del PET, especialmente al calentarse hasta llegar a la temperatura de fusión. Su importancia en la industria del PET está relacionada con la producción de botellas de agua. El sabor del agua sin gas es muy sensible incluso a pequeñas concentraciones de AA, mientras que el contenido de azúcar en las bebidas carbonatadas y jugos enmascara por completo cualquier sabor aportado por el AA. Los productores de preformas para otras bebidas aún pueden controlar el contenido de AA como una forma de seguir el estado de mantenimiento del tornillo y el barril, ya que cuando estas piezas se desgastan, aumenta la tensión de cizalladura y con ella la creación de AA [13].

2.4 Métodos de calentamiento

2.4.1 Lámparas infrarrojas

Las lámparas infrarrojas consisten en filamentos de tungsteno sellados dentro de tubos de cuarzo. El cuarzo es transparente a la radiación infrarroja y puede soportar las altas temperaturas que genera la lámpara. La temperatura del filamento determina la longitud de onda electromagnética emitida como se logra obtener en la tabla 2.

Los tubos se llenan con halógeno y un gas inerte para evitar la oxidación y el ennegrecimiento del tubo, además de reducir la temperatura de funcionamiento a aproximadamente 800 °C (1472 °F). La emisión máxima de la lámpara se produce a 1200 nm, que es óptima para el procesamiento de PET.

Las secciones de pinzamiento de la lámpara, donde el filamento de tungsteno se conecta al suministro eléctrico, deben mantenerse por debajo de 350 °C (662 °F). De lo contrario, la película de molibdeno en los contactos comienza a oxidarse y el pinzamiento puede agrietarse, provocando una fuga en la lámpara. La mayoría de los hornos tienen ventiladores en la parte posterior de las lámparas para lograr esto y también monitorean la temperatura con termocuplas especiales. Nunca se debe tocar las superficies de la lámpara, ya que el aceite de la piel puede transferirse y dejar marcas de quemaduras. En caso de que suceda, las lámparas deben limpiarse con alcohol [13].

Tabla 2. Relación entre el porcentaje de funcionamiento, los voltajes utilizados y la salida de temperatura de una lámpara infrarroja común [13].

Porcentaje operativo	Voltaje respectivo (V)	Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
40	88	1800	1527	2780
70	154	2000	1726	3140
100	220	2600	2327	4220

Esto tiene un impacto de mucha importancia en el consumo de energía y los compradores deben examinar cuidadosamente los datos proporcionados por los fabricantes. Los reflectores semicirculares en la parte posterior de las lámparas han demostrado ser una mejora significativa en este sentido.

También debe tenerse en cuenta que, si bien estas lámparas emiten un amplio espectro de ondas de luz, solo algunas son óptimas para el PET. Los calentadores de infrarrojo cercano (NIR) concentran más la salida en el rango de 1000 nm, lo que es especialmente adecuado para penetrar las paredes de la preforma. Los hornos con estos calentadores pueden reducir el tiempo de calentamiento, mejorar parámetros, espacios, los costos de energía, por lo tanto, los fabricantes han comenzado a equipar sus hornos con ellos [13]. La figura 20 se aprecia el proceso de fabricación de las preformas mediante calefactores de lámparas infrarrojas.

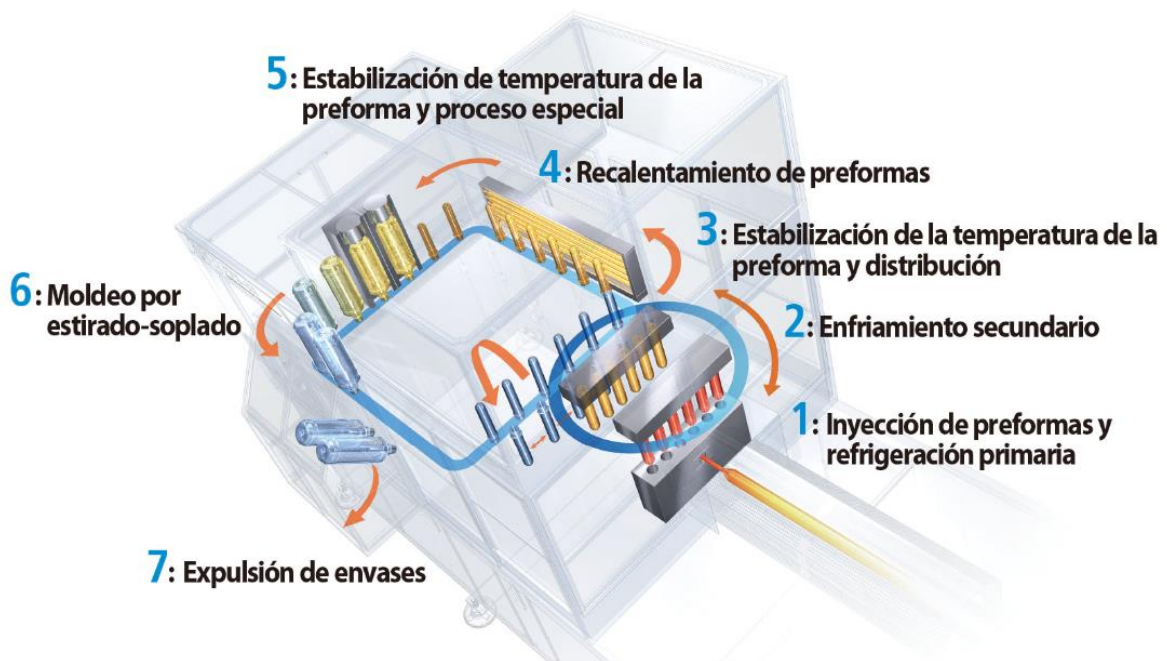


Figura 20. Proceso de fabricación de preformas PET, sección 4 (calefactores infrarrojos).

2.4.2 Otros métodos de calentamiento

Un sistema de calentamiento completamente diferente utiliza ahora rayos microondas en lugar de lámparas infrarrojas como se representa en la figura 21. Se dice que el tiempo de calentamiento es de alrededor de 3 segundos, lo que permite el uso de solo 16 mandriles de calentamiento para una máquina de moldeo por soplado de ocho cavidades en comparación con los 160 mandriles de un sistema de horno convencional. Esto reduce significativamente el tiempo de cambio para un acabado de cuello diferente. El infrarrojo estándar emite longitudes de onda favorables por debajo de $1.5\ \mu\text{m}$ ($1500\ \text{nm}$), solo a altas velocidades de salida de $3500\ \text{K}$, mientras que NIR las ofrece en un rango más amplio. Diagrama cortesía de Adphos Group [13].

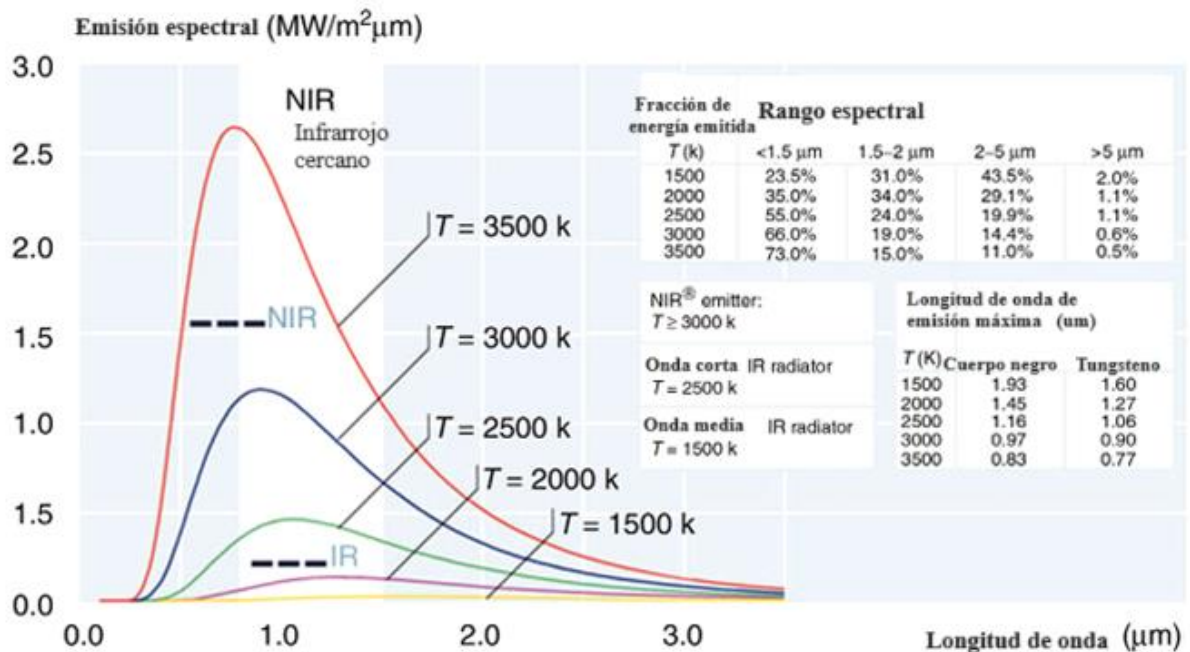


Figura 21. Emisión espectral de diferentes cuerpos negros a distintas temperaturas. [13].

Las preformas absorben el 95 % de la energía de microondas con una excelente penetración independientemente de su color, eliminando la necesidad de enfriamiento por ventilador y tiempo de igualación. Las estaciones de microondas están montadas en un sistema de horno rotatorio en lugar de uno lineal, haciendo que la sección del horno sea muy compacta.

Otra ventaja es que el acabado del cuello no necesita protección, lo que permite abrir la puerta para un mejor procesamiento de envases de boca ancha. Una posible desventaja es que no es posible perfilar la salida de calor. Esto significa que el diseño de la preforma debe ser perfecto

para que una preforma calentada uniformemente produzca una botella con un grosor de pared uniforme. Este es un paso emocionante hacia un menor consumo de energía y un mejor control sobre la temperatura de la preforma, y veremos hasta dónde puede llegar [13].

Otro enfoque nuevo es el calentamiento con rayos láser. Los rayos creados por láser de diodo se emiten en el espectro del infrarrojo cercano (NIR) y se dirigen con mucha precisión a las diversas áreas de la preforma con calor por convección limitado.

2.4.3 Enfriamiento por ventilador

Además de enfriar las lámparas y reflectores, los sistemas de horno también deben proporcionar enfriamiento a las preformas. Los diseñadores utilizan exclusivamente sopladores de aire para esta tarea, y las máquinas difieren en el número, tamaño, ubicación y control de estos ventiladores [13].

Los métodos más básicos emplean ventiladores equipados con motores de velocidad fija para la regulación del flujo de aire. En contraste, los sistemas más avanzados utilizan motores de velocidad variable, permitiendo un control más preciso del flujo de aire. En estos sistemas sofisticados, las termocuplas instaladas en el horno proporcionan datos para correlacionar la influencia del ventilador sobre el ambiente térmico del horno. Los compradores deben evaluar cuidadosamente los datos proporcionados por los fabricantes para garantizar una eficiencia del horno que puede estar disponible, pero no siempre es recomendable debido a las posibles variaciones en las condiciones operativas y los requerimientos específicos del proceso.

Es relevante mencionar que la temperatura de la preforma se establece en 90 °C y la temperatura del horno en 85 °C, ambos en control automático. Supongamos que la temperatura de la planta aumenta durante el día, como es común en los meses de verano en climas del norte. Si las preformas se calientan, la máquina regula la potencia de las lámparas hacia abajo. Esto conduce a una bajada en la temperatura del horno. Si esta bajada es mayor a la temperatura del aire, el ventilador reducirá su velocidad, lo que provocará un aumento de la temperatura de la preforma y las lámparas se reducirán aún más para compensar. Los dos circuitos reguladores básicamente lucharían entre sí a menos que el aumento del cambio de temperatura ambiental afecte a ambas partes en el mismo porcentaje, lo que en realidad podría conducir a una sobre-regulación cuando la potencia de la lámpara disminuye y la velocidad del ventilador aumenta al mismo tiempo.

Por lo tanto, a menudo es mejor controlar solo la temperatura de la preforma en circuito cerrado y controlar la temperatura del horno manualmente [13].

2.5 Funciones de transferencia

2.5.1 Relaciones de estiramiento

Para comprender mejor lo que necesita lograr el proceso, al estudiar cómo se calculan las relaciones de estiramiento entre la botella y la preforma y las diferencias de temperatura en la pared de la preforma las afectan. Si bien no existe un estándar aceptado en la industria sobre cómo se calculan las relaciones de estiramiento, es seguro decir que representan la relación entre las dimensiones de la botella y las dimensiones correspondientes de la preforma. Hay dos tipos de relaciones de estiramiento:

- Relación de estiramiento axial: divide la longitud de la botella por la longitud de la preforma medida desde debajo del anillo de soporte del cuello (NSR) hasta el extremo de la botella y la preforma como se representa en la figura 22.
- Relación de estiramiento circunferencial: La relación de estiramiento circunferencial se evalúa mediante tres métodos distintos. En primer lugar, se compara el diámetro exterior de la botella con el diámetro exterior correspondiente de la preforma. La tercera forma es dividiendo el diámetro promedio de la botella por el diámetro promedio correspondiente de la preforma.

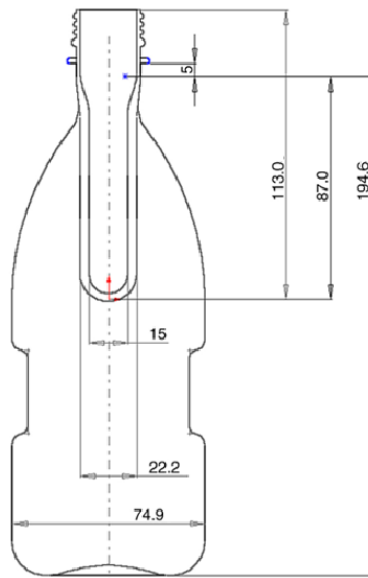


Figura 22. Relación de estiramiento axial (NSR) de envase PET 500 ml [13].

Tomando la Figura 22 como ejemplo: a continuación, se muestran tres relaciones de estiramiento calculadas en la tabla 3.

Tabla 3. Ejemplo relación estiramiento [13].

Relación estiramiento	
Relación de estiramiento del diámetro exterior (máx)	$74.98/22.2 = 3.38$
Relación de estiramiento del diámetro interior (Máx)	$74.58/15 = 4.97$
Relación de estiramiento axial	$199.63/92.05 = 2.17$

La relación de estiramiento interno es significativamente mayor (47 % en este caso particular, aunque puede variar según el grosor de la pared de la preforma) en comparación con la relación de estiramiento externo. Esto se debe a que el grosor de la pared de la botella es considerablemente menor que el de la preforma, resultando en una pequeña diferencia entre los diámetros interno y externo de la botella, mientras que existe una diferencia mucho mayor entre los diámetros interno y externo de la preforma. En términos prácticos, las regiones más cálidas del material tienden a estirarse con mayor facilidad que las áreas más frías debido a la variación en la viscosidad del polímero a diferentes temperaturas.

Como las paredes internas de la preforma deben estirarse más, podemos postular que deberían estar a una temperatura más alta que las paredes externas. Sin embargo, el calor ingresa a la preforma desde el exterior por medio de las lámparas infrarrojas, por lo que parece un desafío bastante difícil lograr que la pared interna alcance una temperatura más alta. Para comprender cómo se puede lograr esto en realidad, necesitamos entender cómo las lámparas del horno calientan las preformas de PET [13].

2.5.2 Transferencia de calor

Existen tres formas de transferir calor y las tres están presentes en una máquina de estirado-soplado por calentamiento.

- Conducción
- Convección
- Radiación

Conducción: La conducción ocurre cuando dos partes se tocan y el flujo de calor se trasfiere de la parte más caliente a la más fría. Un ejemplo en las practicas industriales es un mandril caliente que transfiere calor al cuello de la preforma. La conducción no es adecuada para recalentar porque el PET, como la mayoría de los plásticos, es un mal conductor y tomaría demasiado tiempo recalentar las preformas de esta manera [15].

Convección: es un proceso térmico donde la transferencia de calor tiene participación con el movimiento del aire. El calentamiento del aire en los hornos de la máquina de soplado depende de la temperatura de este aire y puede calentar o enfriar el exterior de las preformas. La calefacción por aire es difícil de controlar, por lo que esta influenciada por las condiciones ambientales y, además, calienta más el exterior de la preforma que el interior, lo opuesto a lo que se requiere [15].

Radiación: La salida de las lámparas del horno irradia hacia las preformas en forma de ondas. Estas ondas pueden ser absorbidas fácilmente por el PET o penetrar con poca absorción. Cuando se produce la absorción en la superficie, se transfiere una gran cantidad de calor directamente a la superficie exterior de la preforma. Desde allí, viajaría por conducción hacia el interior. Este comportamiento es indeseable ya que la pared exterior se sobrecalentaría y la pared interior permanecería más fría. Por lo tanto, un alto grado de absorción superficial no es adecuado para un calentamiento correcto [15].

2.5.3 Características de absorción de luz del PET

Las lámparas del horno se pueden ajustar en un rango de voltaje de 0 a 220 V. En algunas máquinas, un ajuste de porcentaje de 0 a 99 % indica esto. Una característica menos comprendida de este control es que la salida de voltaje afecta tanto la temperatura como la longitud de onda. En esta sección el espectro electromagnético en micrómetros (una millonésima de metro) o nanómetros (una milmillonésima de metro) y 1000 nm equivalen a 1 μm . Si bien todas estas lámparas funcionan en el espectro infrarrojo, este espectro varía de 0.7 a 100 μm y depende del ajuste de voltaje, qué longitud de onda emite la lámpara [13].

Cabe señalar que, si bien las lámparas funcionan principalmente en el espectro infrarrojo, también emiten longitudes de onda a ambos lados de este rango. Las ondas más cortas de 400 a 700 nm están en el espectro visible como se muestra en la figura 23.

La figura 24 muestra cómo el PET absorbe la salida de las lámparas infrarrojas según la longitud de onda. Se registró emitiendo en diferentes longitudes de onda mostradas como el eje horizontal a través de una tira de PET y midiendo la longitud de onda después de que rebotó en un reflector.

A la izquierda del eje horizontal están las ondas cortas. Aquí, el PET absorbe hasta el 50 % de la radiación emitida. Entre aproximadamente 1000 y 2200 nm, la absorción es de alrededor del 20 %, y el 80 % del calor se pierde. En ondas más largas, a la derecha del eje, la absorción aumenta nuevamente. Las altas tasas de absorción conducirían a un sobrecalentamiento de la piel exterior de la preforma, lo que es perjudicial para un perfil de calor óptimo. Por lo tanto, la mayor parte de la salida de la lámpara debe estar entre 1000 y 2200 nm. Esta es la salida que emite la lámpara a un voltaje de 220–110 V o 100–50 %. Si bien esto es un proceso derrochador, permite que las ondas de calor penetren las paredes de la preforma de manera uniforme, calentando las paredes interior y exterior aproximadamente en el mismo grado como se aprecia en las figuras 25–27.

