



POSGRADOS

Maestría en

Ingeniería Mecánica con mención en Modelamiento De Materiales Y Procesos De Producción

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

DESARROLLO DE UN MODELO
COMPUTACIONAL MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS DEL
TERMOFORMADO DE GABINETES
MODELO RI-480

AUTOR:

ESTEBAN ENMANUEL BRAVO MOSQUERA

DIRECTOR:

LUIS MARCELO LÓPEZ LÓPEZ

CUENCA – ECUADOR

2023

Autor:**Esteban Emanuel Bravo Mosquera**

Ingeniero Mecánico

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica por
la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

ebravom@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Luis Marcelo López López**

Ingeniero Mecánico

Máster en Sistemas Integrados

Doctor en Ingeniería Industrial

llopez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA– ECUADOR – SUDAMÉRICA

ESTEBAN ENMANUEL BRAVO MOSQUERA

Desarrollo de un modelo computacional mediante elementos finitos del termoformado de gabinetes modelo RI-480

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi hermosa Familia a mi esposa Andrea y a mis dos hijas Ángela y Martina que han sido y serán con su AMOR el motor que mueven mi vida que sin ellas nada de lo que se ha hecho tendría sentido; pero que han estado siempre ahí para darme sus fuerzas en mis momentos de flaqueza.

A mis padres Enma y Patricio; que han estado ahí cuando los he necesitado no nos han abandonado y nos apoyaron siempre para alcanzar los sueños trazados; a mis hermanos Jimmy y Juan Diego son importantes en nuestras vidas y siempre serán ejemplo de entrega y vigor para el trabajo.

A mis queridos suegros Carmen y Rigoberto que también son parte de este viaje que nos ayudaron siempre y nunca dudaron en apoyarnos cuando lo necesitamos.

Con cariño Esteban.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dios de la vida que me ha permitido tener lo que tengo y que sus bendiciones siempre presentes en cada amanecer nos ha ayudado a llegar a este final que nos es más que un nuevo comienzo; gracias PAPITO DIOS.

Quiero agradecer a mi FAMILIA a todos los que nombre anteriormente y que tienen un lugar muy especial en mi corazón y que sin ellos no se podrían alcanzar los objetivos; gracias mi AMOR Andrea y mis princesas ÁNGELA – MARTINA son ustedes parte de este sueño que espero alcanzar son ustedes las que logran que cuando no hay ánimo se reactiven los motores para seguir adelante.

Gracias a la UPS por los conocimientos brindados y el respaldo que ha sido para lograr la meta, a mi director el Ing. Luis López que me apoyo y creyó en mí para terminar con éxito este pequeño pero a la vez gran trabajo investigativo.

Al Ing. Juan Galarza que con su aporte desinteresado y aporte de conocimiento no dejo que esto se ahogue y se acabe; gracias infinitas amigo.

GRACIAS A TODOS QUE DE UNA U OTRA FORMA AYUDARON A QUE ESTO SEA UNA REALIDAD.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	IX
Abstract	X
1. Introducción	1
2. Determinación del Problema	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Importancia y alcances	5
2.3. Delimitación	6
2.3.1. Geográfica	6
2.3.2. Temporal	6
2.3.3. Sectorial	7
2.3.4. Justificación	7
3. Objetivos	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos específicos	8
4. Marco teórico referencial	9
4.1. Termoformado	9
4.2. Poliestireno	12
4.2.1. Estructura química del poliestireno	12
4.2.2. Tipos de poliestireno	13
4.2.2.1. De acuerdo a su fabricación, el poliestireno se puede clasificar en:	13
4.2.2.2. De acuerdo a su composición química y aleantes, el poliestireno se puede clasificar en:	14
4.2.3. Propiedades del poliestireno	16
4.2.4. Características del poliestireno	16
4.3. Simulación	17

4.4. Proceso de Termoformado por lámina apoyada	20
4.5. Ansys Fluent (CFD)	22
5. Metodología	23
5.1. Metodología de la investigación	23
5.2. Metodología del proceso	24
5.2.1. Establecimiento de los parámetros y restricciones iniciales para el modelo computacional con elementos finitos en el proceso de termoformado	24
5.2.1.1. Proceso de termoformado en la línea de producción de gabinetes para refrigeradoras modelo RI-480	24
5.2.1.2. Parámetros del material	26
5.2.1.3. Parámetros del software	28
5.2.2. Propuesta del modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480	37
5.2.2.1. Modelo viscoelástico newtoniano	37
5.2.2.2. Pseudo plasticidad bajo cizalla simple	38
5.2.3. Evaluación del modelo computacional mediante elementos finitos propuesto para la validación del proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480	41
6. Resultados y discusión	52
6.1. Establecimiento de los parámetros y restricciones iniciales para el modelo computacional con elementos finitos en el proceso de termoformado	52
6.1.1. Propiedades del poliestireno.	52
6.1.2. Temperatura y Dimensiones	53
6.1.3. Velocidad del molde para el termoformado	54
6.1.4. Presión de inflación de la lámina	54
6.1.5. Mallado del molde	54
6.2. Propuesta del modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador del modelo RI-480	55
6.2.1. Ecuación de Navier-Stokes	55
6.2.2. Ecuación de Jeffreys	55
6.2.3. Ecuación de White-Metzner	55
6.2.4. Ecuación de Olroyd	55

6.3. Evaluación el modelo computacional mediante elementos finitos propues- to para la validación del proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480	56
6.3.1. Evaluación de la calidad del mallado	56
6.3.2. Evaluación de la pre-inflación de la lámina polimérica	56
7. Conclusiones	61
Referencias bibliográficas	66
ANEXOS	67
Anexo A: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: Americas) . .	68
Anexo B: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: Americas) . .	69
Anexo C: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: China)	70
Anexo D: Dimensiones del Gabinete modelo RI-480	71

Lista de Tablas

2.1. Defectos presentados en el gabinete de la refrigeradora	4
2.2. Polímeros utilizados en el proceso de termoformado	5
4.1. Estructura química del poliestireno	12
4.2. Principales propiedades del poliestireno	16
4.3. Principales características del poliestireno	17
4.4. Sistema de mejora de procesos	19
5.1. Propiedades del poliestireno	26
5.2. Propiedades del poliestireno configuradas.	28
5.3. Velocidad del molde durante el proceso de termoformado	34
5.4. Presión de inflación durante el proceso de termoformado	35
5.5. Datos obtenidos de la pre-inflación de la lámina	49
6.1. Propiedades del poliestireno	52
6.2. Propiedades del poliestireno configuradas.	53
6.3. Temperatura de termoformado y dimensiones de la geometría	54
6.4. Velocidad del molde para el termoformado	54
6.5. Configuración del mallado del molde	55
6.6. Calidad del mallado del molde	56
6.7. Datos de la evaluación de la pre-inflación	57
6.8. Cuadro comparativo de espesores medidos versus lo simulado.	58
6.9. Variación del espesor de acuerdo al número de segmentos	59
6.10. Variación de los factores Skewness y Element Quality con respecto al número de segmentos	60

Lista de Figuras

2.1. Ubicación del lugar de investigación	6
4.1. Termoformado con calentamiento de la lámina y vacío	10
4.2. Termoformado con calentamiento de la lámina y punzón	11
4.3. Poliestireno expandido	13
4.4. Poliestireno extruido	14
4.5. Poliestireno cristal	14
4.6. Poliestireno de alto impacto	15
4.7. Alternativas de cambio en el proceso	18
4.8. Termoformado de láminas	20
4.9. Simulación del termoformado de láminas	21
5.1. Lámina de Poliestireno de Alto Impacto	27
5.2. Mapa de temperaturas de termo	29
5.3. Geometría del gabinete	30
5.4. Presión de vacío	31
5.5. Temperatura de la lámina y el molde (Sistema Adiabático)	31
5.6. Mallado del molde de terformado	32
5.7. Mallado del molde de terformado	33
5.8. Velocidad del molde de termoformado	34
5.9. Presión de inflación de la plancha	35
5.10. Viscosidad de poliestirenos	38
5.11. Determinación de los factores Skewness – Aspect Ratio	42
5.12. Determinación de los factores Element Quality – Ortogonal Quality	43
5.13. Determinación del factor Smoothness	44
5.14. Interpretación del factor Skewness	45
5.15. Interpretación del factor Aspect Ratio	46
5.16. Interpretación del factor Ortogonal Quality	47
5.17. Pre-inflación para el termoformado	48
5.18. Variación del espesor al acoplarse el molde con la lámina polimérica	50
5.19. Molde configurado.	50