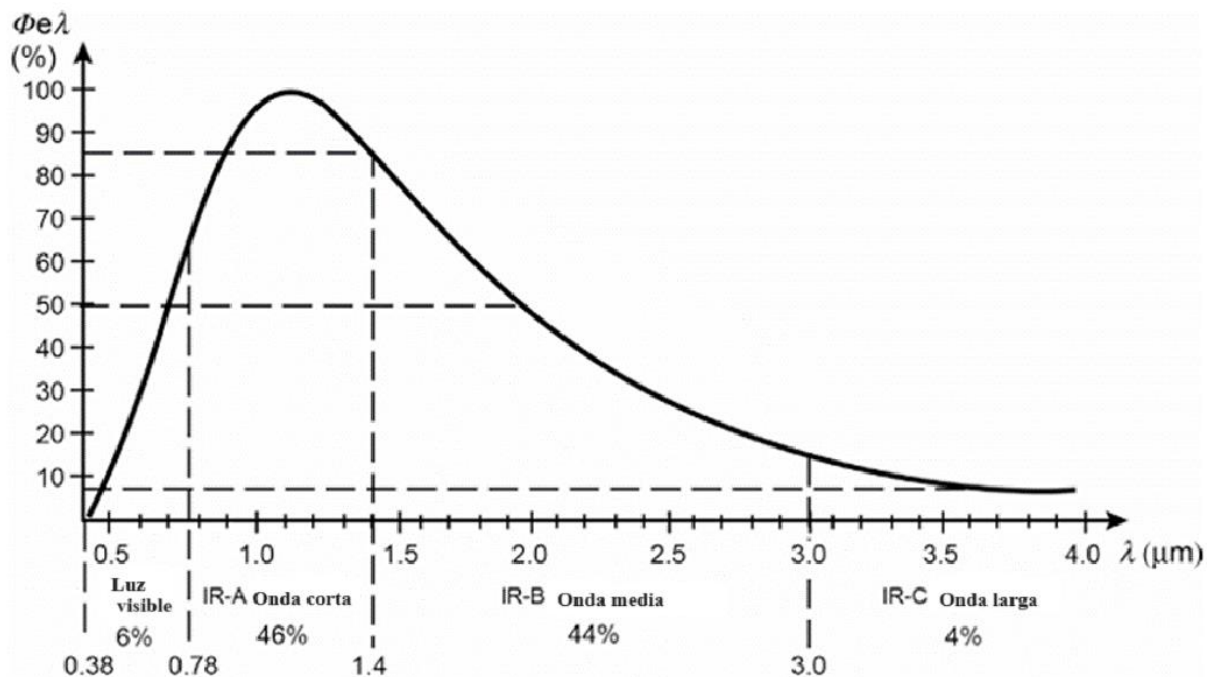


Figura 23. Rango típico de longitudes de onda emitidas por lámparas infrarrojas [13].

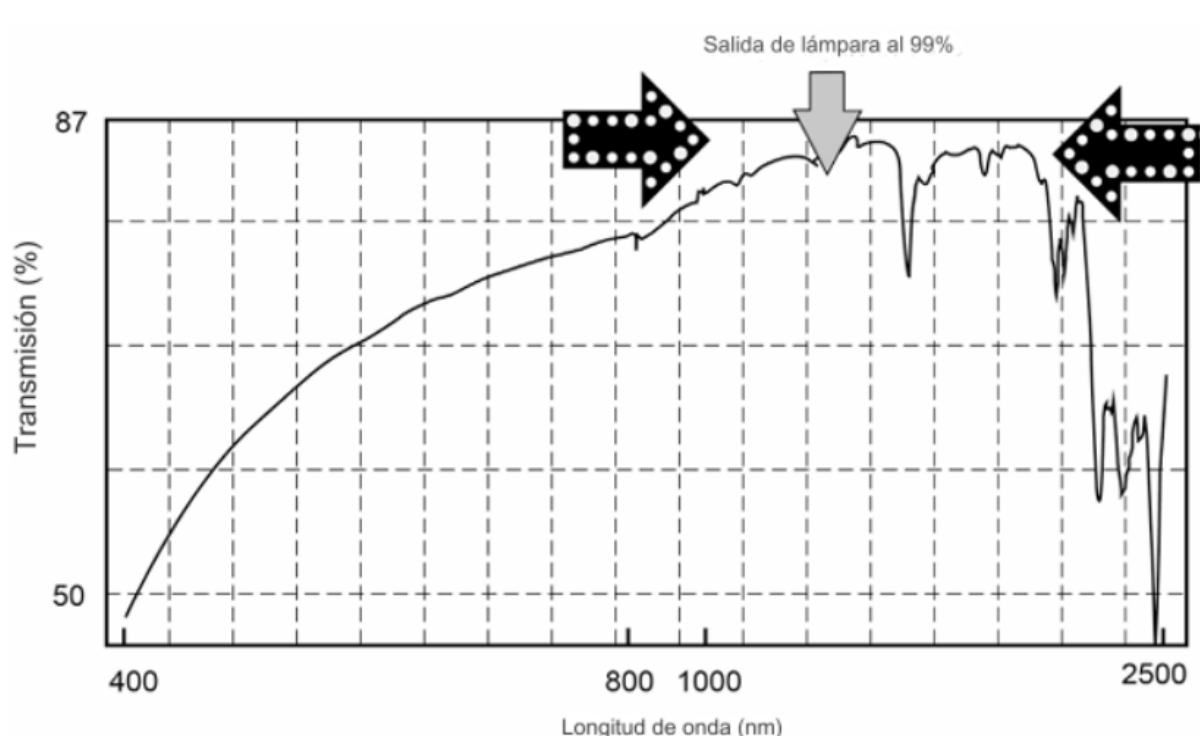


Figura 24. El ajuste de las lámparas modifica el flujo de calor y desplaza la longitud de onda óptima hacia el rango indicado[13].

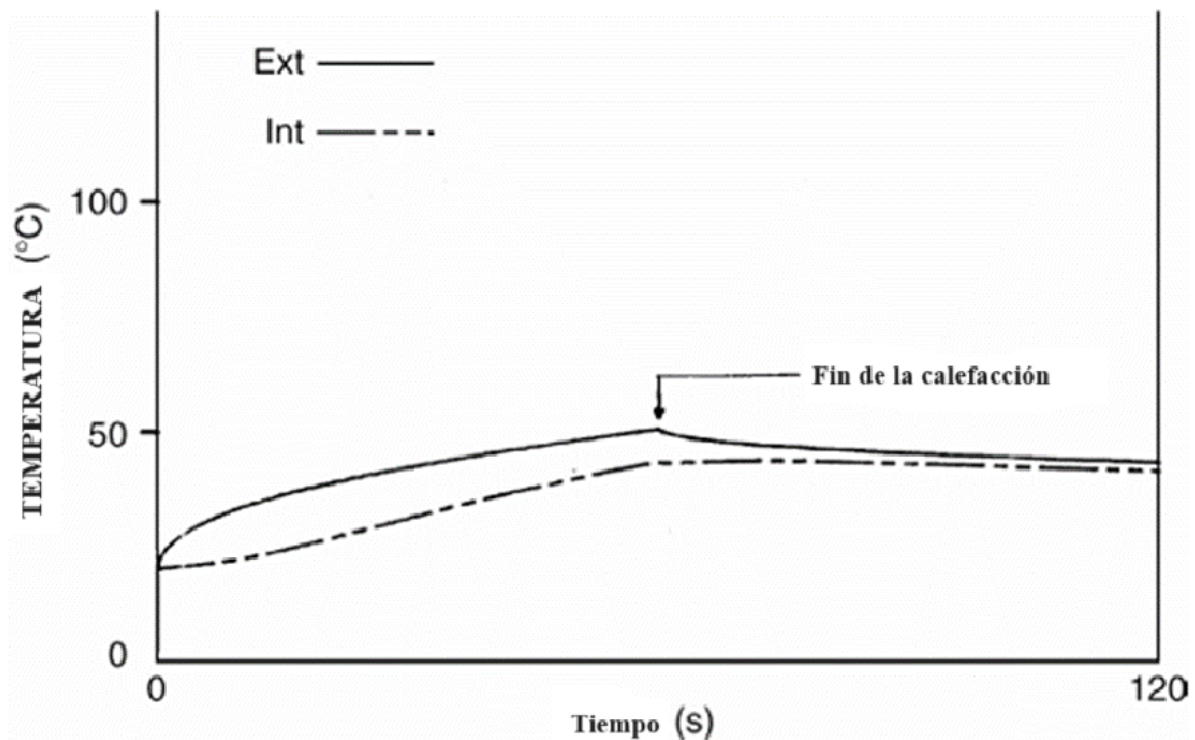


Figura 25. Temperatura empírica de la pared interior y exterior de la preforma con un rendimiento de lámpara del 40 %, la temperatura interior se retrasa [13].

Ahora que las preformas se recalientan de manera uniforme, el siguiente paso es enfriar la pared exterior de la preforma. Esto se logra soplando aire dentro de los hornos a una velocidad lo suficientemente alta como para bajar la temperatura que sea debajo de la temperatura de soplado. Este aire absorberá más calor del exterior de la pared de la preforma que del interior, ya que entra en más contacto con él.

Se ha comprobado que una temperatura del horno de 85 °C (185 °F) es lo suficientemente baja para facilitar este efecto. Sin embargo, las lecturas de temperatura del horno dependen en gran medida de dónde esté montado el termopar y cuántas lámparas se utilicen. Si las lámparas más cercanas al termopar están en un porcentaje alto, la lectura será más alta solo por esto y no porque la temperatura sea realmente más alta. Si el termopar se montara a cierta distancia de las lámparas, digamos, en algún lugar del conducto de escape, daría una lectura más confiable de la temperatura que nos interesa cuando se trata del calentamiento de la preforma, pero entonces no nos daría una buena imagen del calor dentro del horno. En resumen, esta lectura debe tomarse con precaución [13].

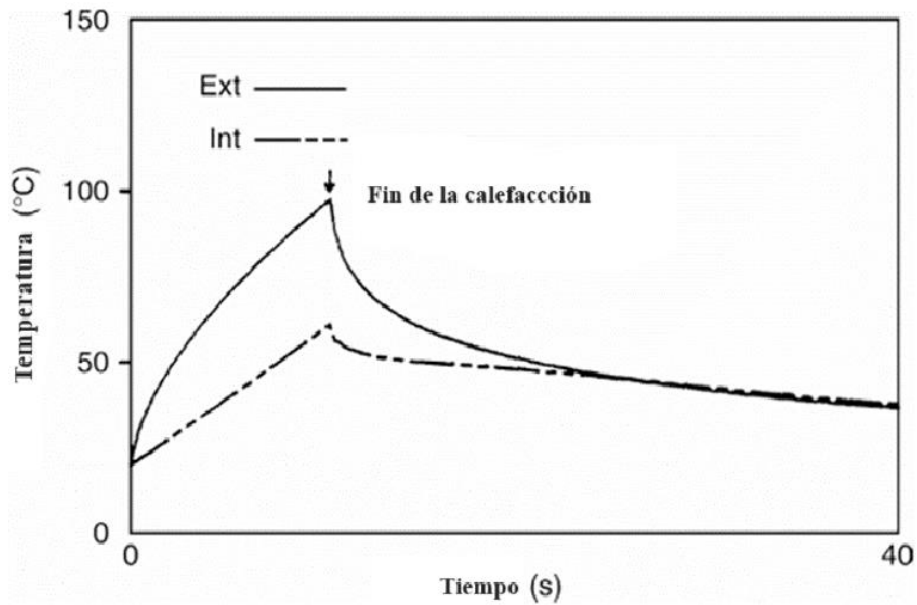


Figura 26. Temperatura empírica de la pared interior y exterior de la preforma con un rendimiento de lámpara del 70 %. La alta absorción en la pared exterior conduce a una gran diferencia [13].

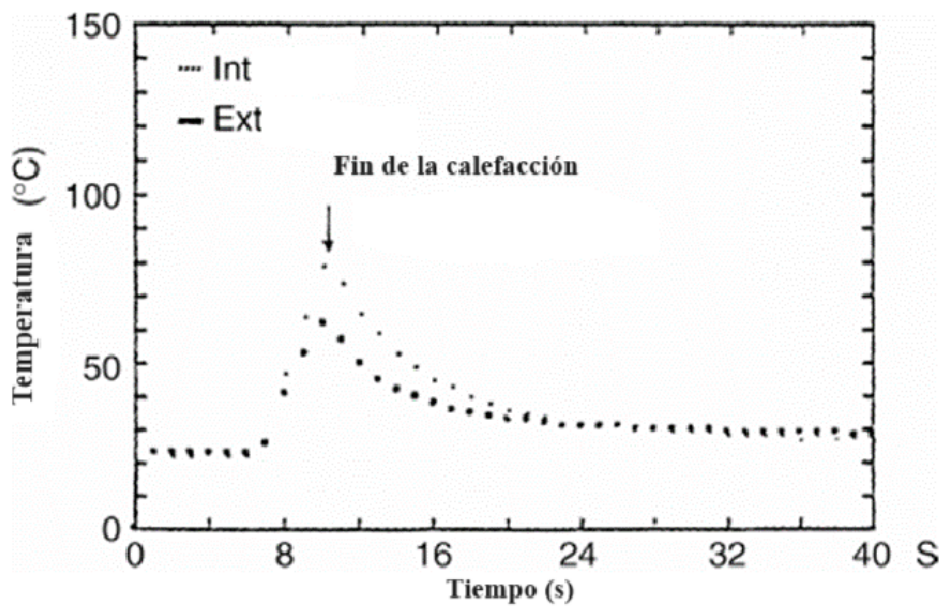


Figura 27. Temperatura reales de la pared interior y exterior de la preforma al 100 % [13].

Para que el enfriamiento por aire sea efectivo, una máquina de soplado debe tener dos características:

- Un termopar en un horno que mida la temperatura del horno.
- Un motor de velocidad variable para el ventilador de extracción de aire.

El termopar debe estar protegido de la radiación de la lámpara y estar en la corriente de aire que enfría las preformas, no en la que enfría las lámparas. El ventilador debe expulsar eficazmente el aire caliente del sistema para que la temperatura del horno se pueda controlar en una variedad de condiciones del proceso.

La lectura de este termopar debe tomarse con precaución. Dependiendo de qué tan alto en el horno esté montado y si las lámparas superiores están encendidas o no, las lecturas pueden diferir en una cantidad significativa. La lectura es útil para verificar las diferencias una vez que se ha establecido una temperatura adecuada del horno, no obstante, no es posible dar una recomendación que se adapte a todas las circunstancias.

El tiempo para equilibrar es otra forma de igualar las diferencias de temperatura a través de la pared de la preforma.

El equilibrado ocurre cuando las preformas salen de la sección del horno de camino a la estación de soplado, así como entre hornos. El tiempo dedicado al equilibrio depende de la longitud física de la pista entre el calentamiento y el soplado y la velocidad de rendimiento. Debido a una mayor exposición al ambiente exterior a los hornos, las paredes exteriores de la preforma tienden a enfriarse más que las paredes interiores, lo que contribuye a un perfil de temperatura óptimo. Algunas máquinas tienen espacio adicional en la sección de calentamiento para permitir mover los hornos para un equilibrado correcto [13].

2.6 Temperatura óptima de la preforma

Ahora que hemos establecido el perfil de temperatura óptimo dentro de la pared de la preforma, es hora de considerar la temperatura general de la preforma. El PET tiene una ventana de proceso de temperatura de 90 a 115 °C. Temperaturas más altas provocan la cristalización del material. Esto se vuelve visible por primera vez como nubosidad o neblina cuando la cantidad de cristalización alcanza alrededor del 4 %. Dado que el material cristalino reduce muchas propiedades de la botella, la neblina siempre hace que las botellas sean rechazadas y, por lo tanto, debe evitarse. Como se mencionó anteriormente, la neblina cristalina ya puede estar presente en la preforma y los operadores deben verificar primero su suministro de preformas cuando ocurra este defecto. Las temperaturas inferiores a 85 °C (185 °F) provocan microgrietas en la estructura del PET. Estas grietas se muestran como anillos blanquecinos, generalmente en áreas con las relaciones de estiramiento más altas, y también causan el rechazo de botellas. Este

tipo de falla se denomina perlescencia debido a la apariencia perlada del efecto como se muestra en la figura 28.

La fabricación de botellas que no muestren ni neblina cristalina, ni perlescencia, aún deja una ventana de proceso con la que trabajar. En relaciones de estiramiento muy altas, a menudo solo hay una temperatura a la que la preforma se puede soplar con éxito, pero la mayoría de las veces los operadores pueden soplar a un cierto rango de temperatura. Las botellas producidas en este rango pueden parecer todas iguales, pero cuando se trata de propiedades de la botella como la retención de carbonatación, las botellas sopladadas a la temperatura más baja posible antes de que comience la perlescencia son las que tendrán un mejor rendimiento [13].

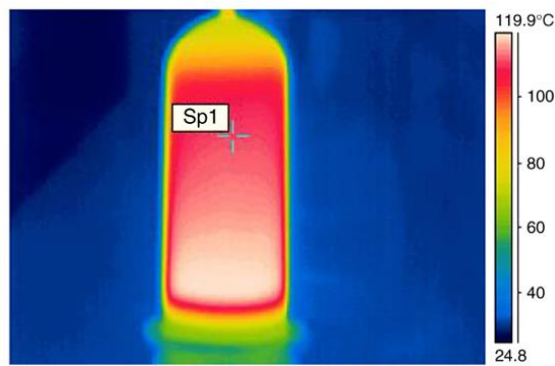


Figura 28. Imagen térmica de la preforma a la salida del horno [13].

Al aumentar la temperatura de la preforma, la tensión máxima dentro de la relación de estiramiento natural se reduce y el material se ve obligado a orientarse más. Ahora también debería ser evidente que el perfil de temperatura óptimo dentro de la pared de la preforma (temperatura interior más alta que la exterior) conduce a temperaturas generales más bajas ya que se puede retrasar el inicio de la perlescencia: las partes internas que se estiran más no se fracturan tan temprano a mayor temperatura. Cabe mencionar en este punto que la mayoría de las botellas sopladadas de esta manera, es decir, a la temperatura más baja posible, requieren una presión mínima de aire de soplado de 35 bar, siendo el bar el máximo [13].

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL MOLDE

3.1 Diseño del molde para envase de 500 ml

La simulación del proyecto se lleva a cabo mediante el uso del software SolidWorks para el diseño del molde y del envase PET, como se muestra en figura 29 y 30, las dimensiones se encuentran en los anexos 1 y 2. El proceso de simulación CFD se realiza en ANSYS Fluent, con el objetivo de identificar el comportamiento térmico del molde de estirado-soplado en los diferentes puntos durante el proceso de enfriamiento. Para llevar a cabo la simulación, los softwares permiten la entrada de datos sobre el fluido a emplear, los materiales y los parámetros establecidos, lo que contribuye a un proceso más realista [16].



Figura 29. Envase de 500ml de material PET.

3.2 Condiciones de borde

Para la simulación es fundamental establecer las condiciones de borde, para este caso son:

- propiedades del material
- Fluido (agua)
- Temperaturas
- Flujo volumétrico
- Presión de entrada

El molde para la simulación se muestra en la figura 30.

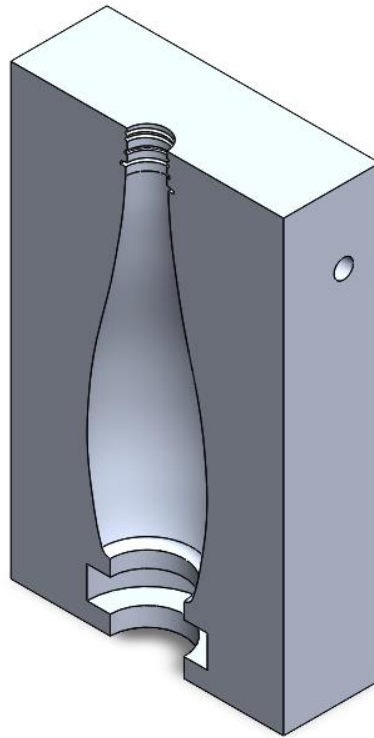


Figura 30. Vista isométrica del molde.

El material que se emplea en el molde es el Aluminio 7075 también conocido como Duraluminio 7075.

Para el proceso de enfriamiento del molde entra el fluido en este caso agua cuyas características se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades del fluido.

Agua	
Presión	4.6 bar
Temperatura	7 °C
Velocidad	0.5 m/s

3.3 Simulación CFD

Se inició el proceso de simulación utilizando Ansys Fluent en el entorno de Workbench, siguiendo la secuencia establecida en la figura 31 y un árbol de secuencia en la figura 32.

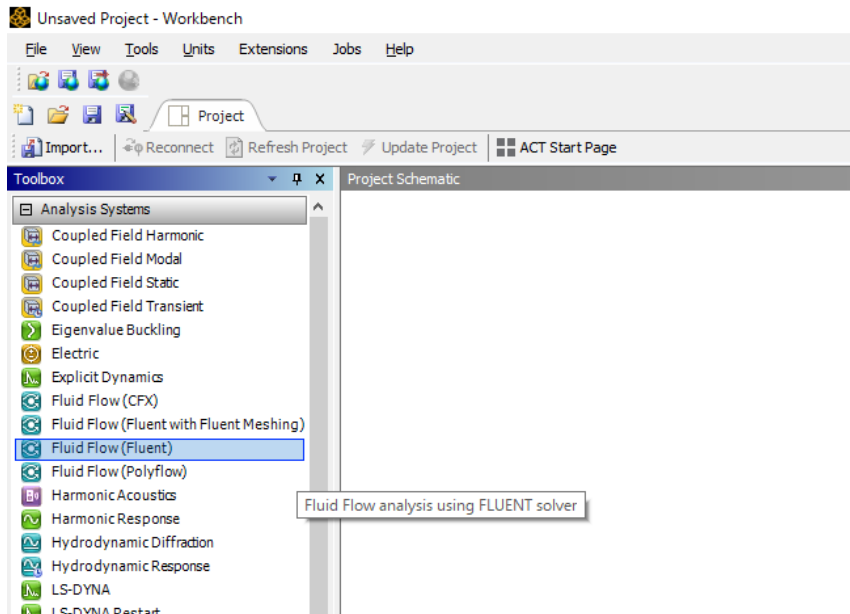


Figura 31. Ansys workbench 2024 R1.

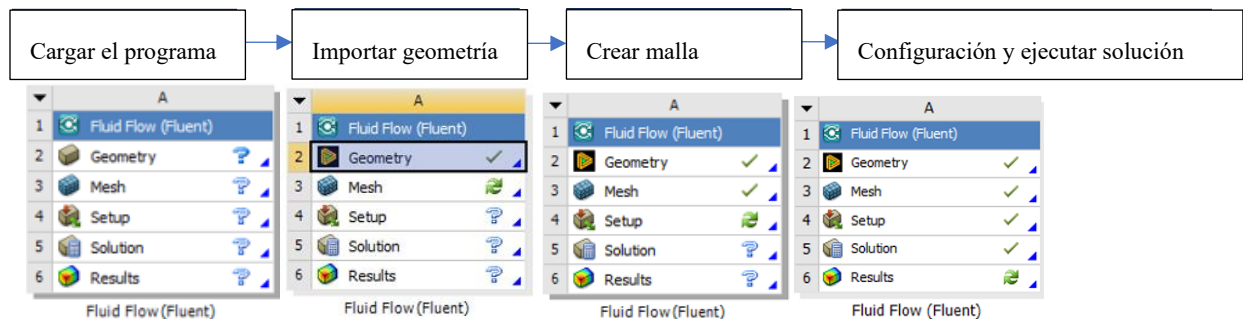


Figura 32. Árbol de secuencia CFD.

La geometría creada en SolidWorks y exportada en formato STEP fue importada a Ansys Workbench. La herramienta DesignModeler Geometry de Fluent fue la encargada de gestionar la geometría, según se aprecia en las figuras 33-35.

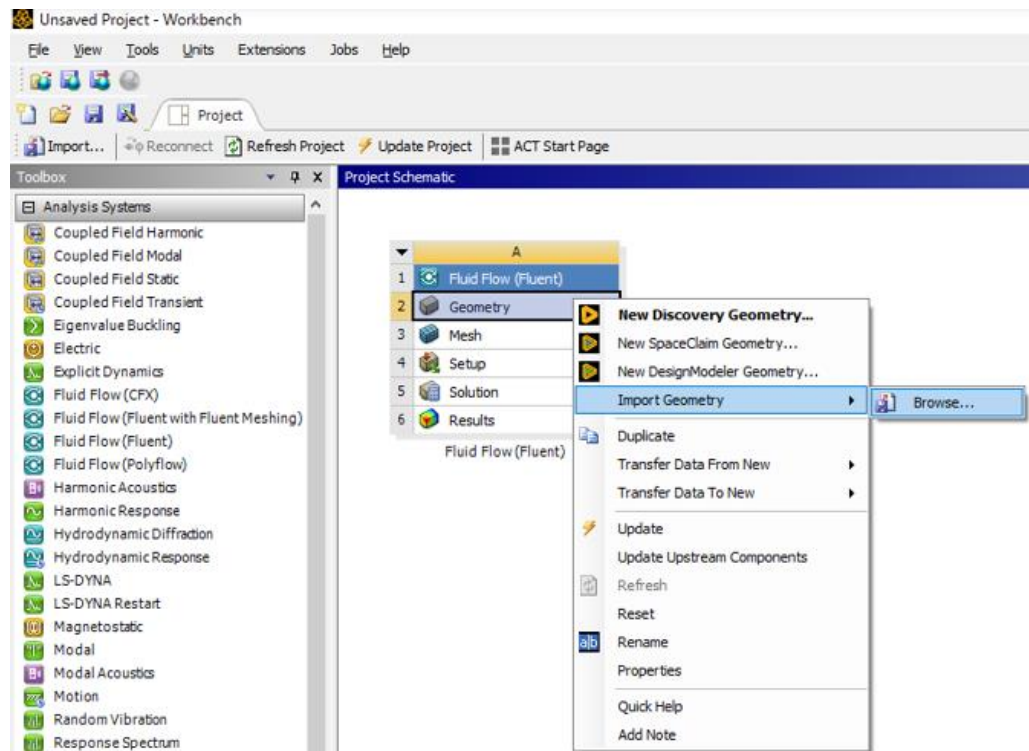


Figura 33. Proceso de importación de geometría.

Es importante mencionar que el molde y el envase deben estar guardados en formato STEP al igual que ensamble del molde con el envase.

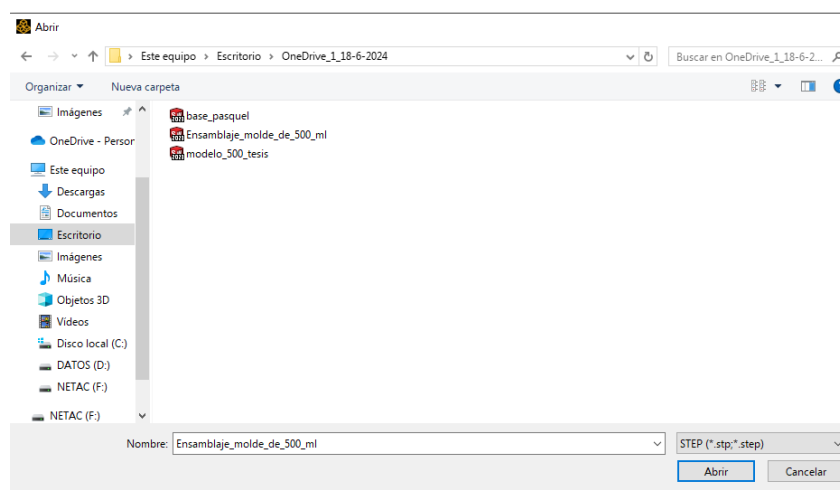


Figura 34. Molde, envase y ensamble en formato STEP.

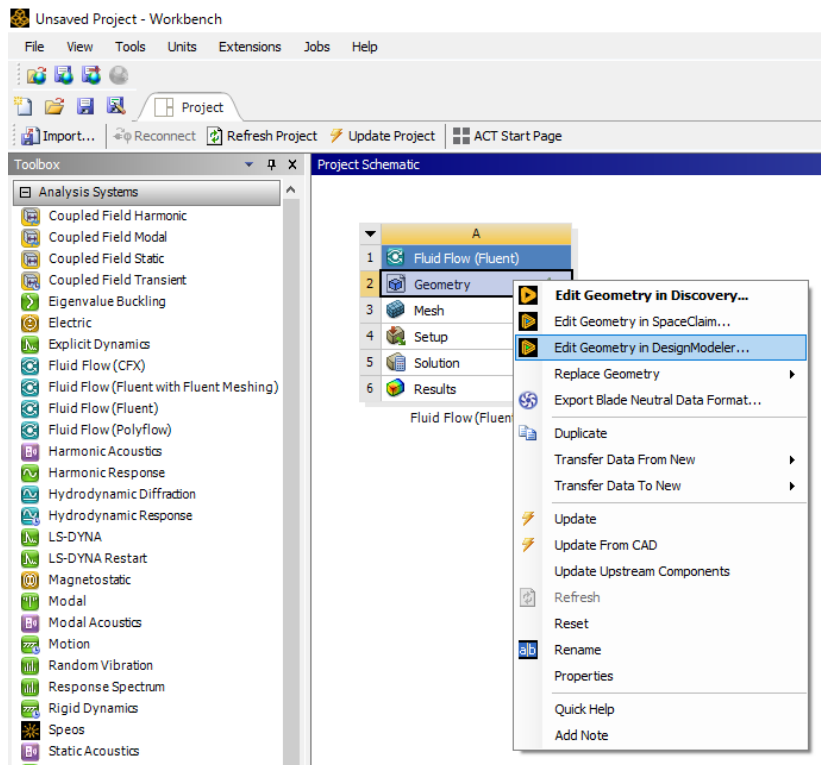


Figura 35. Herramienta Geometry in DesignModeler.

Durante la fase inicial del modelado, se procedió a ajustar la geometría importada, especificando las dimensiones en milímetros y seleccionando el fluido a simular. Este proceso se ilustra en las figuras 36 y 37.

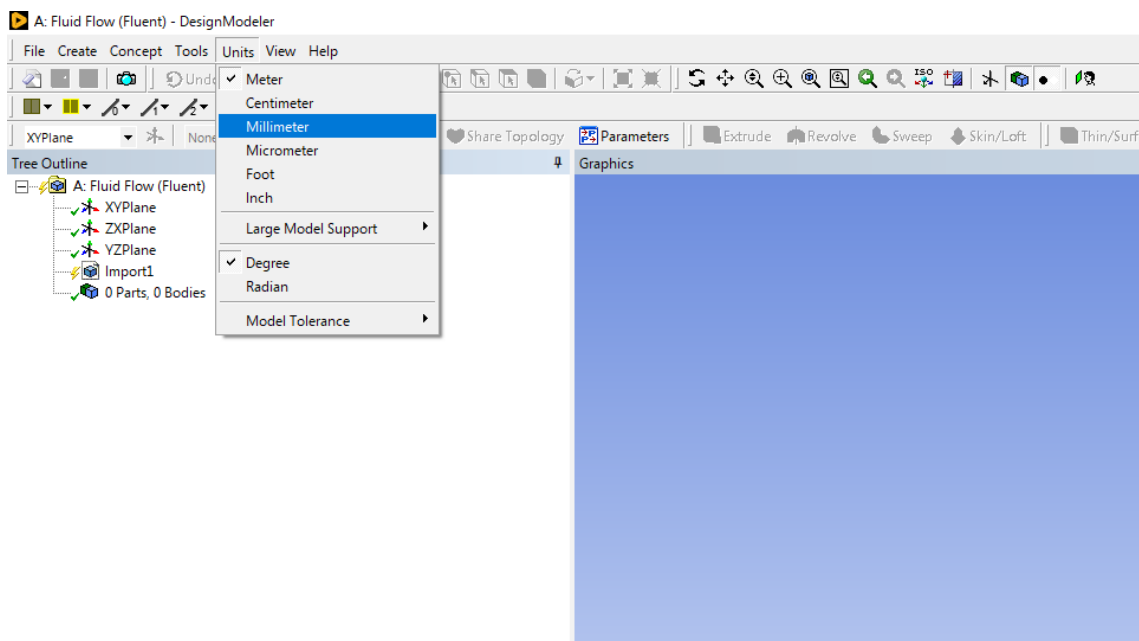


Figura 36. Parámetros para el modelado en CFD.

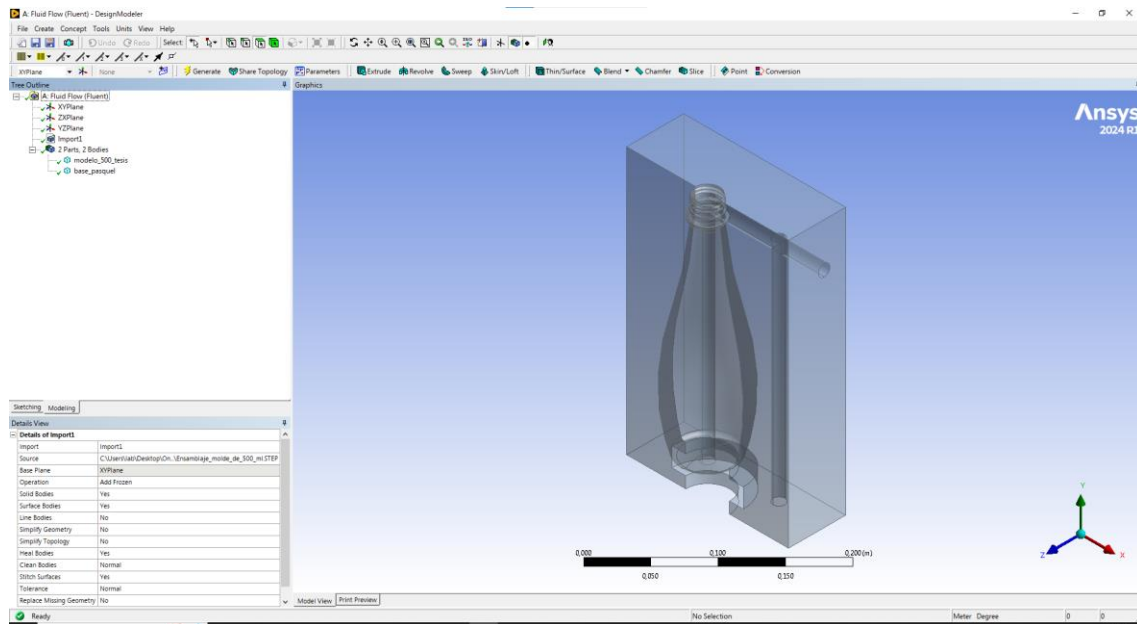


Figura 37. Molde y envase de 500 ml generados para el proceso de simulación.

Para poder añadir el fluido a la simulación se utiliza la herramienta Fill (llenar mediante un volumen), para agregar el fluido en la sección interna donde se encuentra los canales de refrigeración por donde pasa el fluido, se hace un corte a la pieza para poder seleccionar por donde va a pasar como se muestra en la imagen de las figuras 38-40.

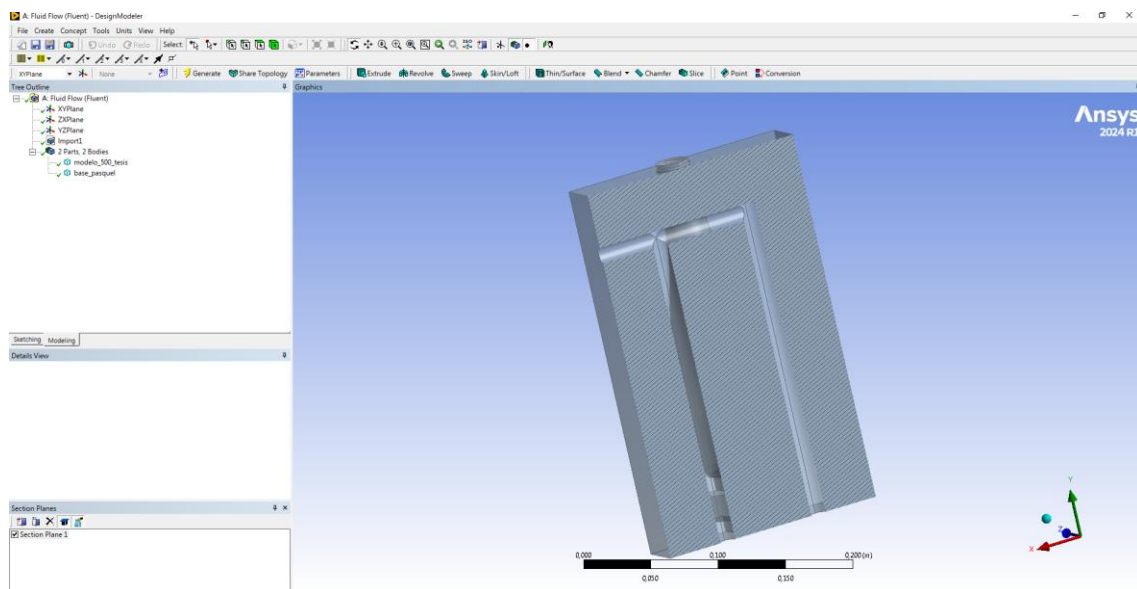


Figura 38. Corte del molde para la selección de las caras a aplicar el fluido.

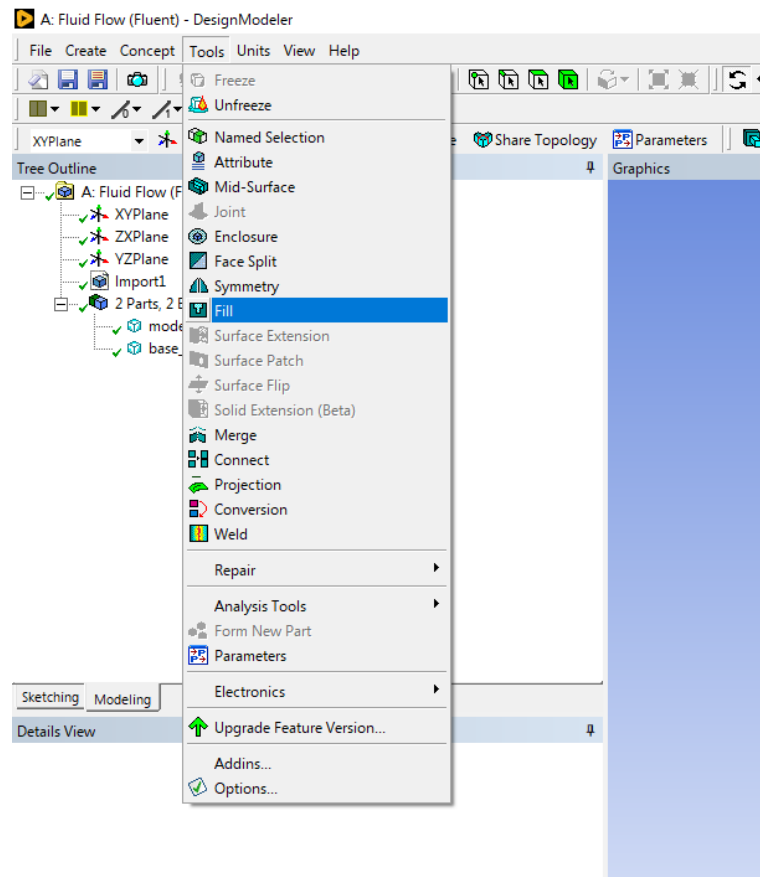


Figura 39. Herramienta para implementar el fluido.

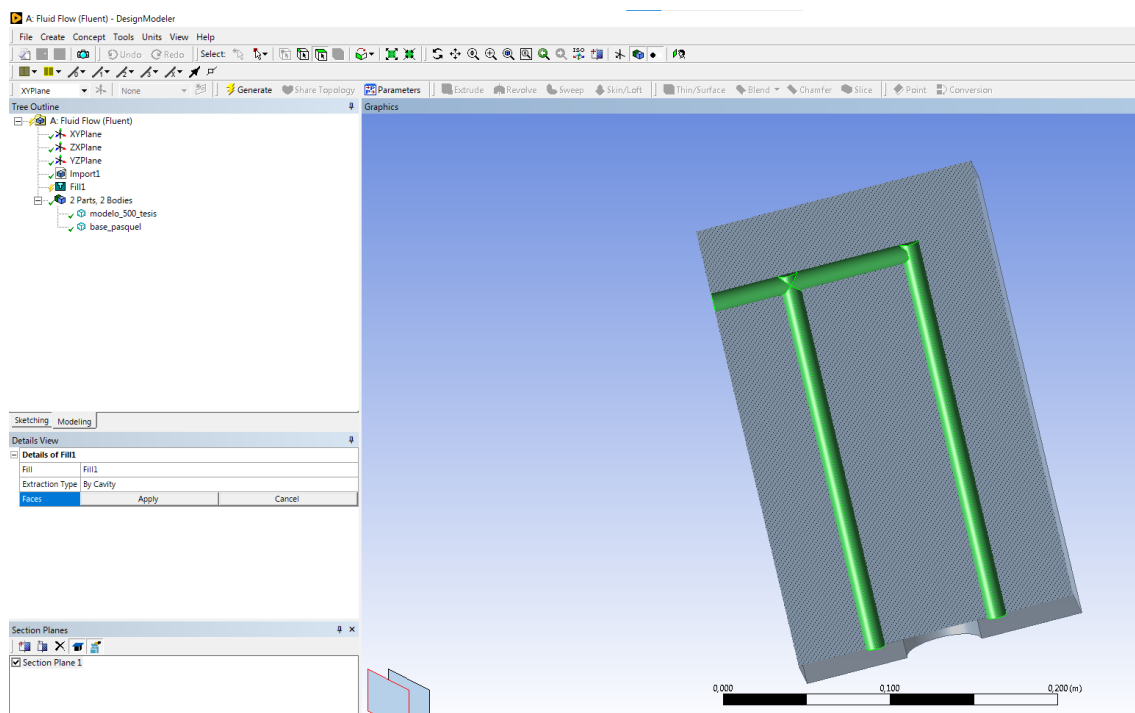


Figura 40. Selección del canal por donde va a pasar el fluido.