5.20. Configuración de optimizado del pre-estiramiento y termoformado	51
6.1. Zonas determinadas para la toma de medidas de los espesores	57
6.2. Comportamiento del espesor de acuerdo al número de segmentos	59
6.3. Comportamiento de los factores Skewness y Element Quality con respecto al número de segmentos	60

Resumen

El desarrollo del modelo aquí explicado tiene como finalidad proponer una simulación para el proceso de termoformado de un gabinete refrigerador del modelo SAMSUNG RT32K730SL como modelo base para una empresa de electrodomésticos, mediante el empleo de software ANSYS como una de las herramientas más versátiles que existen para dar soluciones técnicas idóneas a la mejora del producto, que le posibilite ser competitivo en el mercado Latinoamericano (LATAM); con el objeto de generar pronósticos con un componente probabilístico basado en la simulación realizada en el Ansys Fluent (CFD); posteriormente comparar los mismos con el termoformado real del gabinete del modelo RT32K730SL obtenidos a través de mediciones.

Primeramente, se realiza un análisis de los aspectos que influyen en el proceso de termoformado revisando, realizando una búsqueda bibliográfica y una selección de los parámetros que se utilizan en el proceso de termoformado, luego se clasifica la información adquirida para poder determinar las mejores opciones disponibles para validar y optimizar los resultados; los diseños de los gabinetes que forman en el proceso es una clave ya que en este caso del gabinete refrigerador del modelo RT32K730SL.

Posteriormente se describe de una metodología para el termoformado de los gabinetes mediante un programa de elementos finitos. Se inicia con el establecimiento de las características del programa y los parámetros disponibles dentro de los estudios realizados para que se puedan gestionar lo mejor dentro del mismo proceso de optimización. Después, se propone un procedimiento para la experimentación en la simulación y en el proceso dentro de la línea de refrigeradores; con los parámetros para a variar.

Por último, se evalúa el proceso de termoformado a través del estudio realizado; iniciando con la implementación de la metodología, por tanto, se ejecuta la simulación en el programa de Elementos Finitos. Posteriormente se efectúa la validación de los datos dentro del mismo proceso de la línea de refrigeradores. Después se evalúan los resultados obtenidos mediante cuadros ejecutados paralelamente se optimizan los parámetros con el programa ejecutado; se realiza una discusión de los resultados presentados, la misma que nos ayudara a verificar si es posible realizar la optimización a través de la simulación computacional.

Palabras clave: Termoformado, simulación, Ansys Fluent (CFD), poliestireno, medición, optimización.

Abstract

The development of the model explained here is intended to propose a simulation for the thermoforming process of a refrigerator cabinet of the SAMSUNG RT32K730SL model as a base model for a home appliance company, through the use of ANSYS software as one of the most versatile tools that exist. To provide suitable technical solutions to improve the product, which enables it to be competitive in the Latin American market (LATAM); in order to generate forecasts with a probabilistic component based on the simulation carried out in the Ansys Fluent (CFD); then compare them with the actual thermoforming of the RT32K730SL model cabinet obtained through measurements.

First, an analysis of the aspects that influence the thermoforming process is carried out by reviewing, carrying out a bibliographic search and a selection of the parameters that are used in the thermoforming process, then the information acquired is classified in order to determine the best available options. to validate and optimize the results; the designs of the cabinets that are formed in the process is a key, since in this case the refrigerator cabinet of the RT32K730SL model.

Subsequently, a methodology for thermoforming cabinets using a finite element program is described. It begins with the establishment of the characteristics of the program and the parameters available within the studies carried out so that the best can be managed within the same optimization process. Afterwards, a procedure for experimentation in the simulation and in the process within the line of refrigerators is proposed; with the parameters to vary.

Finally, the thermoforming process is evaluated through the study carried out; Starting with the implementation of the methodology, therefore, the simulation is executed in the Finite Elements program. Subsequently, the validation of the data is carried out within the same process of the refrigerator line. Afterwards, the results obtained are evaluated through tables executed in parallel, the parameters are optimized with the executed program; A discussion of the results presented is carried out, which will help us to verify if it is possible to perform the optimization through computational simulation.

Keywords: Thermoforming, simulation, Ansys Fluent (CFD), polystyrene, measurement, optimization.

1. Introducción

Según datos recuperados por Bonaglia, Goldstein, y Mathews (2007); Gfk Growth from Knowledge (2019) en los últimos años se ha evidenciado un crecimiento en la fabricación y producción de electrodomésticos, que a pesar de los tiempos difíciles para el sector industrial a nivel mundial, el mercado de electrodomésticos tuvo una buena primera mitad del año donde experimentó un crecimiento en valor global superior al 2,7%, donde se estimó que las ventas totales a final de año serán de 182.000 millones de euros para el año 2021.

Se prevé que el mercado de electrodomésticos crezca de una manera positiva debido a factores que impulsan la demanda de electrodomésticos en el mundo, como la rápida urbanización, el aumento de viviendas a escala mundial, un aumento en el ingreso per cápita de las personas y el cambio de las preferencias de los consumidores que están dispuestas a invertir más en electrodomésticos para reducir su consumo energético. Debido a los avances tecnológicos y la creciente digitalización, los consumidores son cada vez más conocedores de la tecnología y se inclinan cada vez más hacia los electrodomésticos modernos debido a todos los beneficios asociados con ellos y que ganan popularidad. La cantidad de electrodomésticos inteligentes que se están introduciendo en el mercado está aumentando rápidamente y la creciente aparición de hogares inteligentes está facilitando este aumento, además que pueden conectarse al teléfono del cliente y monitorearse de forma remota. También se anticipa que las innovaciones tecnológicas en la industria impulsarán la demanda de los principales electrodomésticos (Almeida, Moura, y Quaresma, 2020; Mordor Intelligence, 2022; Somos industria, 2018).

El reflejo de la realidad mundial se puede ver dentro de los mercados americanos que ha experimentado una reactivación y que ha permitido continuar con el desarrollo tal como lo menciona Yoelle Rojas, directora del Clúster de Electrodomésticos de Nuevo León – México, donde indica que “por muchos años estos productos se han elaborado en Asia, y ahora por el tema de la pandemia, los costos logísticos y tiempos, y debido a los cierres de los puertos a causa del Covid, se están abriendo nuevas oportunidades para desarrollar el mercado de electrodomésticos en México, y que pueda crecer y ser fabricante de estos productos”, esto también se ve reflejado en el mercado de Sudamé-

rica y en Ecuador que no se ha aislado de esta realidad, es por esto que la fabricación de este tipo de productos creció en un 72% en los últimos cinco años, según cifras del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (El Telégrafo, 2017), con esta realidad, la necesidad de termoformar más gabinetes para refrigeradores es sin duda alguna una de las principales necesidades a resolver por el volumen de elementos requeridos para el ensamblaje, ahora bien para entender este proceso se considera que el termoformado es un proceso industrial en el que la lámina (o película) termoplástica se procesa en una nueva forma utilizando calor y presión (Billmeyer, 2004; Groover, 2010; Raimond y Charles, 1995).

El termoformado es uno de los primeros procesos usados en la industria del plástico, es así que existen estudios desde los diseños de máquinas termoformadoras para la elaboración de piezas poliméricas, proponiendo su diseño mecánico, electrónico y de control de temperatura hasta la elaboración de la lámina de nitrato de celulosa para el conformado del gabinete del congelador, que se encuentra a menos de 0°C en una sección y a 2°C a 8°C en otra (Askeland, 1998; Miranda y Sacasari, 2023; Morales y Candal, 2006; Narváez, 2017).

Durante los dos últimos años se ha tenido la oportunidad de monitorear diferentes defectos que se presentan en gabinetes de refrigeradores al momento de termoformarlos, ya que se sabe que si bien no existe un alto número de gabinetes reciclados; son relevantes los defectos estéticos de los gabinetes por el mal termoformado de los mismos durante el proceso. Otro de los parámetros que se debe considerar en el proceso es la materia prima que se utiliza y que puede ser parte del análisis, ya que los componentes y su estructura en sí se evaluarán para la simulación, por lo general para este proceso lo que se utiliza para el termoformado es una plancha de poliestireno de donde nace el elemento final, el gabinete que no debe presentar defectos sobre todo estéticos que perjudiquen el producto en el caso de estudio una refrigeradora; y que es al cual se debe realizar el análisis (Espinoza, 2017). Finalmente, el uso de software para realizar simulaciones disminuye los tiempos en los procesos de producción en serie de la industria en general; específicamente esta situación no es ajena a la industria de línea blanca, por lo que hoy en día es imprescindible el uso de herramientas informáticas para conseguir una mayor efectividad en los procesos productivos de los productos (Cleary, 2004; Thomas, 1999).

Si se realiza una comparación con la metodología utilizadas por los mejores productores a nivel mundial de electrodomésticos, se puede concluir que la utilización de dichas prácticas de simulación en la industria local, será de mucho beneficio para la mejora de estos procesos. La simulación mediante software especializado de cualquier proceso que implica la manufactura de electrodomésticos es de gran ayuda para acelerar los entornos

de desarrollo y acercarnos a una atmósfera real que nos lleve a resultados cercados a la realidad; por ello que en la utilización del software Ansys como una de las herramientas más versátiles que existen para dar soluciones técnicas idóneas a la mejora del producto, que le posibilite ser competitivos en los diferentes mercados. Por lo que se plantea el desarrollo de un modelo matemático que identifique el comportamiento del proceso de termoformado para tener que obviar pruebas que tienen a alargar los procesos de desarrollo y no aportan en la consecución de los objetivos de fabricación en tiempos (Schäfer, 2006; Torres y Naidiuk, 2018).

2. Determinación del Problema

2.1. Antecedentes

Durante los dos últimos años se ha monitoreado los diferentes defectos que se presentan en los gabinetes de las refrigeradoras, considerando que si bien no existe un alto número de gabinetes reciclados, los defectos estéticos se presentan continuamente durante el proceso de termoformado en la línea de producción de refrigeradoras que afectan considerablemente a la calidad del producto (Espinoza, 2017).

Las propiedades de la materia prima influyen en la calidad debido a factores relacionados a su procedencia, que está directamente relacionado con los costos en el mercado, es decir, su adquisición se lo realiza de acuerdo al mejor costo del proveedor, considerando que debe de cumplir con los requerimientos requeridos (Xie, Halley, y Avérous, 2012). La Tabla 2.1 presenta el registro de los defectos presentados en el producto, y la Tabla 2.2 presenta los diferentes polímeros utilizados de acuerdo a su procedencia.

Tabla 2.1

Defectos presentados en el gabinete de la refrigeradora.

Defecto	Descripción
Alabeo	Se presenta defectos de alabeo en el lateral del gabinete.
Poros	Existen presencias de poros en la superficie de fondo y lateral.
Fisuras	Se presentan fisuras en las curvaturas del gabinete en la parte superior del mismo.

Nota: La Tabla presenta los principales defectos que se presentan en el proceso de termoformado dentro de la línea de producción.

Tabla 2.2

Polímeros utilizados en el proceso de termoformado.

Polímero	Procedencia	Proveedor
Poliestireno 1	Estados Unidos	Americas
Poliestireno 2	China	Quishen
Poliestireno 3	Corea	Yashide

Nota: La Tabla presenta los polímeros utilizados en el proceso de termoformado dentro de la línea de producción de gabinetes para refrigeradoras.

2.2. Importancia y alcances

El uso de software para simulaciones analiza los tiempos de procesos en general que puede ser aplicado a la industria de línea blanca, por lo que hoy en día es imprescindible el uso de herramientas informáticas para conseguir una mayor efectividad en la fabricación de diversos productos (Mejía y Galofre, 2008). Si se realiza una comparación con la metodología utilizada por los mejores productores a nivel mundial de electrodomésticos, se puede concluir que la utilización de prácticas de simulación en la industria local, será de beneficio y de suma importancia donde aceleraran los entornos de desarrollo que permitan acercarse a una situación real que conlleva a conseguir resultados cercados a la realidad; considerando que el software especializado es una de las herramientas más versátiles que existen para dar soluciones técnicas idóneas a la mejora de procesos y productos (Beatove, 2014).

Los modelos matemáticos son representaciones simplificadas, a través de ecuaciones, funciones o fórmulas matemáticas, que identifican el comportamiento de un proceso industrial o de la relación entre dos o más variables, que son el soporte básico de la simulación y que permitirán manipular factores o variables que optimicen un proceso o predican resultados de interés para la investigación, son fundamentales debido a que obviar pruebas en planta permite ahorrar recursos y optimizar tiempos de ejecución que se verán reflejados en la disminución de tiempos improductivos de arranque de producción que representan altos costos de inversión (Navarro, 2019).

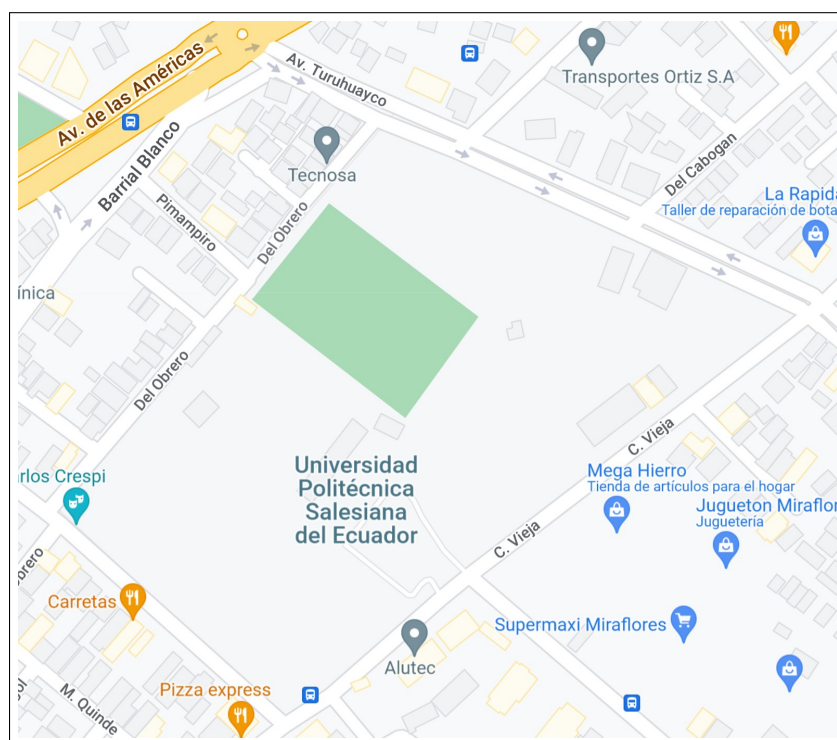
2.3. Delimitación

2.3.1. Geográfica

Parte de La investigación (toma de datos) se realizó en una empresa dedicada a la elaboración de productos de línea blanca ubicada en la ciudad de Cuenca, entre la Av. Don Bosco Esquina y Av. de Las Américas, la simulación se la realizó en la Universidad Politécnica Salesiana como se observa en la Figura 2.1.

Figura 2.1

Ubicación del lugar de investigación.



Nota: En la Figura se observa la localización de la planta que fabrica los gabinetes de refrigeradoras con el proceso de termo formado, ubicada en la esquina entre la Av. de las Américas y Av. Don Bosco (Google Maps, 2023).

2.3.2. Temporal

La presente investigación se realizó en los plazos establecidos dentro de la oferta de la maestría en Ingeniería Mecánica, con un mínimo de 400 horas para su cumplimiento de acuerdo al cronograma de actividades planificado.

2.3.3. Sectorial

La investigación se desarrolló dentro del sector manufacturero dedicado a la fabricación de productos de línea blanca o electrodomésticos, específicamente relacionado con los procesos de termoformado de polímeros.