Al seleccionar las secciones internas del sistema de refrigeración del molde se genera una nueva parte en los elementos donde se incluye el fluido en este caso agua para luego tener tres partes para la simulación donde se expresa en las figuras 41-42.

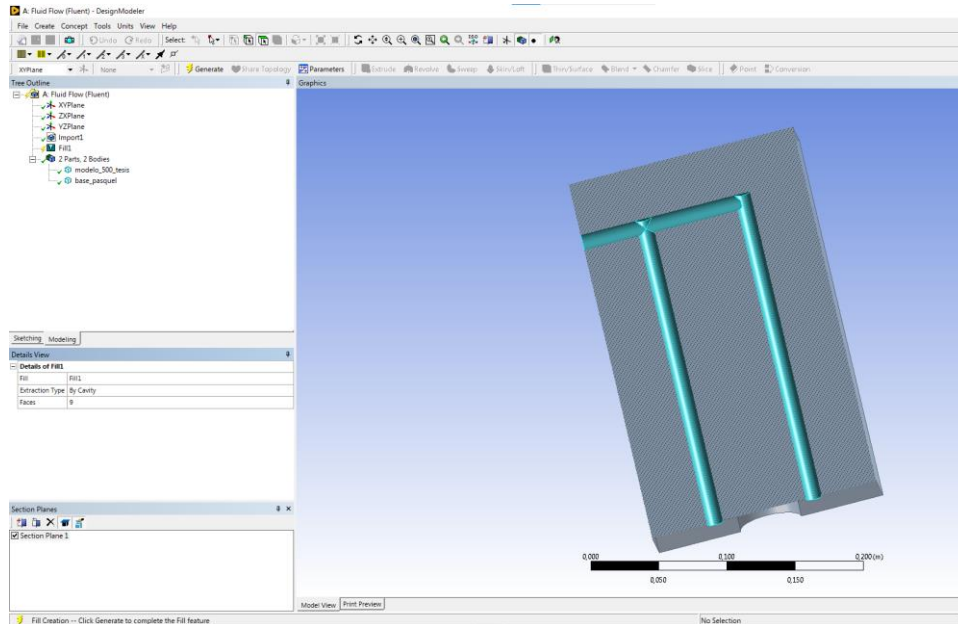


Figura 41. Generación del Fill (Relleno de volumen).

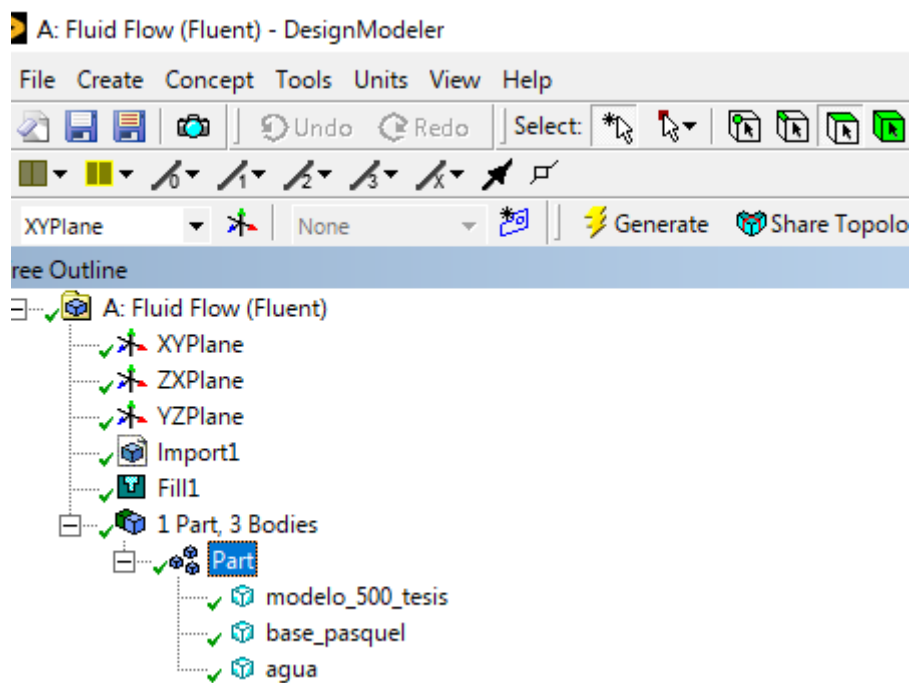


Figura 42. Secciones del modelado a simular.

3.4 Criterio de mallado

Para el criterio de la malla se toma el modelo de Skewness para poder realizar un buen mallado de esta manera prevenir algún error durante el proceso de la simulación, para llegar a disminuir la carga al obtener los resultados y obtener respuestas más reales. El proceso de mallado se muestra en la figura 43.

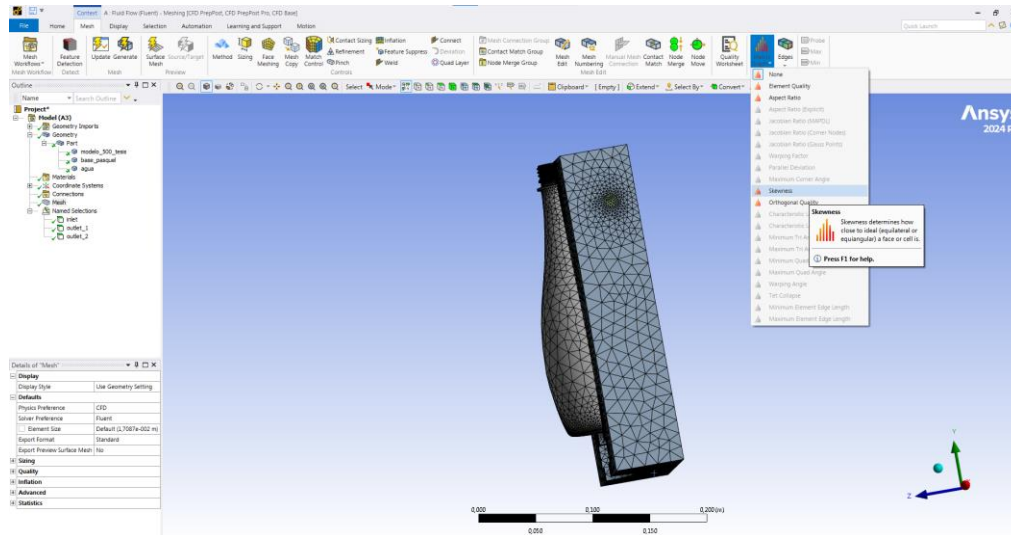


Figura 43. Modelo de Skewness.

Es importante mencionar para saber que la malla es correcta, se observa que el Average sea hasta un máximo de 0.25. En este caso la malla tiene un valor de 0.23408 que se encuentra dentro del valor deseado. Al finalizar se agrega los puntos de entrada y salida del fluido y la pared mostradas en las figuras 44-46.

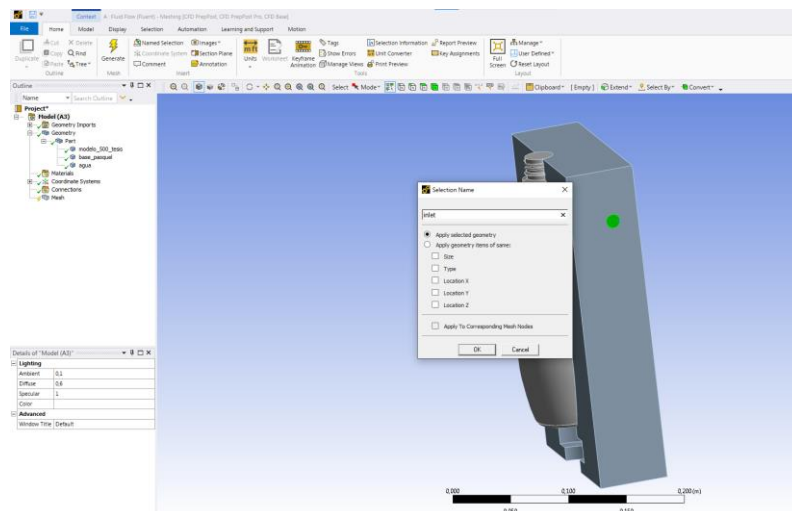


Figura 44. Entrada del fluido (agua) inlet.

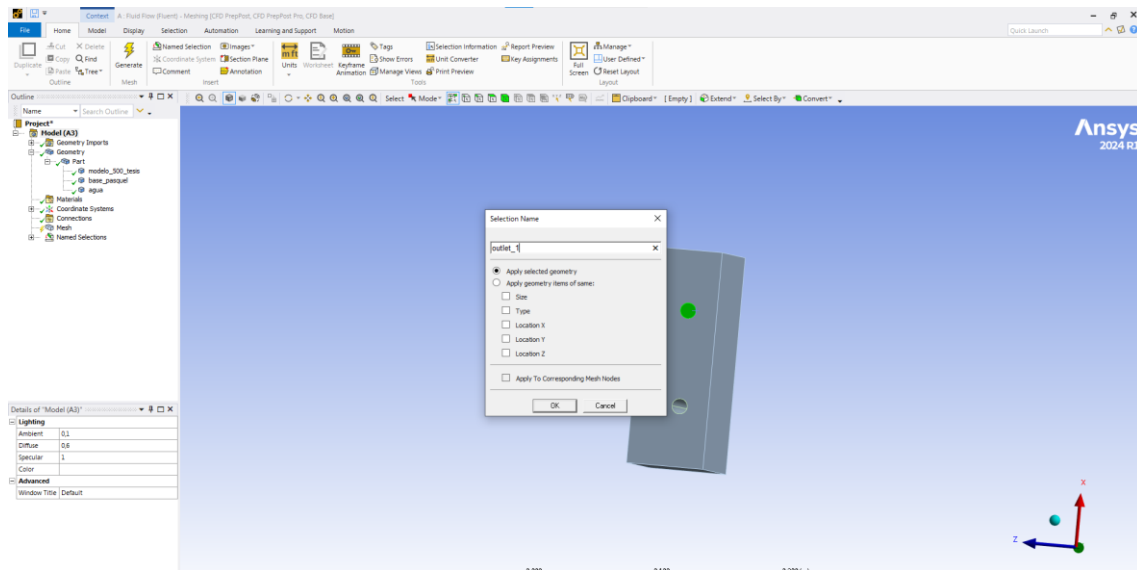


Figura 45. Salida 1 del fluido (agua) outlet_1.

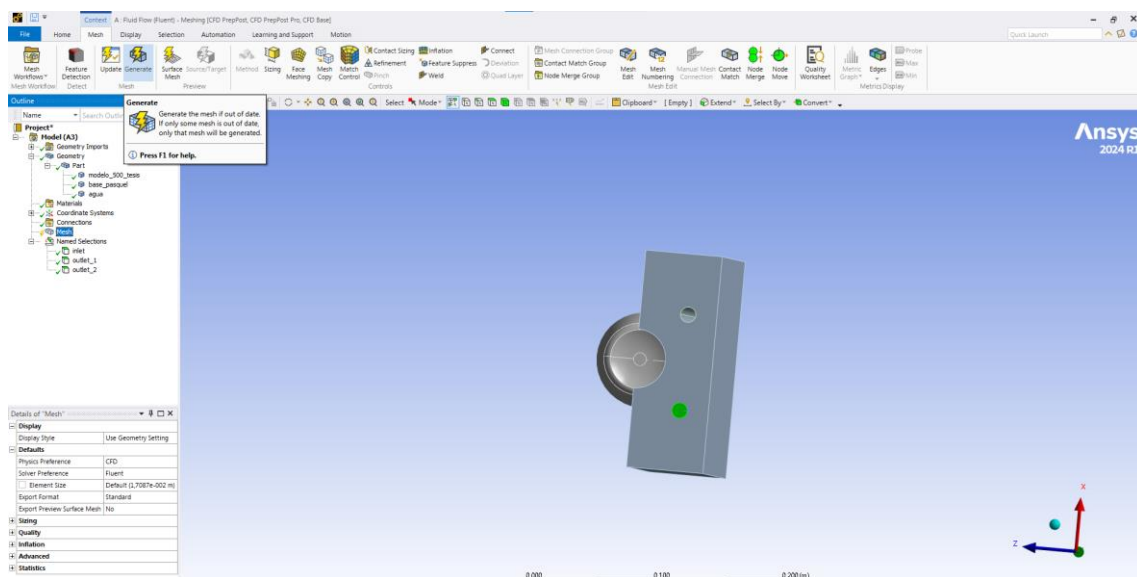


Figura 46. Salida 2 del fluido (agua) outlet_2.

Una vez finalizada la generación de la malla y la definición de las secciones de flujo, se procedió a actualizar la solución mediante la herramienta "update". Con el fin de guardar los datos de la malla y nombres de las secciones a trabajar.

3.1.1 Parámetros y condiciones del molde de 500ml

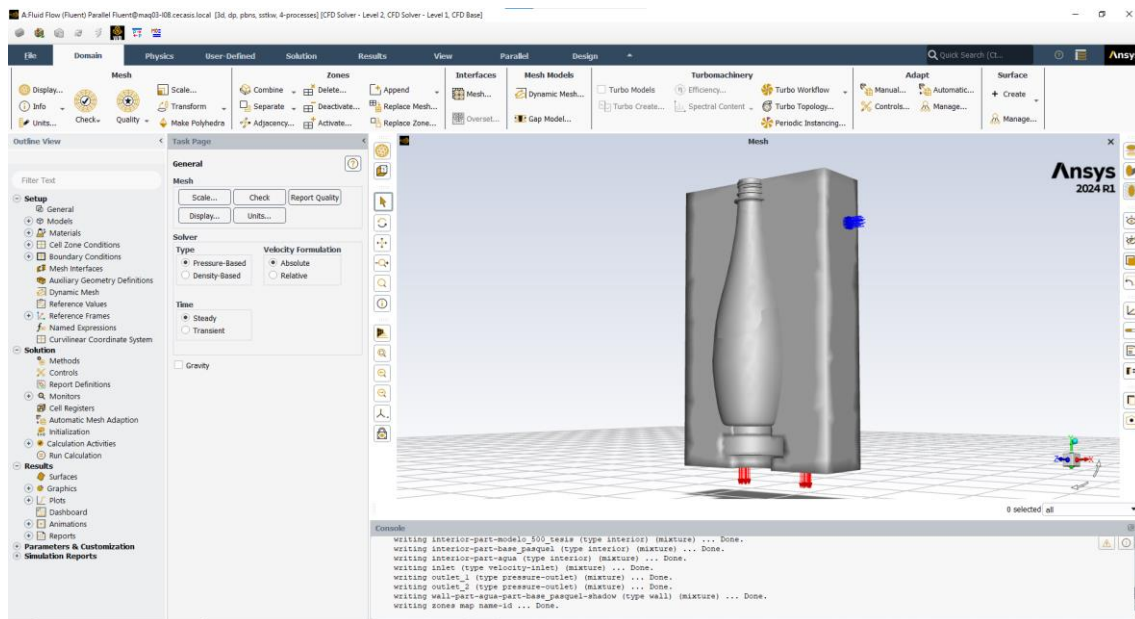


Figura 47. CFD solver.

En esta sección del CFD solver en Ansys fluent, se puede realizar un amplio rango de simulaciones con fluidos para analizar y predecir el comportamiento del fluido en diversas condiciones. Los parámetros por considerar para la simulación se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros del proceso.

Parámetro	Especificación	Real
Temperatura del envase soplado	90-105 °C	95 °C
Presión de agua	3-5 bar	4.6 bar
Temperatura de entrada del agua	7-10 °C	7 °C
Temperatura a salida del agua	ΔT 3°C	10 °C

Las propiedades del Duraluminio_7075 se muestran la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades del Duraluminio_7075 [17].

Propiedades	Valor en SI
Densidad	2800 kg/m ³
Conductividad térmica	130 W/m K
Calor específico	875 J/kg K

Los materiales para seleccionar en la simulación son agua, PET, y duraluminio 7075, como se muestra en las figuras 49-51.

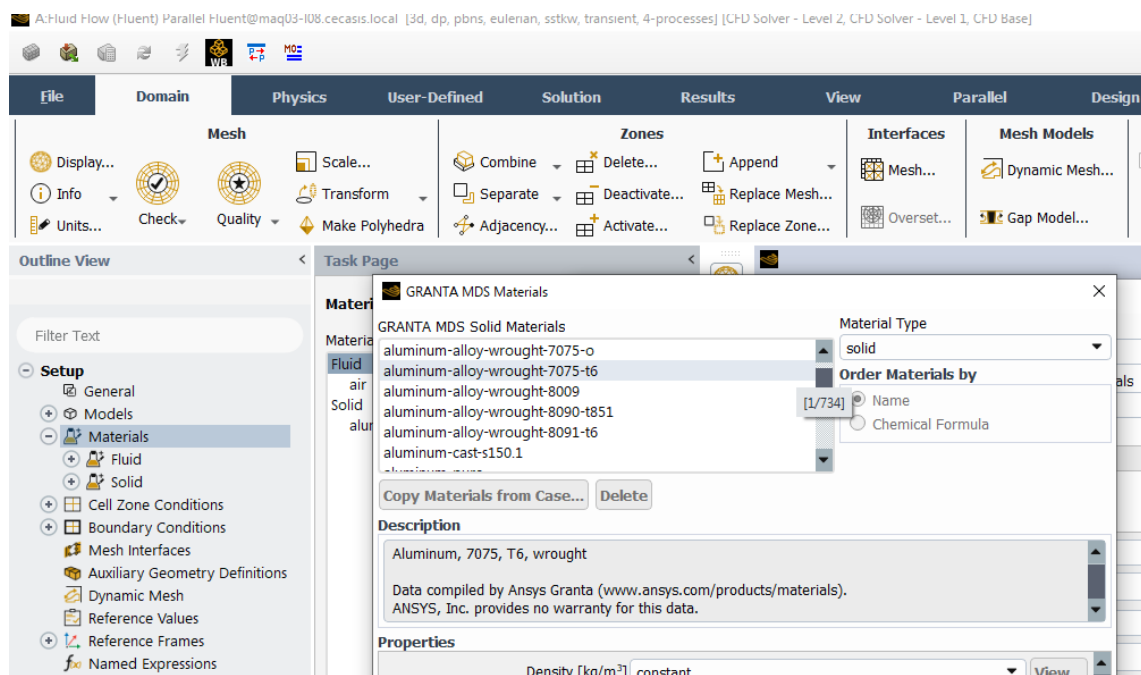


Figura 48. Material seleccionado Duraluminio 7075.