2.3.4. Justificación

Dentro de la investigación desarrollada, el modelo computacional para termoformado de los gabinetes de refrigeradoras; la termo-formadora es la máquina que se utiliza dentro de este proceso, esta hace el trabajo de realizar la formación del gabinete o cualquier elemento que se quiera formar; la clave aquí es la configuración de los parámetros de calibración; para lograr el modelo para simularlo. Por tal motivo, el desarrollar un estudio en un programa de Elementos Finitos para variar los parámetros de utilización sin tener que recurrir a un formato prueba – error es inminentemente necesario (Hoffmann y cols., 2020). Además, con esto se pretenderá la reducción de gabinetes “no conformes” y que pueden generar defectos estéticos dentro de la refrigeradora, a más de una posible reducción del consumo de la materia prima al tener menos productos con defectos. Al desarrollar y evaluar el termoformado utilizando un estudio de Elementos Finitos se puede determinar mejores opciones del proceso y minimizar los defectos que se pueden hallar en lo posterior de la línea de ensamble.

Esto supone un gran avance en cuanto a dejar de utilizar los ensayos de prueba – error que consumen materiales, recursos humanos y tiempos muertos dentro del proceso de fabricación de electrodomésticos; por tal razón el proponer la adopción de esta metodología con un nuevo enfoque en que solamente se utilice la programación sencilla para variar los parámetros y conseguir los resultados esperados presenta una alternativa viable para optimizar recursos en el proceso de prototipado y fabricación.

La contribución de la investigación se enfoca el desarrollo de una nueva metodología para el afinamiento de los parámetros de fabricación dentro del proceso de termoformado que nos ayude a prevenir los defectos encontrados dentro de la línea de producción. Esto lo se lo puede conseguir a través del estudio de la condición actual llevándolo al computador y que nos permita, sin importar las formas del gabinete, aplicar la mejor parametrización de la máquina. A partir de este modelo lo que se pretende crear una nueva manera de mejorar el proceso. Con esta metodología se pretende prescindir de los ensayos de prueba – error que, como se ha mencionado ya en varias ocasiones generan desperdicios tanto de material como de recursos que hacen que la empresa tenga que subsanarlos mediante otros mecanismos que serían en lugar de preventivos correctivos.

3. Objetivos

Para el desarrollo del trabajo de titulación “Desarrollo de un modelo computacional mediante elementos finitos del termoformado de gabinetes modelo RI-480” se presentaron los siguientes objetivos.

3.1. Objetivo General

- Desarrollar un modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en un gabinete de refrigerador modelo RI-480.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer los parámetros y restricciones iniciales para el modelo computacional con elementos finitos en el proceso de termoformado.
- Proponer un modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480.
- Evaluar el modelo computacional mediante elementos finitos propuesto para la validación del proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480.

4. Marco teórico referencial

4.1. Termoformado

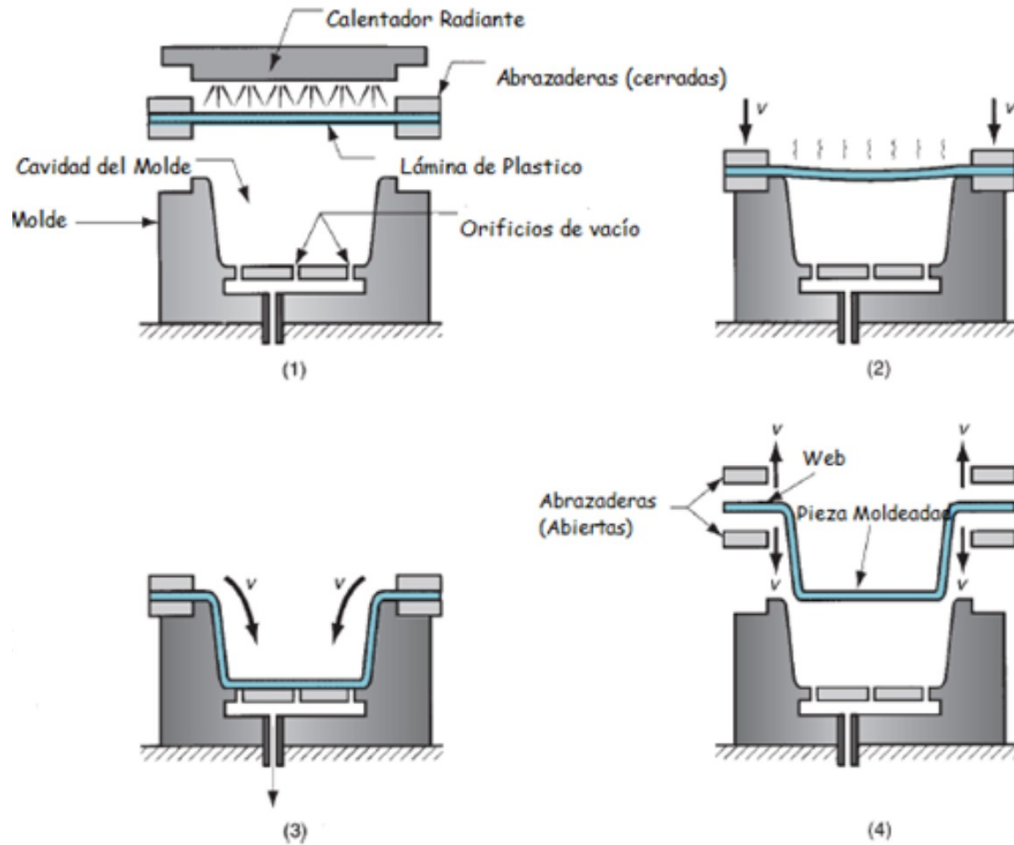
Según Aristegui Maquinaria (2023) el proceso de termofomado:

es realmente muy simple, el termoformado es el proceso de calentar un material a su temperatura de formación y aplicar fuerza a la lámina caliente para empujarlo en cavidades o sobre un molde, de modo que el material se adapte a la forma del molde. Las fuerzas aplicadas son cualquiera de tres métodos diferentes: asistencia mecánica (tapones), vacío y aire de forma. El material se suministra en rollos o bolitas de resina. Los rollos se producen en una instalación de extrusión o se compran. Los pellets de resina se utilizan para termoformado en línea y para extrusión de rollos. La lámina de plástico extruido se introduce en la termoformadora y se transporta al área de calentamiento en las cadenas. Las cadenas hacen avanzar la lámina a través del horno de calentamiento, la estación de encofrado y la estación de recorte de la máquina de termoformado.

Cuando el material alcanza su temperatura de formación óptima en el horno, se transporta a la estación de formación, donde el molde comienza a cerrarse en la hoja flexible. Para la mayoría de los moldes, los tapones fuerzan el material en las cavidades del molde, el aire aspirado arrastra el plástico sobre el molde y hacia las cavidades, y se aplica presión de aire para mover el material a las cavidades del molde personalizado. Una vez que la hoja se ha formado en piezas de plástico, avanza a la estación de corte donde se extrae con una matriz de acero o una prensa de corte de metal. El plástico restante se recolecta y se recicla nuevamente en el proceso para hacer más piezas de plástico. (Pag. 2)

Figura 4.1

Termoformado con calentamiento de la lámina y vacío.



Nota: En la Figura se observa el proceso de termoformado a partir de una lámina calentada, un molde y un vacío que permite dar forma a la lámina de acuerdo al modelo establecido en el molde (Bird, 2021).

Los factores que intervienen en el proceso de termoformado son los que se observan en las Figuras 4.1 y 4.2, que se presentan a continuación:

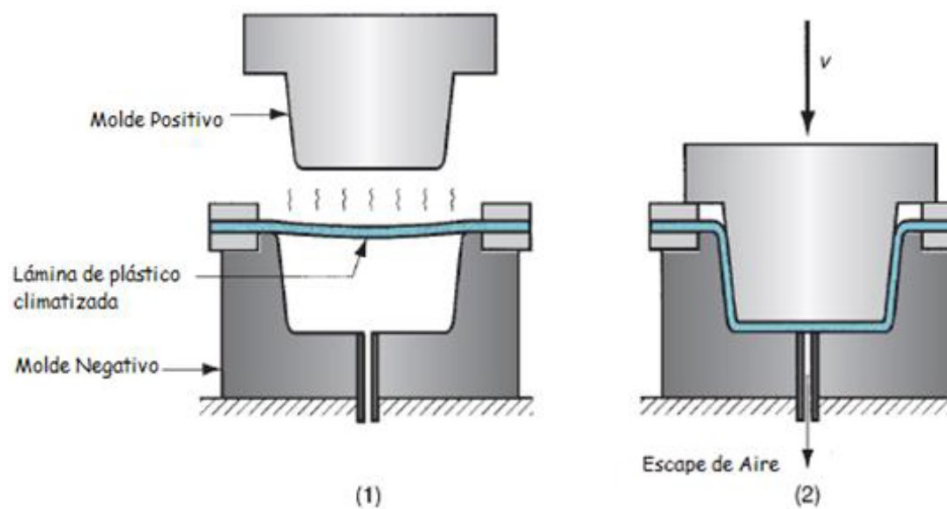
- Material base o lámina.
- Molde de termoformado.
- Temperatura de funcionamiento (Para el caso de estudio el sistema es adiabático).

Originalmente, la disponibilidad de planchas de materiales termoplásticos dio lugar a la idea de construir moldes hembra, emplazar sobre ellos una plancha de estos materiales, fijarla de modo que la holgura entre el molde y la pieza fuese estanco, calentarla hasta su temperatura de reblandecimiento y hacer el vacío en dicha holgura, de modo que el

material se estire y se adapte a la superficie del molde. Una vez fría la pieza, se extrae, se recorta el material en exceso y se obtiene una pieza acabada. Como alternativa, en lugar de aplicar vacío entre el molde y lámina, puede aplicarse presión sobre esta para obtener un resultado similar, o pueden combinarse ambas técnicas para embutidos profundos (Espinoza, 2017; Martínez, Moya, Correa, y Salazar, 2023).

Figura 4.2

Termoformado con calentamiento de la lámina y punzón.



Nota: En la Figura se observa el proceso de termoformado a partir de una lamina calentada, un molde (negativo) y un punzón de moldeo que permite dar forma a la lámina de acuerdo al modelo establecido en el molde (Martínez y cols., 2023).

Dado que se produce un estirado de la lámina, puede suceder que el adelgazamiento de la misma se produzca en zonas no deseadas, además de que puede ser preciso obtener un moldeado de espesor más o menos regular o una gran profundidad de embutido. Con este objeto, se han desarrollado técnicas de pre-estirado por diversos medios, punzón o soplado previo, que permiten obtener mayor regularidad de espesor (Espinoza, 2017).

La adaptabilidad del proceso a las grandes series, especialmente en cubetas de pequeño tamaño para la industria alimentaria, ha hecho que se desarrollasen máquinas de moldeo secuencial con moldes de cavidades múltiples, y sistemas automatizados de alimentación y transporte de la lámina, y troquelado y apilado de las piezas; sin embargo, se trata también de un proceso que se adapta a la fabricación de grandes piezas, y aquí se ilustra la mayor de una serie de embarcaciones finlandesas moldeadas en plancha de ABS con una

eslora de 4,70 m también el procedimiento utilizado para fabricar grandes bañeras (spa) en lámina de metacrilato, reforzada luego con un respaldo de poliestireno. (Perez y Ortíz, 2018)

4.2. Poliestireno

De acuerdo a Plásticos Ascaso (2023) el poliestireno:

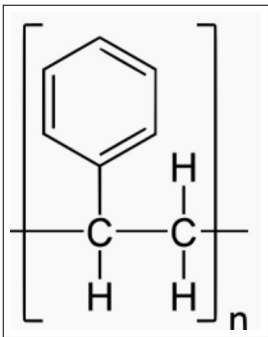
Es uno de los plásticos más usados a nivel mundial, siendo un material duro y sólido con el que se fabrican una variedad de productos para el uso diario, normalmente se hace uso de este tipo de plástico para fabricar elementos que necesiten alta claridad, ya sean envases de comida o algunos elementos de laboratorio. Hay que tener en cuenta que al combinar este plástico con otros materiales se pueden conseguir otro tipo de objetos como juguetes, partes de automóvil, electrodomésticos como hornos, microondas, aspiradoras, licuadoras, etc. No reacciona químicamente con otros elementos, económico y duradero.

4.2.1. Estructura química del poliestireno

La Tabla 4.1 presenta la estructura del poliestireno de acuerdo a la normativa internacional para su identificación.

Tabla 4.1

Estructura química del poliestireno.

Nombre IUPAC	Fórmula Estructural	Fórmula Molecular	Identificadores
Poly(1-phenylethene)		$(C_8H_8)_n$	<p>Número CAS: 9003-53-61</p> <p>ChEBY: 53276</p> <p>KEGG: C19506</p>

Nota: La Tabla presenta la nomenclatura química del poliestireno de acuerdo a la nomenclatura IUPAC es un sistema de nomenclatura de compuestos químicos y de descripción de la ciencia y de la química en general (Wikipedia, 2022a, 2022b).

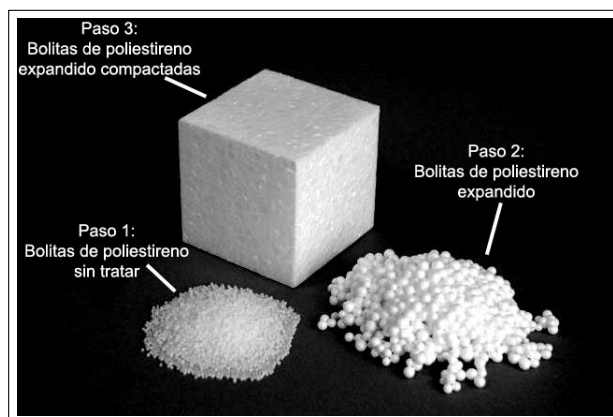
4.2.2. Tipos de poliestireno

4.2.2.1. De acuerdo a su fabricación, el poliestireno se puede clasificar en:

Poliestireno expandido: fabricado en forma de material espumoso como se observa en la Figura 4.3, teniendo como característica principal su resistencia a la humedad y su ligereza. Este es el material más empleado para fabricar envases de alimentos y/o bebidas, ya que no se descompone. Gracias a una de sus características de absorción de impacto se pueden observar en el embalaje de productos frágiles como vidrios o electrodomésticos, además es uno de los materiales principales en la fabricación de tablas de surf de bajo costo (Plásticos Ascaso, 2023; Reynoso, 2019).

Figura 4.3

Poliestireno expandido.

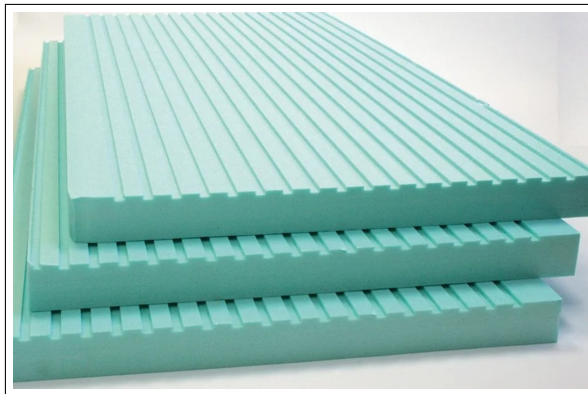


Nota: En la Figura se observa el poliestireno expandido en forma circular y compactado (Embalajes Terra, 2023).

Poliestireno extruido: también conocido por su acrónimo inglés XPS, es una espuma rígida resultante de la extrusión del poliestireno en presencia de un gas espumante, usada principalmente como aislante térmico como se observa en la Figura 4.4, es similar al EPS pero con otras propiedades, fabricado en forma de material rígido, posee propiedades de acolchado y aislamiento, es un material usado muy comúnmente en la construcción, sobre todo como un aislante de suelo, cámaras frigoríficas, etc. Este material posee características similares a las del poliestireno expandido, asimismo su composición química es la misma, lo único con lo que se diferencia es que el extruido puede mojarse con la ventaja de no perder sus propiedades iniciales (Plásticos Ascaso, 2023; Reynoso, 2019; Wikipedia, 2021).

Figura 4.4

Poliestireno extruido.



Nota: En la Figura se observa el poliestireno extruido en una forma determinada (Danosa, 2023).