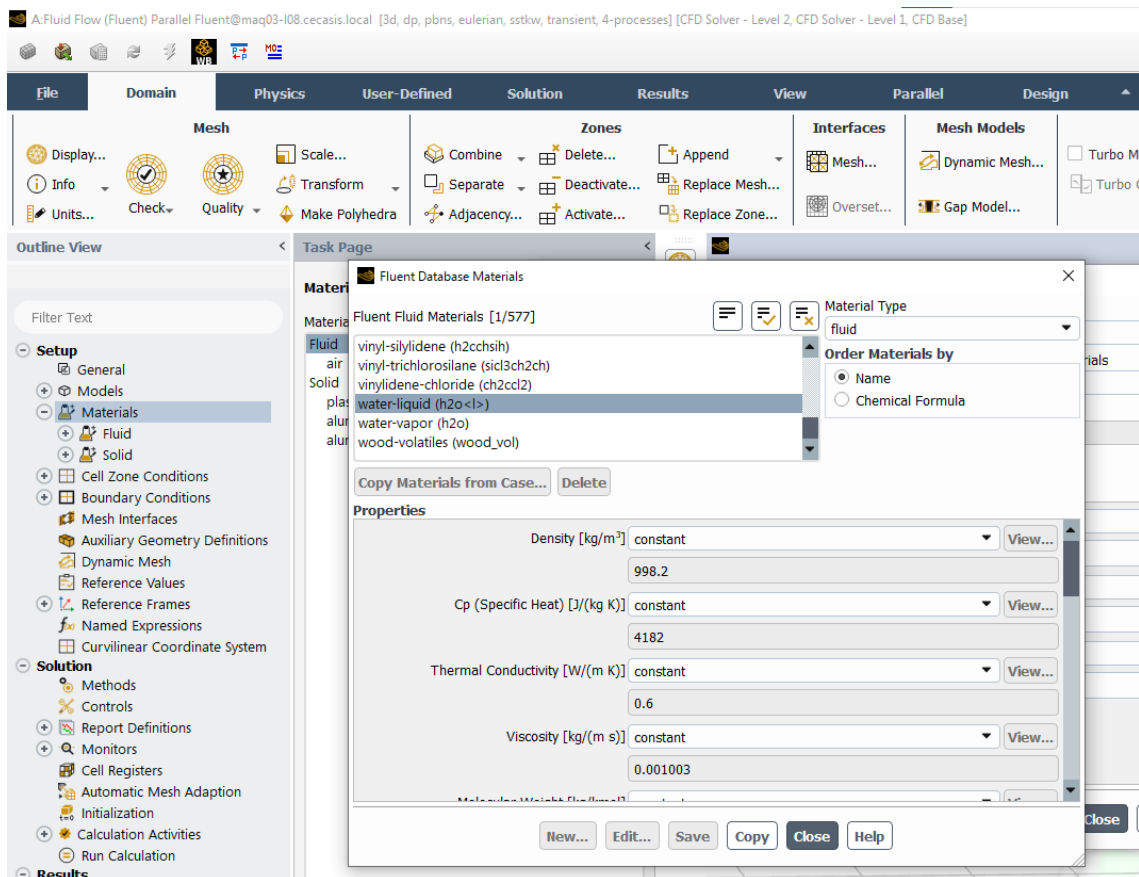


Figura 49. Fluido a seleccionar Agua.

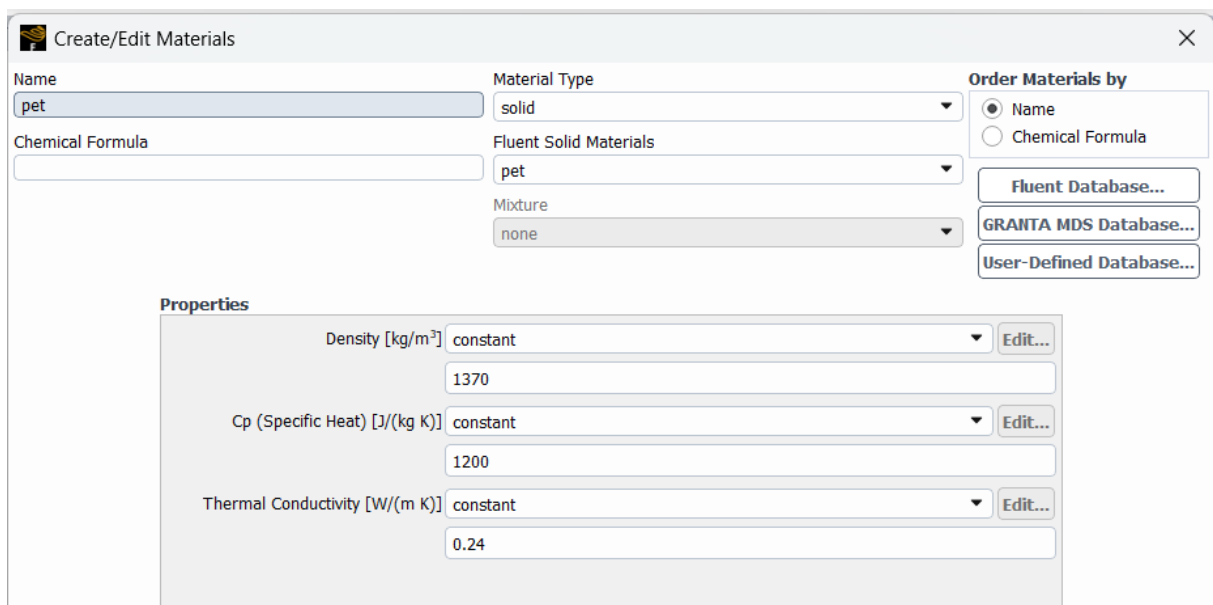


Figura 50. Material Pet.

La figura 52-54 las condiciones que se establecen para la simulación del primer molde.

The screenshot shows the 'Solid' window in a software application. The 'Zone Name' field is set to 'pared_1'. The 'Material Name' is set to 'duraluminio_7075'. Under the 'Fixed Values' tab, the 'Fixed Values' checkbox is checked. The 'Temperature [C]' field is set to 25. The 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons are at the bottom.

Figura 51. Molde 1 a temperatura de 52 °C.

La temperatura del envase PET es de 90 °C para la simulación como se observa en la figura 53.

The screenshot shows the 'Solid' window in a software application. The 'Zone Name' field is set to 'pared_2'. The 'Material Name' is set to 'pet'. Under the 'Fixed Values' tab, the 'Fixed Values' checkbox is checked. The 'Temperature [C]' field is set to 90. The 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons are at the bottom.

Figura 52. Temperatura del envase PET.

Parámetros para simular la entrada del agua se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de entra del agua.

Condiciones de entrada	Agua
Temperatura	7 °C
Velocidad	0.5 m/s
Presión	4600000 Pa

En la figura 54 se muestra las condiciones de borde a editar para la simulación.

Wall

Zone Name
wall-pared_1

Adjacent Cell Zone
pared_1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

Thermal Conditions

☐ Heat Flux
☐ Temperature
☐ Convection
☐ Radiation
☒ Mixed
☐ via System Coupling
☐ via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient [W/(m² K)] 0

Free Stream Temperature [C] 26.85

External Emissivity 1

External Radiation Temperature [C] 26.85

Wall Thickness [m] 0

Heat Generation Rate [W/m³] 0

☐ Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name
duraluminio_7075 Edit...

Apply Close Help

Figura 53. Condiciones de borde del molde 1.

En la tabla 8 muestra las funciones de cada opción en este caso se establece temperatura y la opción de mixed.

Tabla 8. Opciones y funciones de parámetros a utilizar.

Campo mixed	Explicación
Heat Transfer Coefficient	Mide la eficiencia de la transferencia de calor por convección.
Free Stream Temperature	Temperatura del fluido lejos de la pared.
External Radiation Temperature	Temperatura de la fuente de radiación externa.
Wall Thickness	Grosor físico de la pared.
Heat Generation Rate	Cantidad de calor generado dentro de la pared por unidad de volumen y tiempo.

La transferencia de calor en este procedimiento de enfriamiento donde se necesita disipar el calor de los envases de PET dentro de moldes de aluminio es un fenómeno crítico. Inicialmente, el calor fluye desde el PET caliente hacia el molde de aluminio, cuya temperatura es más baja. Posteriormente, se transfiere al refrigerante que circula por el molde. Este complejo proceso implica la interacción de varios mecanismos que pasa la transferencia de calor como parte fundamental del proceso de refrigeración, como la conducción desde la superficie del PET al molde y la convección hacia el refrigerante. Este proceso involucra varias formas existentes en la transferencia de calor:

- **Conducción:** El flujo al transferirse por medio del PET y del aluminio por el mecanismo de conducción molecular; en este proceso, la energía térmica producto del envase fluye de las moléculas más calientes a las más frías, propagándose a lo largo de los materiales sin movimiento macroscópico. La conductividad térmica de en el caso del material a trabajar se ve afectado en la eficiencia de la transferencia, y su comprensión es esencial para diseñar sistemas de enfriamiento eficaces en aplicaciones como el moldeo de envases de PET.

- **Convección:** En el proceso de enfriamiento, la convección juega una función importante de la transferencia entre la superficie del PET con el molde de aluminio. Además, se establece otra interfaz de transferencia entre el molde de aluminio y el refrigerante circulante. Este fenómeno, que involucra la interacción de fluidos y superficies sólidas, es crucial para lograr una distribución térmica eficiente en la fabricación de envases
- **Radiación:** hay una diferencia significativa de temperatura entre el PET y el molde.

En la determinación del coeficiente de transferencia de calor (h) en el molde de duraluminio, se recurre a correlaciones que vinculan el número de Nusselt (Nu) con el número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr). El número de Nusselt, un parámetro adimensional, cuantifica la transferencia de calor por convección y guarda una relación directa con el coeficiente de transferencia (h). Las correlaciones establecen relación funcional entre Nu, Re y Pr, permitiendo calcular h a partir de los datos experimentales o las condiciones del flujo [15]; Por lo tanto, encontramos la temperatura de la película (T_f) por medio de la ecuación 1.

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{7 + 10}{2} = 8,5 \approx 9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, las propiedades del agua a 9 °C se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades del agua a 9 °C.

Propiedades	Valor a 9 °C	
Densidad	999.7	kg/m ³
Calor específico	4194	J/kg K
Conductividad térmica	0.580	W/m s
Viscosidad dinámica	1.307 x 10 ⁻³	kg/m s
Número de Prandtl	9.45	

Para poder obtener el número de Nusselt es necesario el número de Reynolds por lo tanto usaremos la ecuación para obtener Re:

$$Re = \frac{V D}{\nu} \quad (2)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds es adimensional.

V: Velocidad del fluido en [m/s].

D: diámetro interno de la tubería en [m].

ν : Viscosidad cinemática en [m²/s].

Para calcular la viscosidad cinemática, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica [Pa s].

ρ : densidad [kg/m³].

Por lo tanto, la viscosidad cinemática es:

$$\nu = \frac{1.307 \times 10^{-3}}{999.7}$$

$$\nu = 1.3074 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Al tener la viscosidad cinemática reemplaza en la ecuación de (Re) para obtener Nusselt. La velocidad del agua es de [0.5 m/s].

$$Re = \frac{(0.5 \text{ m/s}) (0.012 \text{ m})}{1.3074 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 4589.26$$

El número de Re es >4000 por lo tanto el flujo es turbulento.

Con el fin de caracterizar la transferencia de calor en el sistema, se empleó la correlación de Nusselt. Para ello, se calculó previamente el número de Reynolds y se obtuvo el valor del número de Prandtl de la Tabla 10. Estos valores se aplican en la siguiente ecuación:

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \quad (4)$$

Donde:

Nu: Número de Nusselt es adimensional.

Pr: Número de Prandtl es adimensional.

$$Nu = 0.023 (4589.26)^{0.8} (9.45)^{0.4}$$

$$Nu = 48$$

Por lo tanto, Nusselt tiene relación con el coeficiente de transferencia de calor (h) por lo que lleva a continuación la ecuación de relación siguiente:

$$Nu = 48 = \frac{h D}{k} \quad (5)$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor en [W/m² K].

D: Diámetro interno en [m].

k: Conductividad térmica del fluido [W/m K]

$$48 = \frac{(h)(0.012)}{0.580}$$

Por lo tanto, de la ecuación se despeja el coeficiente de transferencia de calor resultante:

$$h = 2320 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Para determinar la tasa a la cual se transfiere calor a través de la superficie, se utilizará la ley de enfriamiento de Newton. Esta ley, combinada con el valor del coeficiente de transferencia de calor calculado previamente, permitirá calcular el flujo de calor (Q).

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \text{ (w)} \quad (6)$$

Donde:

A_s : Área superficial del sistema de refrigeración al molde donde a través del cual existe transferencia de calor por convección [m].

T_s : Temperatura superficial [°C].

T_∞ : Es la temperatura del fluido suficiente alejada de la superficie [°C].

Para obtener el área superficial del canal de refrigeración es necesario utilizar la ecuación siguiente:

$$A_s = \pi D L \quad (7)$$

Donde:

D: El diámetro interno [m].

L: Largo de la tubería [m].

$$A_s = \pi (0.012) (0.6024)$$

$$A_s = 0.02271 \text{ m}$$

Al tener todas las variables se procede a obtener el calor por convección.

$$\dot{Q} = (2320 \text{ W/m}^2 \text{ K})(0.02271 \text{ m})(25 - 7 \text{ °C})$$

$$\dot{Q} = 948.4 \text{ (W)}$$

El cálculo del calor por convección proporciona un dato fundamental para modelar el comportamiento térmico del sistema de refrigeración del molde. Con este valor, se pueden establecer las condiciones de borde adecuadas utilizando la ecuación del flujo de calor, la cual relaciona el flujo de calor con el coeficiente de transferencia de calor, el área de la superficie y la diferencia de temperatura.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (8)$$

Donde:

$\dot{q}$: Flujo de calor por unidad de área [W/ m²].

$\dot{Q}$: Calor por convección [W].

$$\dot{q} = \frac{948.4}{0.1592}$$

$$\dot{q} = 5997.3 \text{ (W/ m}^2\text{)}$$

En la figura 55-56 se puede observar las condiciones a editar.

The image shows a software dialog box titled "Wall". It has a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into several sections:

- Zone Name:** A text field containing "wall-pared_1-part-agua".
- Adjacent Cell Zone:** A dropdown menu showing "pared_1".
- Shadow Face Zone:** A dropdown menu showing "wall-pared_1-part-agua-shadow".
- Thermal Conditions:** A section with radio buttons for "Heat Flux", "Temperature", and "Coupled". The "Heat Flux" radio button is selected.
 - Heat Flux [W/m²]:** A text field with the value "0".
 - Wall Thickness [m]:** A text field with the value "0".
 - Heat Generation Rate [W/m³]:** A text field with the value "0".
 - Shell Conduction:** A checkbox that is currently unchecked.
 - 1 Layer:** A dropdown menu showing "1 Layer".
 - Edit...:** A button next to the "1 Layer" dropdown.
- Material Name:** A dropdown menu showing "duraluminio_7075" and an "Edit..." button.

At the bottom of the dialog box, there are three buttons: "Apply", "Close", and "Help".

Figura 54. Parámetros a editar del sistema de refrigeracion del molde.

La opción de (Heat flux) es el flujo de calor que obtuvimos de los cálculos realizados con la transferencia de calor. Con los datos generados se tiene (Heat generation rate) que es flujo de calor generado para esto se emplea la ecuación:

$$q_g = \frac{\dot{Q}}{V} \quad (9)$$

Donde:

q_g : es el flujo de calor generado [W/m³].

Q : flujo de calor convectivo [W].

V : volmen [m³]

$$q_g = \frac{948,4}{V}$$

volumen de los tres tubos del sistema de refrigeración se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_c = \pi r^2 L \quad (10)$$

Para el volumen del primer cilindro:

$$V_1 = \pi 0.006^2 (0.1225)$$

$$V_1 = 1.385 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

Para el volumen del cilindro 2:

$$V_2 = \pi 0.006^2 (0.24)$$

$$V_2 = 2.714 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

Para el volumen del cilindro 3:

$$V_3 = \pi 0.006^2 (0,24)$$

$$V_3 = 2.714 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

Por lo tanto, el volumen total es la suma de los tres cilindros

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = 1.385 \times 10^{-5} + 2.714 \times 10^{-5} + 2.714 \times 10^{-5}$$

$$V = 6.813 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

Al tener el volumen total del sistema de refrigeración se procede a remplazarlo con la ecuación para flujo de calor generado:

$$q_g = \frac{948.4}{6.813 \times 10^{-5}}$$

$$q_g = 13920446 \text{ w/m}^3$$

Al obtener estos resultados se procede a editar las condiciones del sistema de refrigeración como se muestra en la figura.

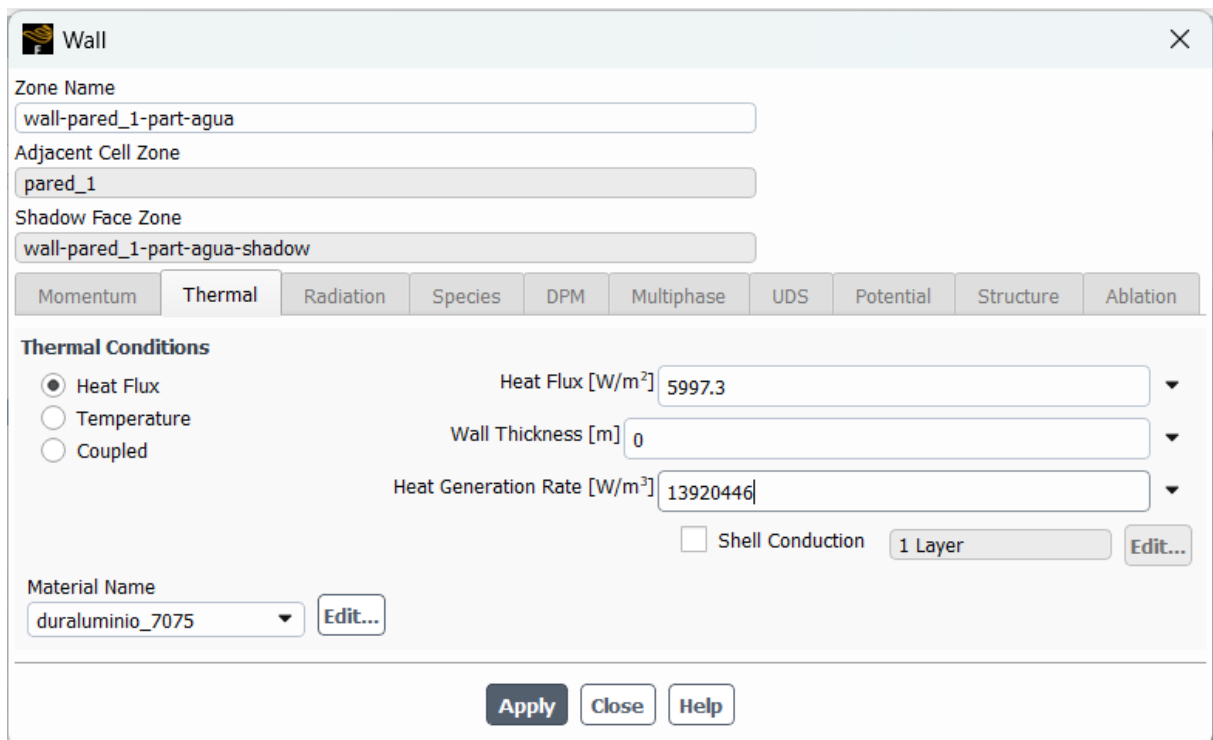


Figura 55. Condiciones de transferencia de calor del sistema de refrigeración del molde.

El dato necesario es el coeficiente de calor por lo tanto se usa la ley de Fourier.

$$q = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (11)$$

Donde:

q: Flujo de calor [W/m²].

k: Conductividad térmica [W/m °C].

dT/dx: Gradiente de temperatura (°C/m)

Para el cálculo del flujo es importante saber el valor del gradiente de temperatura para obtenerlo se necesita la ecuación para generar el valor del gradiente:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{(T_c - T_w)}{\text{Espesor de la pared de contacto}} \quad (12)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{(40 - 25)}{0.005}$$

$$\frac{dT}{dx} = 3000 \text{ (}^\circ\text{C/m)}$$

El valor del gradiente se lo reemplaza con en la ecuación de la ley de Fourier.

$$q = (-130)(3000)$$

$$q = -390000 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

El signo negativo indica que el calor fluye de la superficie más caliente (PET) hacia la más fría del molde.

El flujo de calor también es expresado con los términos del coeficiente (h) y la diferencia de temperatura de la superficie con el fluido:

Por tanto, la ecuación es:

$$q = h (T_w - T_c) \quad (13)$$

Donde despejamos (h):

$$h = \frac{q}{(T_w - T_c)} \quad (14)$$

de esta manera el dato a ingresar (h) es:

$$h = \frac{-390000}{(25 - 40)}$$
$$h = 26000 \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

para sacar el flujo de calor generado del molde se necesita el volumen.