4.2.2.2. De acuerdo a su composición química y aleantes, el poliestireno se puede clasificar en:

Poliestireno cristal: El producto de la polimerización del estireno puro se denomina poliestireno cristal o poliestireno de uso general (GPPS, en sus siglas en inglés). Es un sólido transparente, duro, pero frágil, también es vítreo por debajo de 100 °C y por encima de esta temperatura es fácilmente moldeable y puede dársele múltiples formas complejas como se observa en la Figura 4.5 (Wikipedia, 2022b).

Figura 4.5

Poliestireno cristal.



Nota: En la Figura se observa el poliestireno cristal en una forma de láminas transparentes (Bricoplástico, 2023a).

Poliestireno de alto impacto: El Poliestireno de Alto Impacto es una de las variedades existentes dentro de los poliestirenos. Dado que el poliestireno es un polímero muy frágil a temperatura ambiente, se modifica mediante la adición de polibutadieno, para mejorar su resistencia al impacto, se puede añadir en la polimerización hasta un 14% de caucho (casi siempre polibutadieno). El producto resultante se llama poliestireno de alto impacto (HIPS, High Impact Polystyrene (ver Figura 4.6), siglas en inglés). Es más resistente y no quebradizo, capaz de soportar impactos más violentos sin romperse, su inconveniente principal es su opacidad, si bien algunos fabricantes venden grados especiales de poliestireno choque translúcido (Wikipedia, 2022b).

Figura 4.6

Poliestireno de alto impacto.



Nota: En la Figura se observa el poliestireno de alto impacto en forma de láminas como material de suministro (Amazon, 2021; Wikipedia, 2019).

Poliestireno sindiotáctico: En 1985 la japonesa Idemitsu sintetizó por vez primera poliestireno sindiotáctico (sPS) y tres años más tarde inició una colaboración con Dow para su producción industrial. En 1996 Dow abrió una planta de sPS en Schkopau (Alemania) pero en 2005 tuvo que cerrarla por su escaso éxito comercial. Se caracteriza porque los grupos fenilo de la cadena polimérica están unidos alternativamente a ambos lados de la misma, mientras que el poliestireno “normal” o poliestireno atáctico no conserva ningún orden con respecto al lado de la cadena donde están unidos los grupos fenilos, el “nuevo” poliestireno es cristalino y funde a 270 °C, pero es mucho más costoso y solo se utiliza en aplicaciones especiales de alto valor añadido (Bricoplástico, 2023b).

4.2.3. Propiedades del poliestireno

Dependiendo del punto de vista, este plástico posee una variedad de propiedades. A continuación la Tabla 4.2 presenta las que más pueden resaltar:

Tabla 4.2

Principales propiedades del poliestireno.

Propiedades
Resistencia a la presión.
Alta capacidad de amortiguación de golpes.
Bajo peso, su densidad es de aproximadamente entre 20 a 30 kg/m ³
Posee baja conductividad térmica.
No permite la proliferación de hongos y bacterias.
Una gran variedad de diseños en sus piezas moldeables.
Conservación del gas en las bebidas carbonatadas.

Nota: La Tabla presenta las principales propiedades del poliestireno siendo una de las ventajas más resaltantes la baja conductividad térmica, siendo fundamental en los requerimientos de los gabinetes de refrigeradoras (Plásticos Ascaso, 2023).

Propiedades térmicas: presenta la conductividad térmica más baja de todos los termoplásticos, incluso menores de $0,03 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Propiedades ópticas: Mientras que el PS antichoque es completamente opaco y blanquecino debido al polibutadieno que incorpora, el PS cristal es transparente.

Propiedades eléctricas: El poliestireno tiene muy baja conductividad eléctrica (típicamente de $10^{-16} \text{ S m}^{-1}$), es decir, es un aislante.

4.2.4. Características del poliestireno

Dependiendo del punto de vista o aplicaciones se puede establecer, las principales características que se puede encontrar en este polímero son las siguientes:

Tabla 4.3

Principales características del poliestireno.

Características
Buen brillo.
Color transparente.
Liviano.
Se puede procesar en una variedad de temperaturas.
Resistente al agua y químicos inorgánicos.
Posee una elevada fuerza de tensión.
Aislante térmico.
Es un material económico.
Material duradero.

Nota: La Tabla presenta las principales características del poliestireno siendo una de las ventajas más resaltantes el reciclado, siendo muy amigable con el medio ambiente (Plásticos Ascaso, 2023).

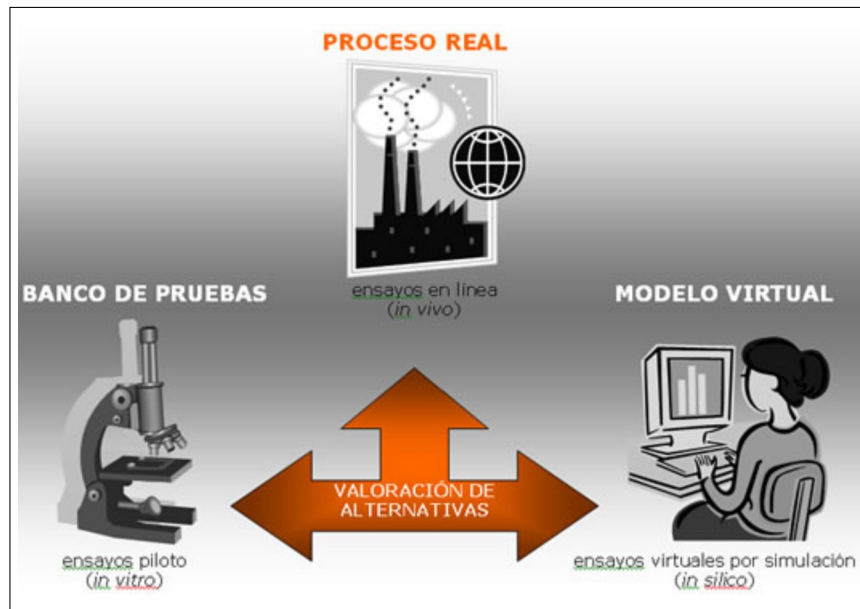
4.3. Simulación

De acuerdo a Ainia (2022) la simulación de procesos con modelos matemáticos, genera nuevas alternativas para modificar una línea o un proceso antes de realizar una inversión, de manera que se pueda maximizar los recursos como tiempos, costos de pruebas y todo esto sin interrumpir procesos en las líneas de producción, es así que:

Cuando trabajamos en el diseño o mejora de un proceso en la empresa, generalmente la vía más convencional o rudimentaria es la de experimentar con el proceso real, pero esta vía presenta muchas limitaciones de coste y de disponibilidad; otra de las alternativas más extendidas es crear un banco de pruebas o un prototipo que permitan obtener una versión simplificada del caso real, pero es un proceso costoso que implica dedicar recursos a la construcción del dispositivo. Hoy en día existe un método más útil y económico, la simulación de procesos con modelos matemáticos, una alternativa más viable y flexible con la que se evita construir un prototipo o interferir en los ciclos de fabricación. (Ainia, 2022, Pag. 1)

Figura 4.7

Alternativas de cambio en el proceso.



Nota: En la Figura se observa las alternativas de en donde se pueden dar los cambios del proceso, en el real, en el laboratorio o en un modelo virtual (Ainia, 2022).

Esta alternativa consiste en la creación de un modelo lógico-matemático que describa las relaciones entre las variables que definen el proceso para experimentar con ellas mediante simulación. Por simulación se entiende, por tanto, la generación de datos artificiales mediante un ordenador, a partir de un modelo predefinido (Ainia, 2022), que permite en una línea de producción considerar algunos aspectos, tales como:

1. Reducir los tiempos de desarrollo de nuevos procesos, al poder evaluar múltiples alternativas en cuanto a parámetros, niveles de las variables y tecnologías.
2. Cuantificar los riesgos asociados a la incertidumbre, al incorporar la variabilidad natural esperable.
3. Optimizar procesos, con algoritmos apropiados'
4. Acelerar la formación de nuevos empleados, ya que se pueden simular diferentes configuraciones de forma rápida y segura.

Tabla 4.4

Sistema de mejora de procesos.

Sistema de mejora	Ventajas	Inconvenientes
Experimentación con el proceso real	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Método directo ✓ Enfocado a nuestro proceso real 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones de disponibilidad (se tienen que adecuar los ensayos a las necesidades de producción) • Limitaciones por coste (cambio de especificaciones y pérdidas, capacidad productiva) • Intervalos de trabajo explorados muy pequeños • Aspectos éticamente delicados si se trabaja con sistemas hidrológicos (como sucede en medicina y farmacia)
Creación de un banco de pruebas o prototipo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se contratan experimentalmente las variables de proceso más importantes ✓ Se evalúan efectos sobre prototipos de productos ✓ Se sientan las bases para el escalado de procesos 	<ul style="list-style-type: none"> • Implica dedicar recursos a la construcción del dispositivo • Limitaciones al tener que optar por formas de funcionamiento afectadas por la escala
Simulación de procesos con modelos matemáticos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No interfiere con ciclos de fabricación ni se modifican instalaciones existentes ✓ No se construyen prototipos ✓ Mayor flexibilidad para incorporar tecnologías, variables y combinación de niveles de dichas variables 	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuación del modelo a la complejidad necesaria de cada situación

Nota: La Tabla presenta un sistema de mejora de procesos (Wikipedia, 2022a, 2022b).

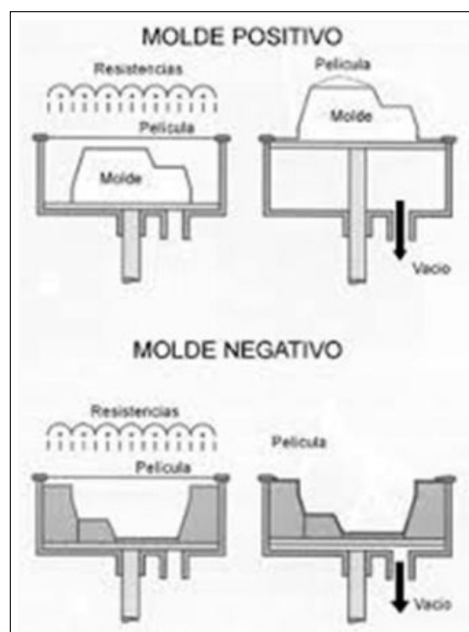
La Tabla 4.4 presenta la comparativa de las posibles alternativas para mejorar o diseñar un proceso, desde la más rudimentaria, que se realiza a través de la experimentación con el proceso real, a la más competitiva a través de la simulación de procesos con modelos matemáticos, pasando por la más extendida a través de la creación de un banco de pruebas o un prototipo. En cada una de ellas indicamos sus ventajas y sus inconvenientes.

4.4. Proceso de Termoformado por lámina apoyada

En este tipo de termoformado se calienta la lámina hasta alcanzar la temperatura de moldeo, el molde hembra se desplaza verticalmente hacia abajo hasta obtener el cierre hermético. Seguidamente, se aplica presión de aire por intermedio de las perforaciones de la placa hasta conformar la lámina según el molde, este tipo de termoformado logra resultados aceptables en la geometría (Stamopoulos y Di, 2021). Con base en este concepto se puede verificar y analizar lo que es necesario para poder aplicar la evaluación al sistema actual propuesto y a través de elementos finitos, tener controlado el proceso de la empresa.

Figura 4.8

Termoformado de láminas.

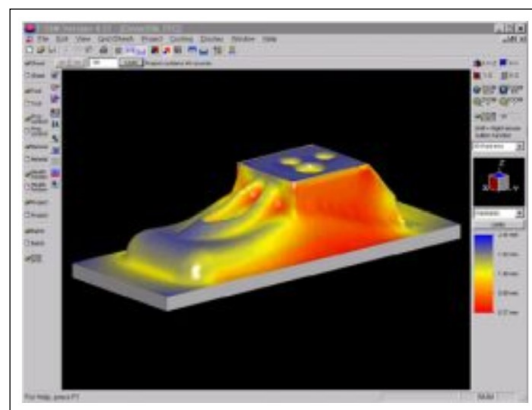


Nota: En la Figura se observa el principio de termoformado con un molde positivo y negativo para el conformado de la lámina de poliestireno, el vacío se produce en la cavidad cuando es negativa y en el molde cuando es positiva (Induform, 2023).

Los controles basados en la obtención de datos han surgido como una buena alternativa para medir los impactos en los procesos (Pérez y Chavarro, 2022). La observancia de los parámetros a medir y aplicar se los puede ver aplicados y conceptualizados claramente (Zhang y cols., 2021). Aunque la configuración óptima puede ser compleja y diverge por el proceso que se realice, los casos que se aplique, el material que se utilice y los modos de máquina verificados (Baeza Raúl, 2021), lo que conlleva a un mejor análisis y discernimiento de cada parámetro a aplicar. Los sistemas que utilizan para termoformar los gabinetes se consideran como buena opción comparada con otros métodos y máquinas que se puede observar dentro de la industria de manufactura, por lo que este campo en específico es una buena manera de poner un punto de inicio, ya que existe un amplio stock de máquinas y sus especificaciones técnicas de lo cual dentro de la empresa se tiene y muy claro (Najera Arturo, 2021).

Figura 4.9

Simulación del termoformado de láminas.



Nota: En la Figura se observa la simulación de un proceso de termoformado aplicando elementos finitos (Gam Bit, 2023).

La ubicación de estas características a través de la extracción de la información recabada en los datos proporcionados y la inclusión de muchas de las referencias que dentro del campo se tienen pueden ser un punto relevante dentro de lo que al final de este trabajo se quiere conseguir, es decir, datos macro que nos permitan de cierta manera no ser tan empíricos y tener mayor argumentación de datos para la aplicación de cambios de los parámetros dentro del proceso en sí y sus variables que pueden ser cambiadas según la necesidad (F. García y Salgado, 2021; Van, Desplentere, Van, y Ivens, 2015).

4.5. Ansys Fluent (CFD)

Es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) que se utiliza para modelar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas y más. Fluent ofrece una interfaz moderna y fácil de usar que agiliza el proceso de CFD desde el preprocesamiento hasta el posprocesamiento dentro de un flujo de trabajo de una sola ventana. Fluent es conocido por sus capacidades avanzadas de modelado de física, que incluyen modelado de turbulencia, flujos monofásicos y multifásicos, combustión, modelado de baterías, interacción fluido-estructura y mucho más. También conocido por su eficiente escalado HPC, los modelos grandes se pueden resolver fácilmente en Fluent en múltiples procesadores en CPU o GPU. Hay varias opciones de solucionador disponibles, incluidos solucionadores de CPU basadas en la presión y en la densidad para cubrir flujos de baja velocidad a hipersónicos y un solucionador de GPU nativo basado en la presión (Ansys Software, 2019).

De acuerdo a Ansys Software (2019), Ansys Fluent brinda más tiempo para innovar y optimizar el rendimiento del producto, son de alta confianza los resultados de su simulación, con un software ampliamente validado en una amplia gama de aplicaciones. Con Ansys Fluent, se puede crear modelos físicos avanzados y analizar una variedad de fenómenos de fluidos y todo en un espacio personalizable e intuitivo.

Además Ansys Software (2019) indica que:

Ansys Fluent es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de uso general que se utiliza para modelar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas y más. Fluent ofrece una interfaz moderna y fácil de usar que agiliza el proceso de CFD desde el preprocesamiento hasta el posprocesamiento dentro de un flujo de trabajo de una sola ventana. Fluent es conocido por sus capacidades avanzadas de modelado de física, que incluyen modelado de turbulencia, flujos monofásicos y multifásicos, combustión, modelado de baterías, interacción fluido-estructura y mucho más.

También conocido por su eficiente escalado HPC, los modelos grandes se pueden resolver fácilmente en Fluent en múltiples procesadores en CPU o GPU. Hay varias opciones de solucionador disponibles, incluidos solucionadores de CPU basadas en la presión y en la densidad para cubrir flujos de baja velocidad a hipersónicos y un solucionador de GPU nativo basado en la presión. (Pág. 1)

5. Metodología

A continuación se presenta la metodología de investigación y del proceso aplicada a la simulación del proceso de termoformado de láminas de poliestireno con elementos finitos a través de un modelo matemático establecido.