Ecuación para el volumen del molde:

$$\forall = L \cdot \text{Ancho} \cdot \text{Alto} \quad (15)$$

$$\forall = (0.17)(0.06)(0.28)$$

$$\forall = 0.002856 \text{ (m}^3\text{)}$$

Ecuación de Ley de enfriamiento de Newton

$$\dot{Q} = h(T_c - T_w) \quad (16)$$

$$\dot{Q} = 26000(40 - 25)$$

$$\dot{Q} = 390000 \text{ (W)}$$

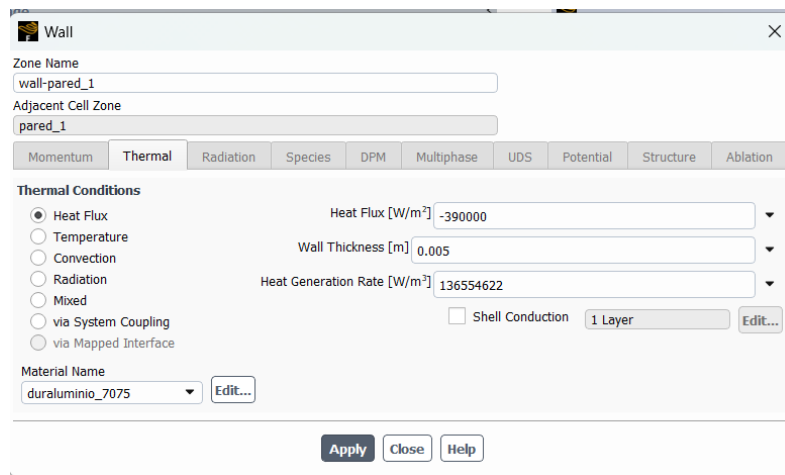
Ecuación de flujo de calor generado del molde duraluminio:

$$q_g = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (17)$$

$$q_g = \frac{390000}{0,002856}$$

$$q_g = 136554622 \text{ (W/m}^3\text{)}$$

Con los datos obtenidos para el molde de duraluminio se procede a editar para la simulación como se muestra en la figura 57-58.



Wall

Zone Name: wall-pared_1

Adjacent Cell Zone: pared_1

Thermal Conditions

☒ Heat Flux

Heat Flux [W/m²]: -390000

☐ Temperature

Wall Thickness [m]: 0.005

☐ Convection

Heat Generation Rate [W/m³]: 136554622

☐ Radiation

☐ Mixed

☐ via System Coupling

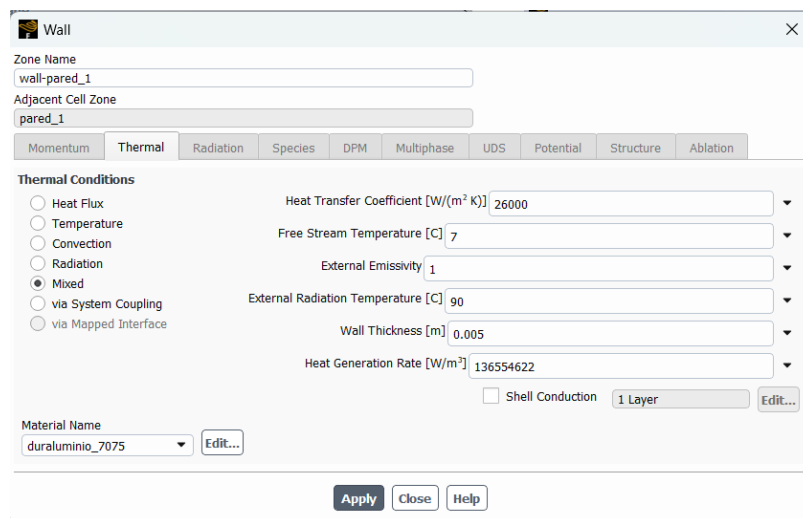
☐ via Mapped Interface

Material Name: duraluminio_7075

Shell Conduction: ☐ 1 Layer

Apply Close Help

Figura 56. Parámetros de flujo de calor (heat flux) del molde de duraluminio.



Wall

Zone Name: wall-pared_1

Adjacent Cell Zone: pared_1

Thermal Conditions

☐ Heat Flux

☐ Temperature

☐ Convection

☐ Radiation

☒ Mixed

☐ via System Coupling

☐ via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient [W/(m² K)]: 26000

Free Stream Temperature [C]: 7

External Emissivity: 1

External Radiation Temperature [C]: 90

Wall Thickness [m]: 0.005

Heat Generation Rate [W/m³]: 136554622

Material Name: duraluminio_7075

Shell Conduction: ☐ 1 Layer

Apply Close Help

Figura 57. Condiciones de borde mixto (combinación de diferentes mecanismos de transferencia de calor) del molde de duraluminio.

Para las condiciones del envase PET:

Geometría simplificada: al considerarse el envase como un cilindro de altura 238.14 mm y diámetro promedio $(74.77 + 46.05) / 2 = 60.41$ mm.

Ecuación de área de transferencia de calor:

$$A = \pi Dh \quad (18)$$

Donde.

h: es la altura del envase [mm]

$$A = \pi(60.41)(238.14)$$

$$A = 0.045 \text{ (m}^2\text{)}$$

El gradiente de temperatura del envase

$$\frac{dT}{dx} = \frac{(90 - 40)}{0.005}$$

$$\frac{dT}{dx} = 10000 \text{ (}^\circ\text{C/m)}$$

El valor del gradiente se lo reemplaza con en la ecuación de la ley de Fourier en el envase.

Conductividad térmica del envase PET (k): 0.18 W/m·K.

$$q = (-0.18)(10000)$$

$$q = -1800 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Coefficiente de transferencia de calor del envase PET de 500 ml.

$$h = \frac{-1800}{(40 - 90)}$$

$$h = 36 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C)}$$

para la obtención del volumen del envase de 500 ml.

$$V = \pi r^2 L \quad (19)$$

$$V = \pi \left(\frac{0.07477}{2} \right)^2 (0.21814)$$

$$V = 0.000964 \text{ m}^3$$

Ecuación de Ley de enfriamiento de Newton para el envase

$$\dot{Q} = 36(90 - 40)$$

$$\dot{Q} = 1800 \text{ (W)}$$

Ecuación de flujo de calor generado del envase de 500 ml:

$$q_g = \frac{1800}{0.000964}$$

$$q_g = 1867219.9 \text{ (W/m}^3\text{)}$$

En la figura 59-60 muestra los parámetros ya establecidos para el envase (PET) de 500 ml

The image shows the 'Wall' properties dialog box in ANSYS Fluent. The 'Thermal' tab is active. Under 'Thermal Conditions', the 'Heat Flux' radio button is selected, with a value of -1800 W/m². The 'Wall Thickness' is set to 0.005 m. The 'Heat Generation Rate' is set to 1867219.9 W/m³. The 'Material Name' is 'pet'. The 'Shell Conduction' checkbox is unchecked, and '1 Layer' is selected. The 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons are at the bottom.

Figura 58. Condiciones de heat flux (flujo de calor) para el envase de 500 ml.

Wall

Zone Name: wall-pared_2

Adjacent Cell Zone: pared_2

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

Thermal Conditions

☐ Heat Flux
☐ Temperature
☐ Convection
☐ Radiation
☒ Mixed
☐ via System Coupling
☐ via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient [W/(m² K)]: 36

Free Stream Temperature [C]: 90

External Emissivity: 1

External Radiation Temperature [C]: 40

Wall Thickness [m]: 0.005

Heat Generation Rate [W/m³]: 1867219.9

☐ Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name: pet Edit...

Apply Close Help

Figura 59. Condiciones de borde mixto del envase PET de 500 ml.

3.1.2 Parámetros para la solución de temperaturas

Para esta sección de la simulación se condiciona parámetros para la obtención de valores de temperatura posteriores al finalizar la simulación. Los parámetros para efectuar se muestran en las figuras 61-63. En la sección de solution animations se tiene la ventana donde realiza un nuevo objetivo y se selecciona contornos.

En esta sección se utiliza para configurar la generación de animaciones durante la simulación. Las animaciones permiten visualizar los resultados de manera dinámica y comprender mejor el comportamiento del sistema simulado.

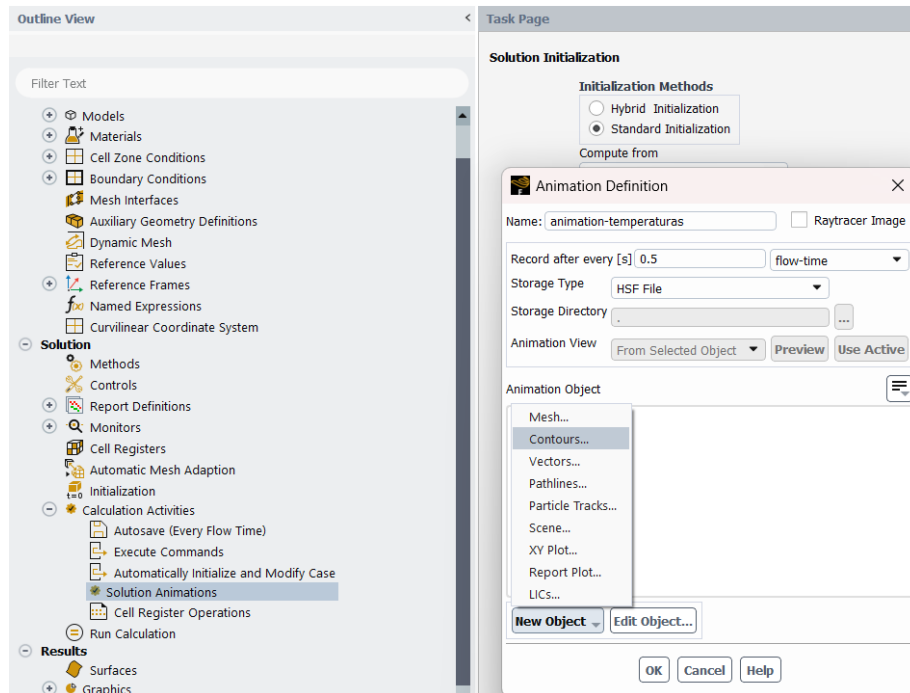


Figura 60. Animación de contornos.

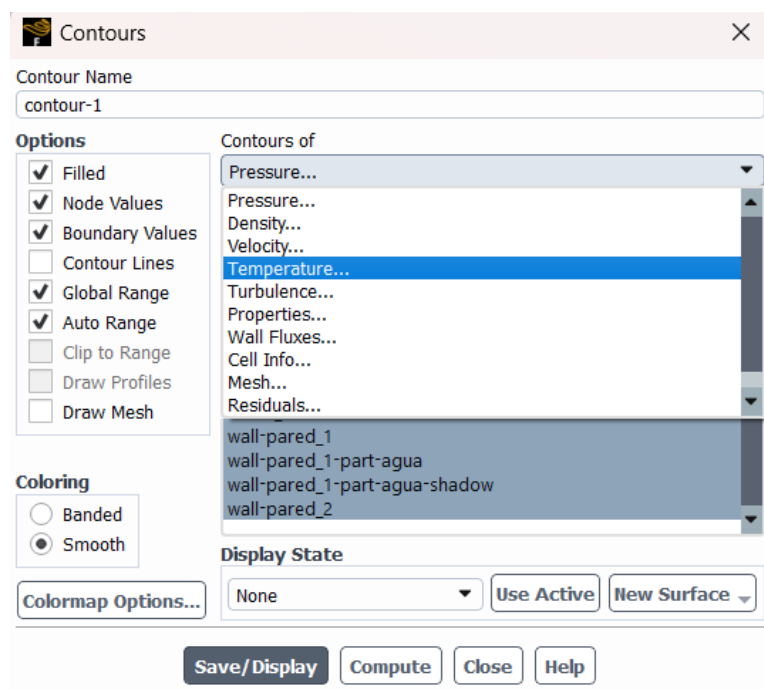


Figura 61. Selección del contorno de temperatura.

Se crea un nuevo plano para la toma de datos en la simulación como se muestra en la figura 63.

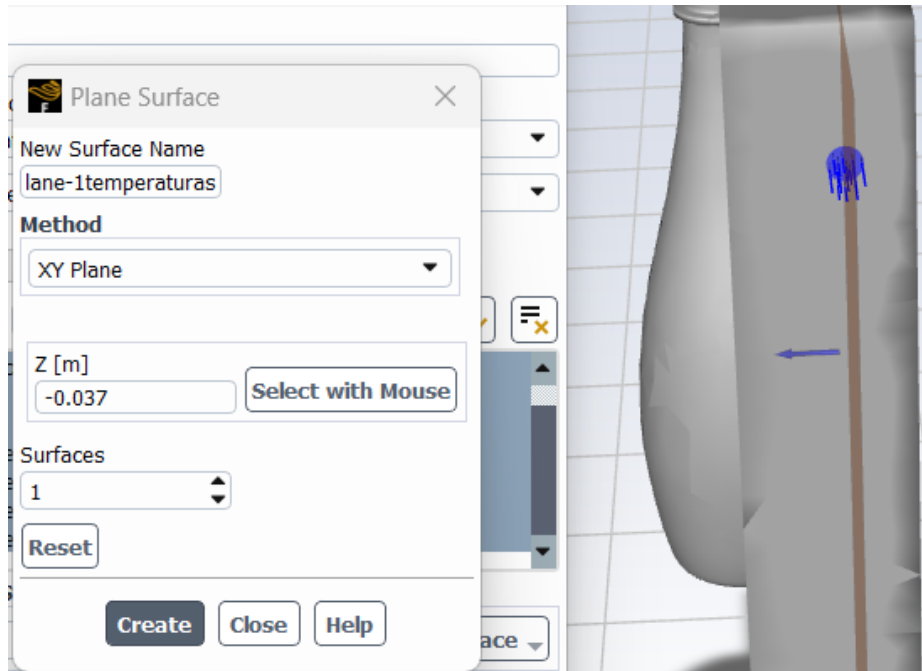


Figura 62. Plano de temperatura.

En la figura 64 muestra el contorno para el sistema de enfriamiento.

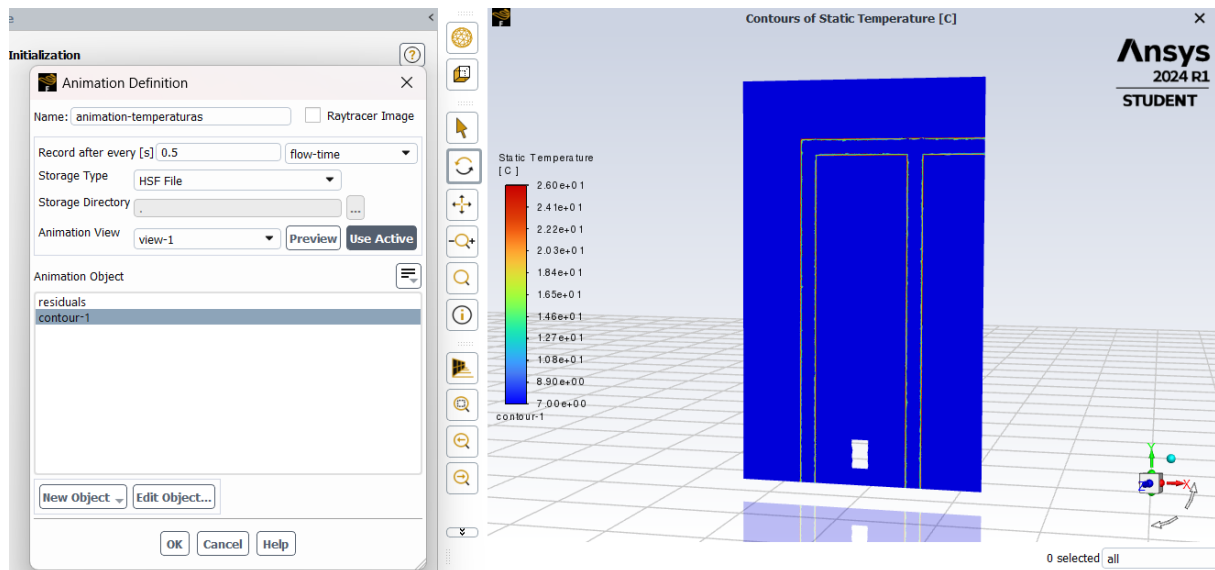


Figura 63. Contorno de temperaturas para el sistema de refrigeración del molde.

Figura 65 muestra la simulación de animación finalizada.

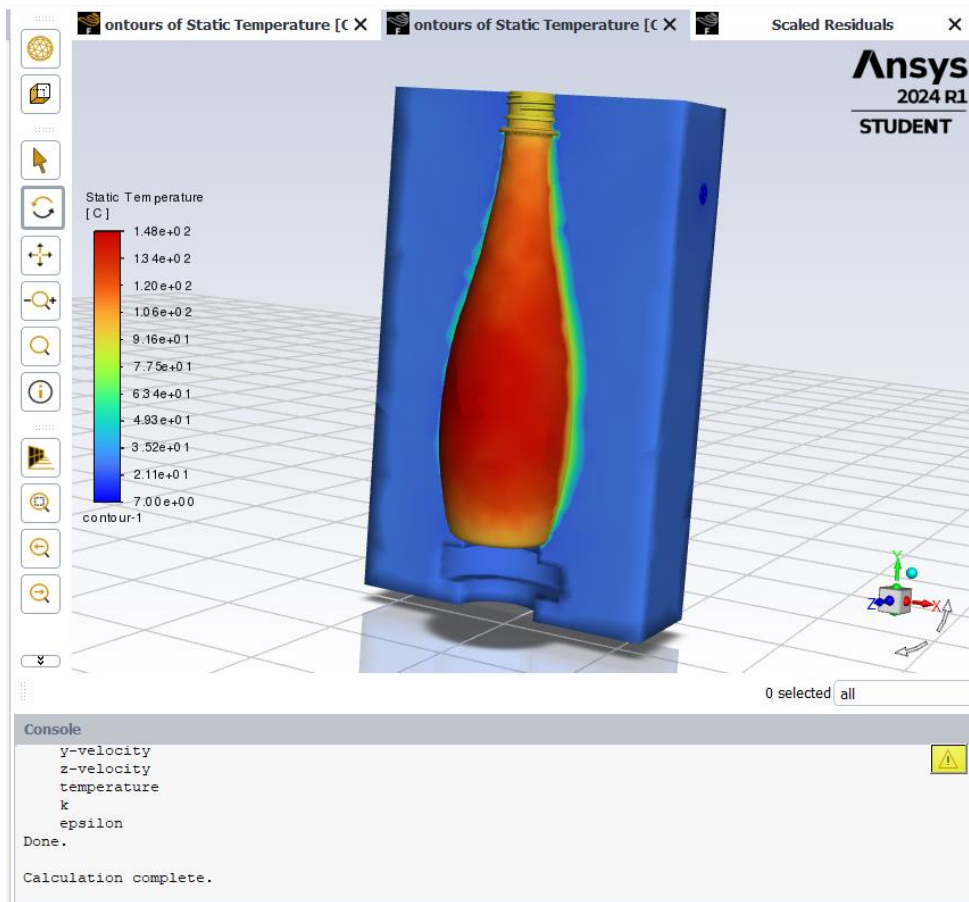


Figura 64. Animación del contorno finalizado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

4.1 Análisis térmico del molde

Al simular el molde de refrigeración para el envase de 500 ml se hizo un análisis previo en los mecanismos de transferencia de calor por lo que permite de esta manera evaluar una temperatura inicial, en este caso se toma la de 25 °C para el molde. Para esto se realizó 3 planos de cada uno un corte don una profundidad de 10 mm, 19 mm y 37 mm como se representa en la figura 66 y 67.

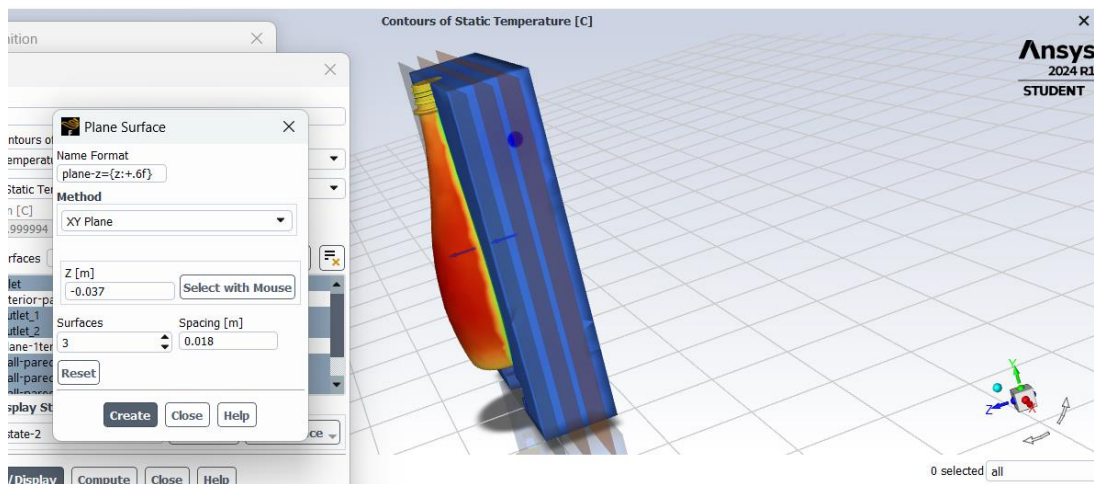


Figura 65. Cortes para el análisis de temperatura del molde.

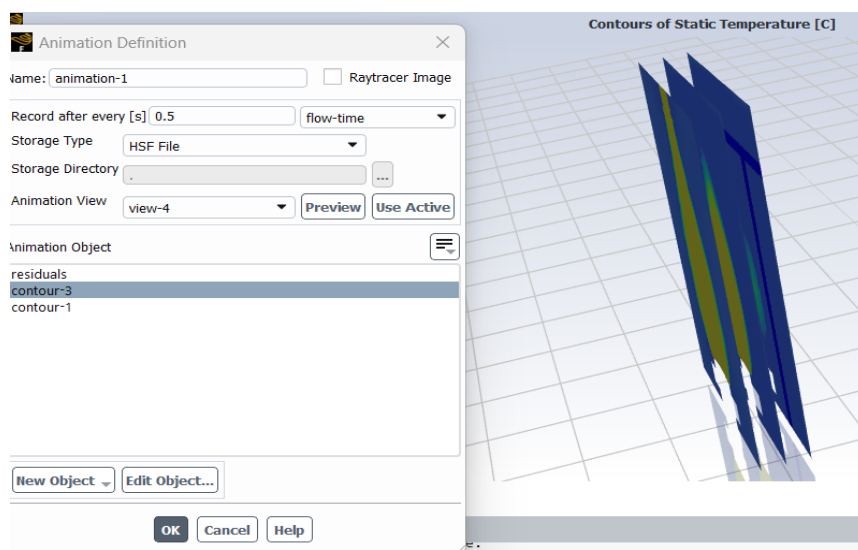


Figura 66. Contorno para la animación de los cortes del molde.

Para la figura 68 se muestra la temperatura máxima que logra alcanzar la simulación que es de 72 °C en el tiempo de cuatro segundos, a su vez se concentra en las paredes en el contacto de entre el envase y el molde. Añadiendo que la temperatura predominante es de 26 °C.

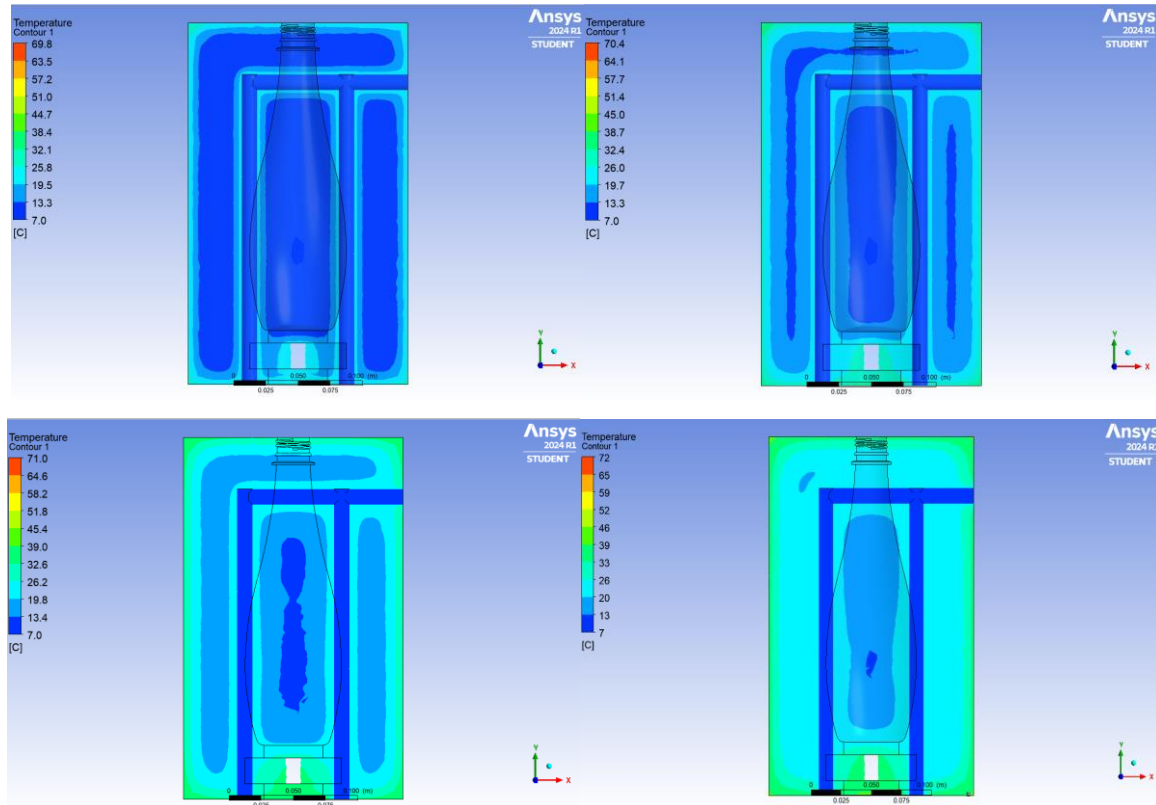


Figura 67. Análisis de temperatura del molde en el corte del plano 1 con (profundidad de 37mm).

En este caso hay que notar el aumento de la temperatura del tiempo 1 que es de 69.8 °C, al cabo de 4 s es de 72 °C, esto es producto de que existe un mayor contacto con la sección del cuello del envase y las paredes del molde.

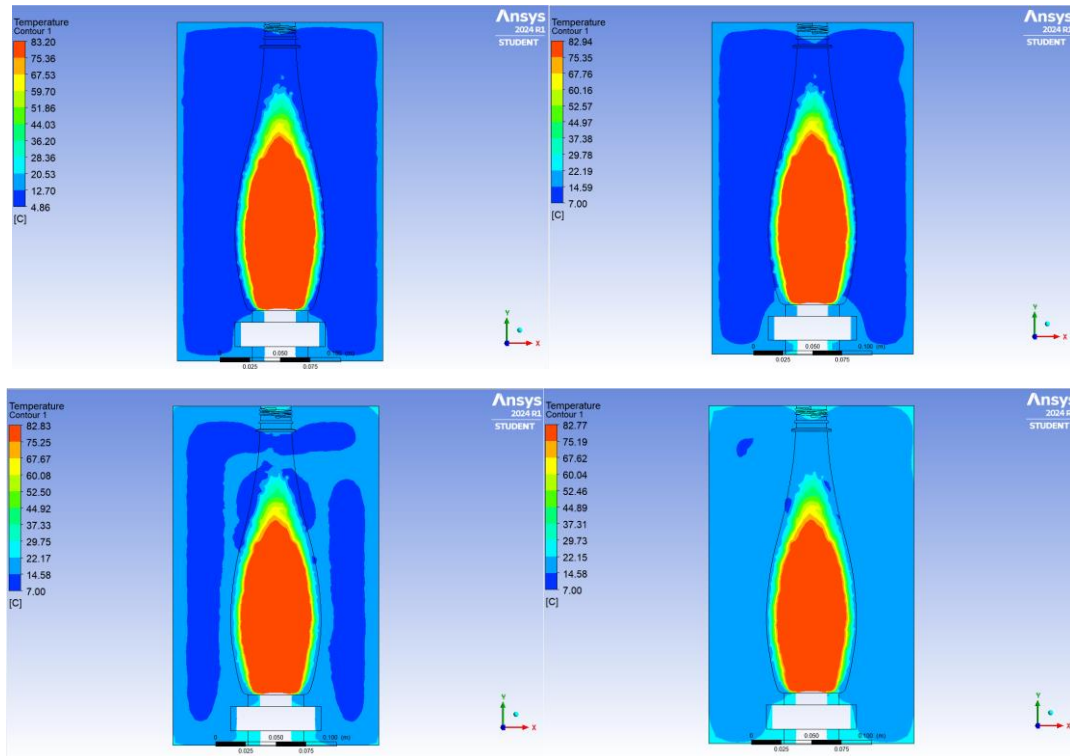


Figura 68. Molde análisis de la temperatura del corte 2 (profundidad: 19 mm).

Se logra observar que en la figura 69 donde el caso del corte del plano 2 la temperatura máxima es de 83.20 °C en el primer segundo a diferencia del del momento del segundo 4 que existe una disminución de temperatura de 82.77 °C. Para el corte en el plano 3 del molde se aprecia que la temperatura tiene una ligera elevación siendo la temperatura máxima y mínima de 83.20 °C y 5° C como se puede observar en la figura 70.

Zonas de alta temperatura (alrededor de 83.20 °C):

- Se observan principalmente en las paredes gruesas del envase, debido a la mayor resistencia al flujo de calor en estas zonas.
- Es importante considerar el efecto de enfriamiento en estas zonas para evitar la formación de puntos de debilidad en el envase.

Zonas de baja temperatura (alrededor de 5 °C):

- Se ubican principalmente en las zonas delgadas del envase, donde el calor se disipa por la temperatura del molde y el sistema de refrigeración de este.
- Las zonas pueden presentar mayor rigidez y menor flexibilidad, lo que podría afectar la funcionalidad del envase.

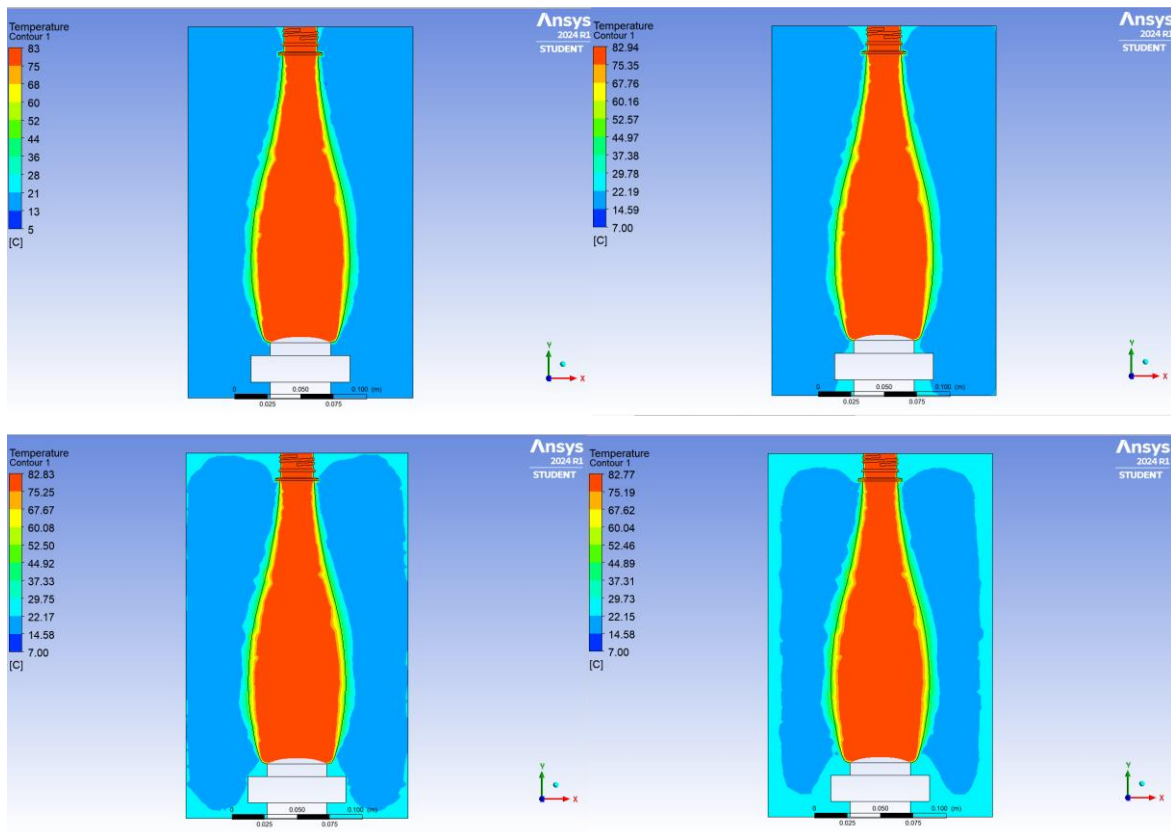


Figura 69. Molde análisis de la temperatura del corte 3 (profundidad: 1 mm).

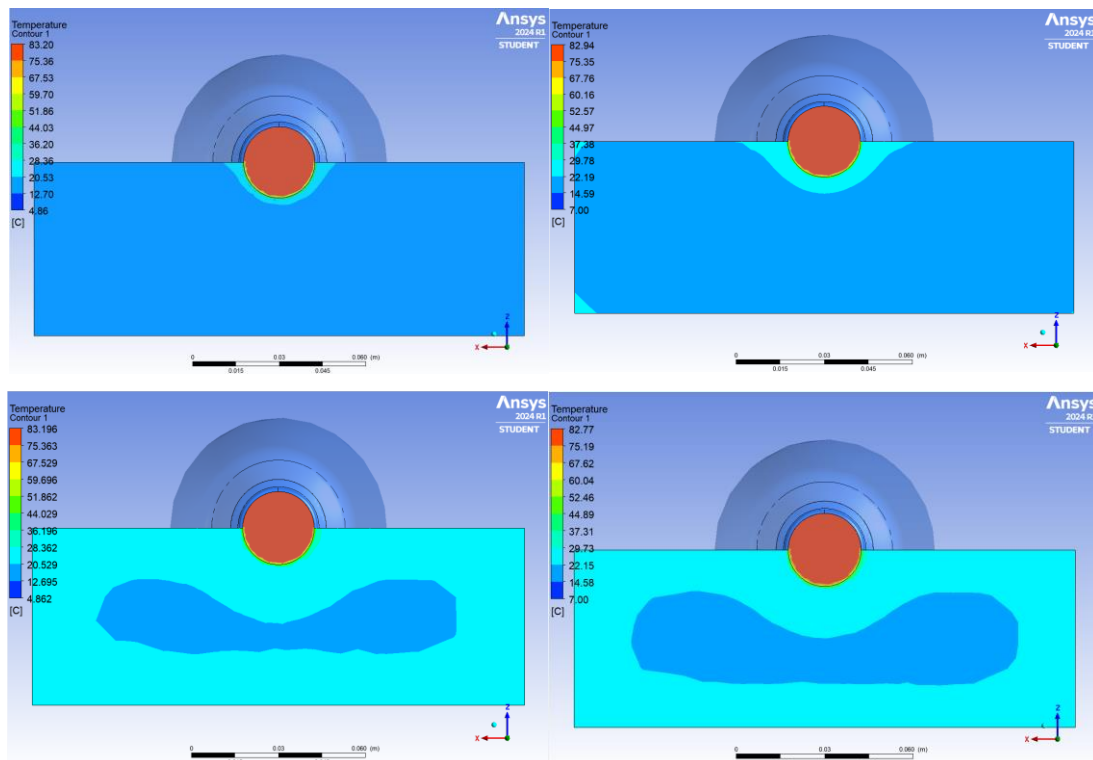


Figura 70. Análisis de temperatura de asiento del molde.

En el caso de la figura 71 se aprecia las temperaturas del asiento del molde, donde la temperatura máxima del asiento es de 83.20 °C donde se tiene mayor presencia al tener contacto con el envase y la temperatura mínima es de 4.86 °C. Los datos de la tabla 10 se basa en la figura 68 y 70.

Tabla 10. Resultados de temperaturas simulación CFD.

Sección	Temperatura
Sistema de refrigeración y molde	13.4 °C
Molde	26 °C
Molde y envase	82.77 °C

4.2 Resultados analíticos vs la simulación

Los cálculos analíticos a continuación corresponden al proceso térmico del molde para luego realizar la comparación con el proceso simulado en CFD, para esto se toma los datos obtenidos de las ecuaciones ya planteadas. Para obtener la de la temperatura superficial del sistema de refrigeración se usó la ecuación:

$$\dot{q}_s = h(T_s - T_m) \quad (20)$$

Donde se despeja T_s para obtener la temperatura del sistema de refrigeración por lo cual la ecuación a utilizar es:

$$T_s = T_m + \frac{\dot{q}_s}{h} \quad (21)$$

Donde

T_m : Es la temperatura promedio del flujo [°C]

$$T_s = 10 + \frac{5997.3}{2320}$$

$$T_s = 12.58 \approx 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, el sistema de refrigeración está a un aproximado de 13 °C. donde se localiza a unos 37 mm de profundidad en el molde.

Para la siguiente temperatura cuatro segundos se utilizó la ecuación (16) donde al despejar se obtiene el dato de la temperatura del molde:

$$T_w = T_c - \frac{\dot{Q}}{h} \quad (22)$$

$$T_c = 40 - \frac{390000}{26000}$$

$$T_c = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el molde y el envase se puede aplicar de igual forma la ecuación 21 donde:

$$T = 40 + \frac{1800}{36}$$

$$T = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 11. Resultados analíticos del molde.

Sección	Temperatura
Sistema de refrigeración y molde	13 °C
Molde	25 °C
Molde y envase	90 °C

Tabla 12. Resultados simulación vs resultados analíticos.

Sección	Temperatura simulación	Temperatura
Sistema de refrigeración y molde	13.4 °C	13 °C
Molde	26 °C	25 °C
Molde y envase	82.77 °C	90 °C

La Tabla 12 presenta una comparación entre las temperaturas obtenidas a través de una simulación y los resultados obtenidos mediante un análisis teórico (analítico) para 3 secciones del molde relacionado con el proceso enfriamiento de este. Donde el sistema de refrigeración y molde, en la simulación arrojó una temperatura de 13.4 °C, mientras que el análisis teórico indicó 13 °C. Esto sugiere una muy buena concordancia entre ambos métodos en esta sección; para el molde la simulación obtuvo una temperatura de 26 °C, ligeramente superior a los 25 °C del análisis teórico. Nuevamente, se observa una buena aproximación entre ambos resultados y para finalizar entre el envase y el molde se aprecia una diferencia más significativa porque la simulación indica una temperatura de 82.77 °C, mientras que el análisis teórico señala 90 °C. Aunque existe una diferencia, ambos valores indican una temperatura elevada en esta zona, por lo que está relacionado con el proceso de moldeo en contacto entre el molde y el envase.

CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento térmico del molde de estriado-soplado en distintos puntos durante el proceso de refrigeración con el uso de softwares como herramientas para la simulación; para el diseño del molde y el envase de 500 ml se elaboraron en Solidworks, y para el estudio del comportamiento térmico se lo realizó en ANSYS Fluent, los parámetros que se usaron para la simulación se resolvieron mediante ecuaciones de transferencia de calor de forma analítica las ecuaciones usadas son la ley de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton. Estas ecuaciones son base para obtener los datos para introducir al software por lo tanto las propiedades del material del molde y el envase de 500 ml se obtuvieron mediante tablas con las temperaturas deseadas a simular.

Para el comportamiento térmico en diferentes puntos se dividió el molde en tres planos con una profundidad de 10 mm, 19 mm, 37 mm. Cada una de estas medidas se escogieron por lo cual se conoció las temperaturas en el sistema de refrigeración del molde para un envase de 500 ml. Para esto en la profundidad de 37 mm se encuentra el sistema de refrigeración donde el flujo de agua transfiere y disipa el calor generado por el ambiente y el proceso de enfriamiento del envase PET por tanto en esa profundidad el molde se encuentra en una temperatura que oscila desde los 16 °C hasta 20 °C. Para el plano dos de 19 mm para esta profundidad fue seleccionada por lo que es un punto intermedio entre el sistema de refrigeración y el que está en contacto con la temperatura ambiente y el molde en este punto se presenta un proceso de conducción de calor en este punto se ve que las temperaturas oscilan de 26 °C a 40 °C, para el plano 3 que tiene una profundidad de 10 mm se lo tomo ya que es un punto cercano al punto de contacto con la botella en esta sección del molde se nota un incremento de temperatura por lo que el envase se encuentra a un rango de 90 °C a 97 °C por lo tanto el molde al recibir esta cantidad de flujo de calor la temperatura del molde en esta sección es más alta como se muestra en la figura 70 donde en ciertas partes del molde llegan a una temperatura máxima de 83 °C.

Por lo tanto, el envase se encuentra en una temperatura ideal de entre 80 a 100 °C en el momento de 4s donde está un poco más arriba de la temperatura vítrea (T_g) que aproximadamente es de 70 a 80 °C y asegurando que está por debajo de la temperatura (T_c) de esta manera el envase no se cristaliza de manera excesiva o proceda ser frágil y opaco lo cual no es deseado para la producción.

Otro punto importante que se tomo es el diseño del sistema de refrigeración, el diseño interno por donde pasa el flujo de agua se basa en un diseño ya elaborado donde existe cambios en las dimensiones, por lo que estas influyen en el proceso para enfriar el molde las dimensiones ocupan gran parte interna del molde lo cual beneficio en una distribución más homogénea lo cual provoca que minimice variaciones de temperatura las dimensiones fueron tres cortes dos verticales y uno horizontal que se conectan entre sí, las salidas y la entrada tiene un diámetro de 12 mm como se muestra en la figura del anexo 1 en el plano del molde de 500 ml.

RECOMENDACIONES

Dado la importancia del sistema de refrigeración en la distribución de la temperatura en el molde, se recomienda realizar estudios más detallados para mejorar el diseño en el cual puede incluirse la evaluación de diferentes geometrías de los canales de refrigeración, variación de caudal de agua.

Si bien se utilizaron tablas para obtener las propiedades del material del molde y el envase, se sugiere profundizar en el análisis de la influencia de estas propiedades en el comportamiento térmico del sistema ya sea al trabajar con otros materiales o refrigerantes.

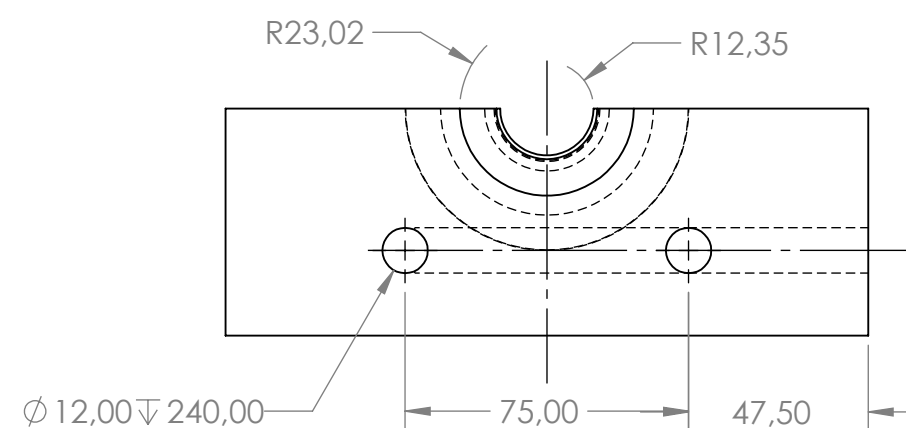
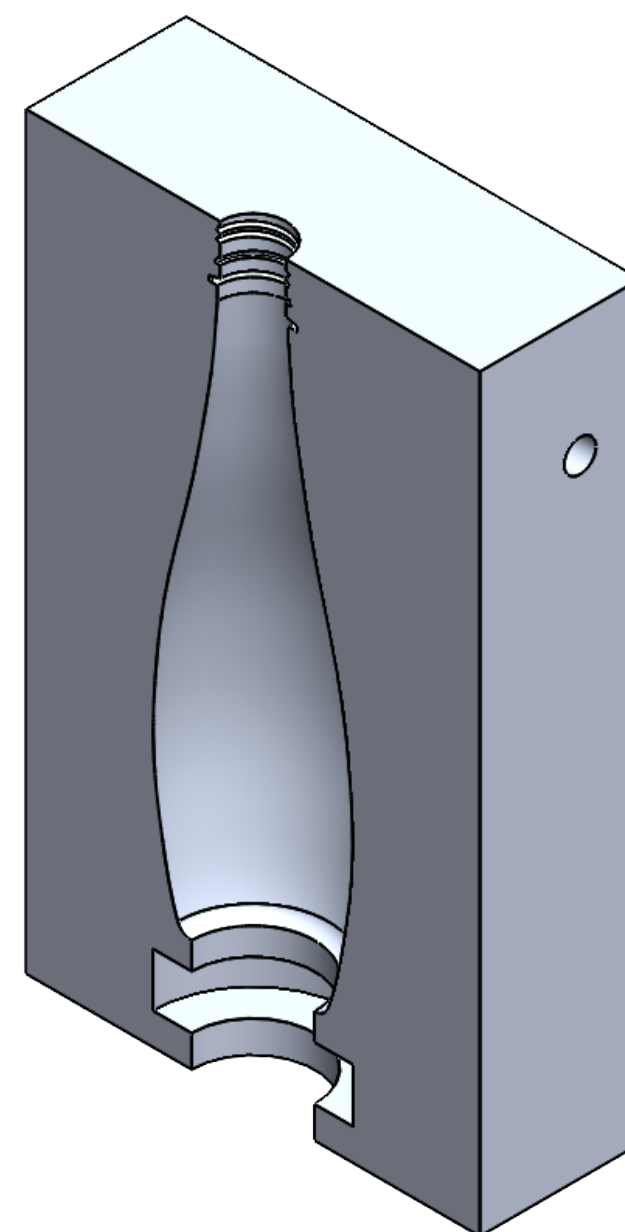
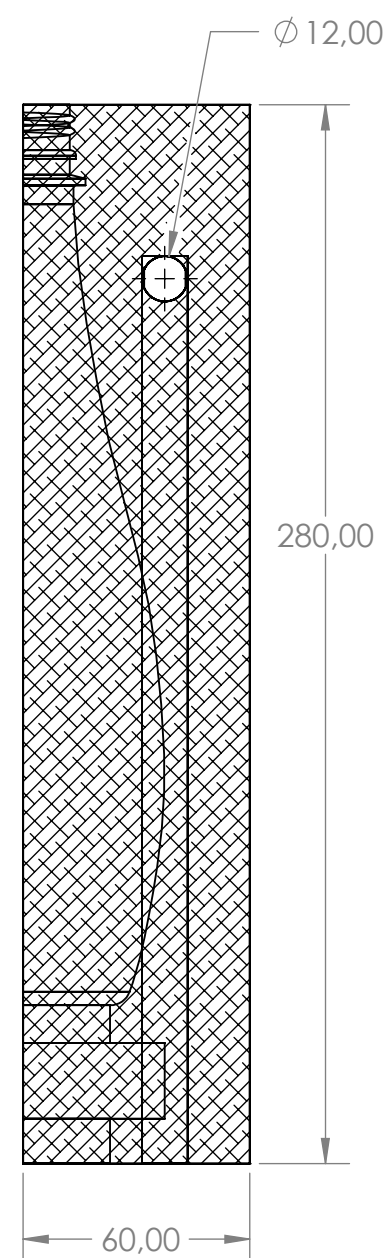
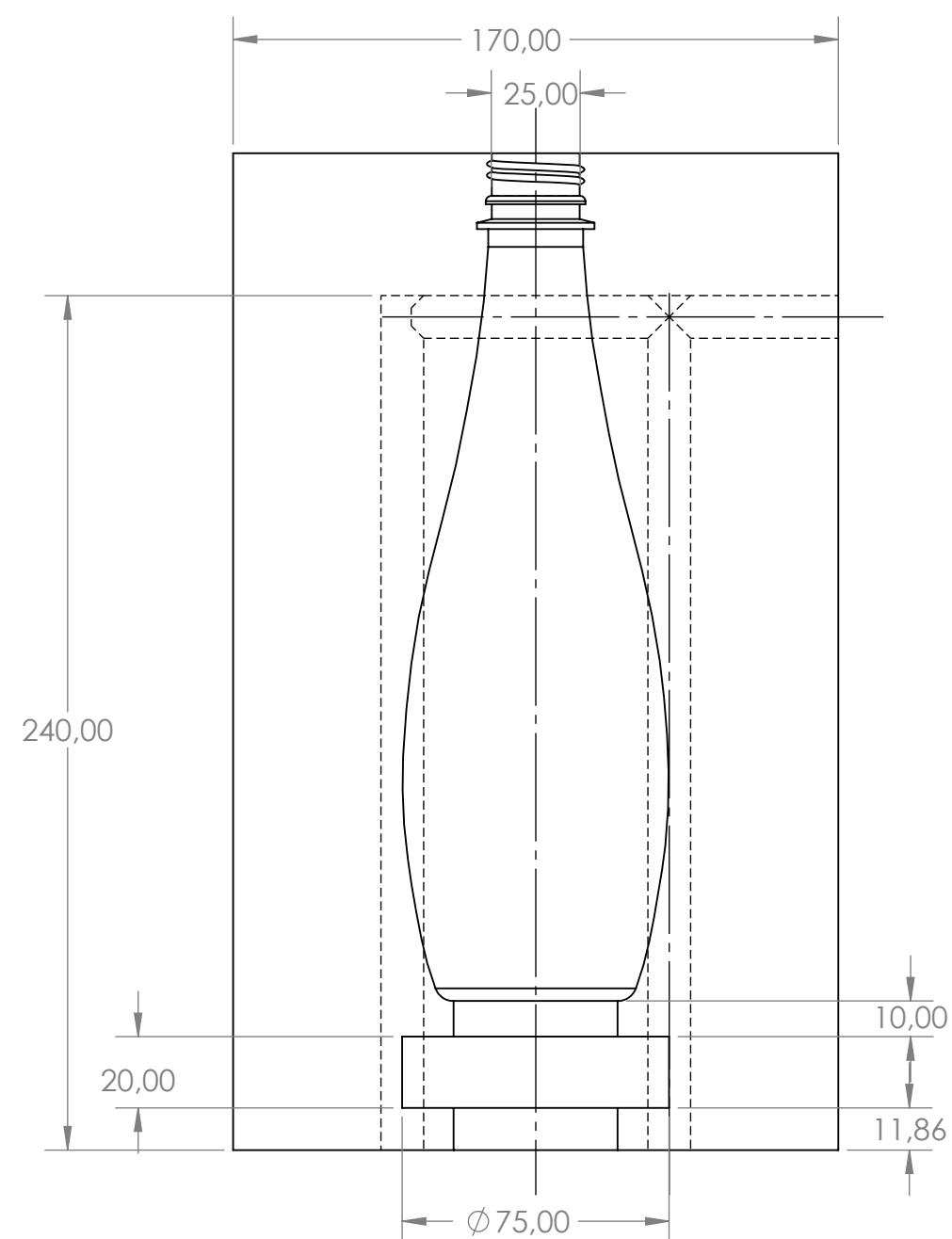
Las diferencias de temperatura en el molde pueden generar tensiones térmicas que pueden afectar la vida útil del molde y la calidad del producto. Se sugiere realizar un análisis de estrés térmico para identificar las zonas más críticas del molde y proponer medidas para reducir las tensiones térmicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

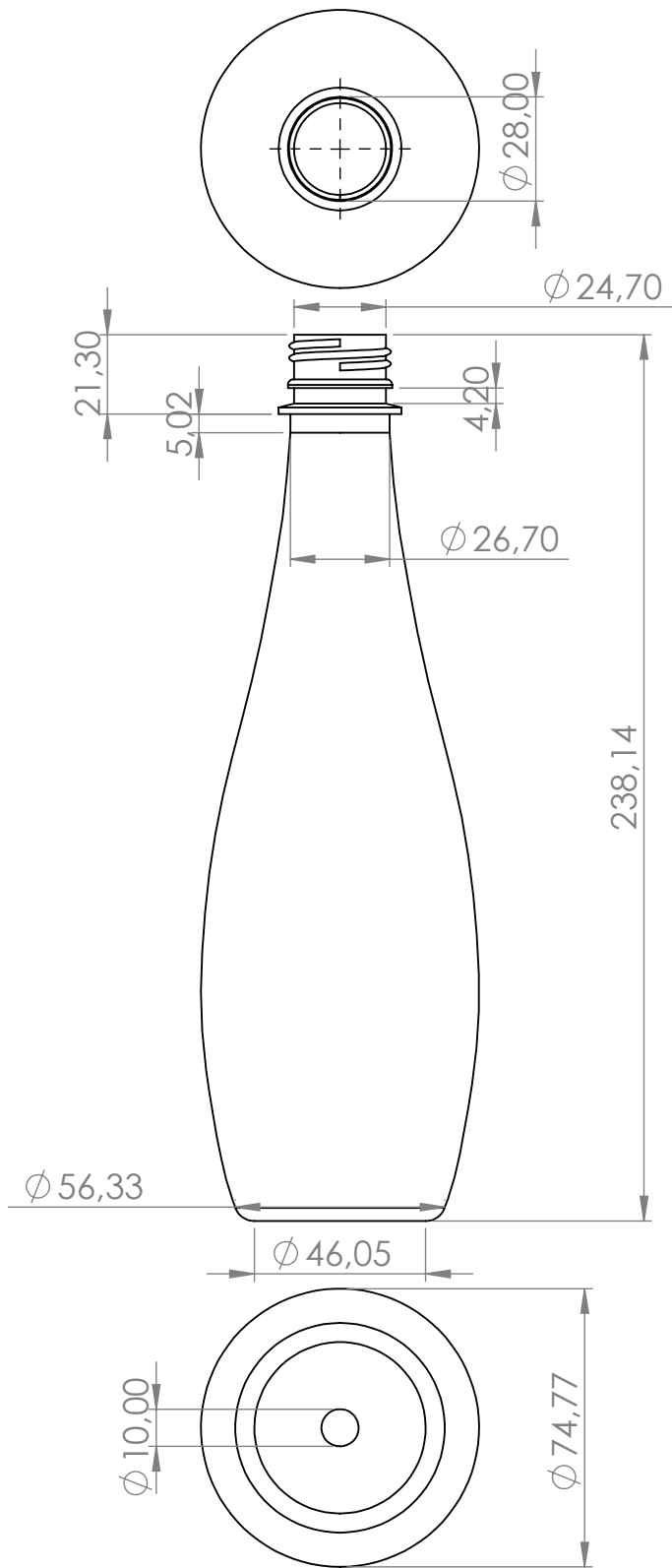
- [1] S. Gupta, V. Uday, A. S. Raghuwanshi, S. Chowkshey, S. N. Das, and S. Suresh, "Simulation of Blow Molding Using Ansys Polyflow," *APCBEE Procedia*, vol. 5, pp. 468–473, 2013, doi: 10.1016/j.apcbee.2013.05.079.
- [2] T. Smyth, G. Menary, and M. Geron, "Numerical modelling of heat transfer in a cavity due to liquid jet impingement for liquid supported stretch blow moulding," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1960, 2018, doi: 10.1063/1.5034938.
- [3] P. Wawrzyniak and W. Karaszewski, "A literature survey of the influence of preform reheating and stretch blow molding with hot mold process parameters on the properties of PET containers. Part II," *Polimery*, vol. 65, no. 06, pp. 437–448, 2020, doi: 10.14314/polimery.2020.6.3.
- [4] F. L. Serrano and Eduardo Mendizabal, *Introduccion a La Ciencia De Los Polimeros*, no. December. Guadalajara, Jalisco: Universidad de Guadalajara, 2015. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48257406/introduccion-a-la-ciencia-de-los-polimeros1-libre.pdf?1471964383=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DINTRODUCCION_A_LA_CIENCIA_DE_LOS_POLIMER.pdf&Expires=1712025801&Signature=cXZVzgMI0EPC3CWLGC
- [5] D. A. A. RAMÍREZ., "Simulación Del Proceso De Transferencia De Calor Para El Moldeo De Preformas De Pet," *Univ. Autónoma del Estado México*, p. 104, 2019, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/104832>
- [6] F. Castillo, "Conformado de materiales plásticos," *Univ. Nac. Autónoma México*, p. 86, 2017, [Online]. Available: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado de plasticos.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado_de_plasticos.pdf)
- [7] N. Braidot, "Manual Entrenamiento SFR Evo," *SIPA Plast. Packag. Syst.*, vol. 1, no. Abril, p. 396, 2017, [Online]. Available: <http://www.sipa.it>
- [8] V. Veneto, "The state of the art of linear blow moulding technology," *SIPA Zoppas Ind.*, no. Abril, p. 8, 2024, [Online]. Available: <https://neofyton.com/wp-content/uploads/2019/10/Sistemi-za-proizvodnju-PET-plasticnih-flasa-model-SFL-1XL-for-large-sizes.pdf>

- [9] S. Yan, G. Menary, and J. Nixon, “A novel methodology to characterize the constitutive behaviour of polyethylene terephthalate for the stretch blow moulding process,” *Mech. Mater.*, vol. 104, pp. 93–106, 2017, doi: 10.1016/j.mechmat.2016.10.006.
- [10] Tecnología del plástico, “Moldeo por soplado: todo lo que necesita saber,” Axioma Group S.A.S. Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/moldeo-por-soplado-todo-lo-que-necesita-saber>
- [11] N. Rosa, J. Costa, and A. G. Lopes, “CFD study of transient heating and cooling of a blank mould with a conformal cooling channel for manufacturing glass containers,” *Results Eng.*, vol. 17, no. December 2022, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100932.
- [12] ANSYS FLUENT 13 User’s Guide, “Ansys Fluent Theory Guide,” *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, no. November, pp. 724–746, 2013.
- [13] O. Brandau, *Stretch Blow Molding*. OXFORD: PDL HANDBOOK SERIES, 2018.
- [14] V. V. R. ERNESTO, “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA DE SOPLADO DE ENVASES PET EN EMBOL S.A,” pp. 1–263, 2016, [Online]. Available: <https://dicyt.uaajms.edu.bo/investigacion/index.php/quimica/article/view/267>
- [15] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*, Cuarta edi. México: C.P. 01376, México, D.F., 2013. [Online]. Available: https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_McGraw_Hill
- [16] R. Maliza and R. Elena, “Tecnología de Fabricacion de moldes para optimizar el proceso de moldeo por soplado de envases Pet, en una planta embotelladora de bebidas,” *Repo.Uta.Edu.Ec*, p. 130, 2011, [Online]. Available: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>
- [17] J. Oliver, “Implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de estructuras soldadas de aluminio,” *Libro*, pp. 1–11, 2005, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2833/41774-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

ANEXOS



1	Molde de envase				Duraluminio 7075		
Ref.	Placa Base:	Cnt.	Norma	Localiz.	Material	Dim. Brutas	Observaciones
CARRERA DE INGIENIERÍA MECÁNICA			UPS	Diseño:	Pasquel Kevin	01-05-2024	
				Dibujó:	Pasquel Kevin	01-05-2024	
				Revisó:	Juiña Luis	19-07-2024	
CONTENIDO			Escala: 1:2	Código:	01.0000.01		Tol. Gral.: ± 0.5



Tratamiento térmico:	NA	Material:	PET	Dim. brutas	NA
Recubrimiento:	NA	Diseño:	Pasquel Kevin		01-05-2024
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	UPS	Dibujó:	Pasquel Kevin		01-05-2024
		Revisó:	Juiña Luis		19-07-2024
		Código:	01.0000.01	Tol. Gral.:	± 0.5
CONTENIDO	Escala: 1:2				