5.1. Metodología de la investigación

La metodología de investigación desarrollada en el trabajo de titulación se enfocó en diferentes aspectos como su enfoque, tipo y alcance de acuerdo a la naturaleza del trabajo de titulación, como se indica a continuación:

INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA

Análisis de datos de temperaturas de plastificación, presiones de termoformado, material, forma y geometría.

DE TIPO APLICADA

En el proceso de termoformado de una línea de producción de gabinetes de refrigeradoras.

ALCANCES:

① **EXPLORATORIO**

Realiza las primeras simulaciones con datos tentativos del proceso.

② **DESCRIPTIVO**

Conceptos de transformación de polímeros y de simulación con elementos finitos (ANSYS).

③ **CORRELACIONAL**

Asocia las variables de entrada en el proceso de termoformado y la configuración del software con los datos de salida de la simulación.

④ **EXPLICATIVO**

Explicar el comportamiento del espesor de la lámina de poliestireno de acuerdo a los datos de entrada.

5.2. Metodología del proceso

La metodología del proceso adoptada se basó en un marco conceptual adecuado de acuerdo a los objetivos específicos planteados en el anteproyecto, de manera que se pudo gestionar correctamente los datos necesarios para cumplir con el objetivo general de forma integral.

5.2.1. Establecimiento de los parámetros y restricciones iniciales para el modelo computacional con elementos finitos en el proceso de termoformado

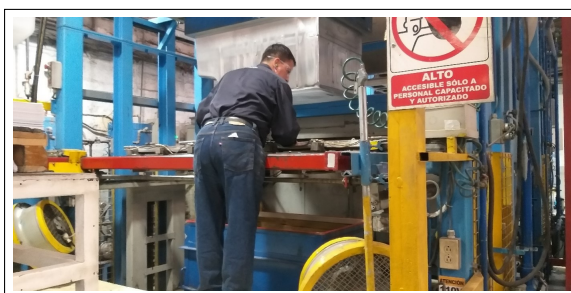
Para determinar los parámetros y restricciones iniciales en el modelo computacional, a continuación se presenta el proceso de elaboración de los gabinetes modelo RI-480.

5.2.1.1. Proceso de termoformado en la línea de producción de gabinetes para refrigeradoras modelo RI-480

① Llegada de las placas de termoformado a la línea de producción



② Colocación de la placa en la máquina termoformadora



③ Calentamiento de la placa en la máquina termoformadora



④ Formado del gabinete en la máquina termoformadora



⑤ Apertura del gabinete en la máquina termoformadora



⑥ Desmoldeo del molde en la máquina termoformadora



⑦ Extracción del gabinete del molde en la máquina



⑧ Gabinete obtenido en la máquina de termoformado



En la línea de producción de electrodomésticos (Refrigeradoras), se ha podido alertar varias anomalías en la fabricación de los gabinetes termoplásticos; donde lo relevante son los defectos estéticos del gabinete por el mal termoformado; que se generan después de realizar el proceso en la máquina termoformadora.

5.2.1.2. Parámetros del material

A continuación se presenta la descripción del material utilizado en el termoformado como sus principales propiedades físicas, térmicas y ópticas.

① **Poliestireno de alto impacto (HIPS).** Según Grassi, Madalena, y Dal (2001) como Acuña y Morales (2011) indican que las láminas plásticas de poliestireno de alto impacto (HIPS), tienen un peso ligero, y son fáciles de manipular, cortar y pegar; permiten ser mecanizadas, fresadas y moldeadas fácilmente para ser usadas en múltiples aplicaciones; es liviano y puede ser procesado en un amplio rango de temperaturas. Posee una elevada fuerza de tensión, es resistente a químicos inorgánicos y al agua, tiene propiedades eléctricas sobresalientes, impermeabilidad y resistencia térmica. A continuación la Tabla 5.1 presenta las principales propiedades del material.

Tabla 5.1

Propiedades del poliestireno.

Propiedades Físicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Densidad	1.05	g/cm ³	ISO 1183

Propiedades Mecánicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Resistencia a la atracción hasta la deformación	(*)	MPa	ISO 527
Resistencia a la atracción en la ruptura	59	MPa	ISO 527
Alargamiento hasta la ruptura	3%	%	ISO 527
Módulo de elasticidad en tracción	3250	MPa	ISO 527
Resistencia a la flexión	106	MPa	ISO 178
Resistencia al impacto Charpy con entalla	1,47	KJ/m ²	ISO 179
Resistencia al impacto Charpy	16	KJ/m ²	ISO 179
Dureza a la presión de la bola	150	MPa	ISO 2039

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 5.1

Propiedades Térmicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Temp. máxima de utilización en continuo	80	°C	
Temp. reblandecimiento VICAT (10 N)	106	°C	ISO 306
Temp. reblandecimiento VICAT (50 N)	101	°C	ISO 306
Temp. reblandecimiento HDT A (1.8 Mpa)	86	°C	ISO 75-2
Temp. reblandecimiento HDT B (0.45 Mpa)	98	°C	ISO 75-2
Coefficiente kineal de expansión	8×10^{-5}	°C ⁻¹	ISO 75-2

Propiedades Ópticas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Transmisión de luz	89	%	ASTM D -1003
Refracción	1591	-	ASTM D -54

Nota: La Tabla indica las principales propiedades físicas, mecánicas, térmicas y ópticas del poliestireno de alto impacto utilizado en el proceso de termoformado de gabinetes de refrigeradoras (Acuña y Morales, 2011; Grassi y cols., 2001).

En la Figura 5.1 se observa las láminas de poliestireno de alto impacto con las que son conformados los gabinetes para las refrigeradoras.

Figura 5.1

Lámina de Poliestireno de Alto Impacto.



Nota: En la Figura se observan las láminas de poliestireno de alto impacto almacenadas y que posteriormente son utilizadas en la elaboración de los gabinetes para refrigeradoras de diferentes modelos comerciales (Panaplast, 2023).

② **Propiedades del Poliestireno de alto impacto configuradas.** Para la configuración del material en el software se consideró las siguientes propiedades: espesor, densidad, coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica, capacidad térmica, viscosidad, permeabilidad de la capa; donde sus valores se presentan en la Tabla 5.2. La Tabla presenta los valores de las propiedades del poliestireno de alto impacto configuradas en el software.

Tabla 5.2

Propiedades del poliestireno configuradas.

Espesor	3,3mm
Densidad	1,05 g/cm ³
Coeficiente de expansión térmica	8×10^{-5}
Capacidad térmica	0,0425 W/mK
Viscosidad	12,7 MPa ^{1/2}
Permeabilidad	7,2

Nota: En La Tabla se indica los valores establecidos de las propiedades del material para la simulación del termoformado.

5.2.1.3. Parámetros del software

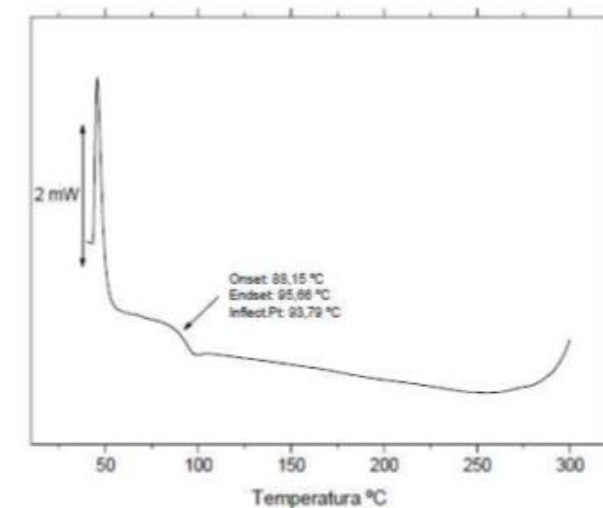
Para la simulación del proceso de termoformado de los gabinetes de refrigeradora modelo RI-480 obtenidos, se utilizó un programa simulador del proceso de termoformado, el cual requiere de ciertas entradas de información acerca del proceso. Estas entradas consisten en los modelos tridimensionales del molde y de la lámina a moldear (geometría), el material utilizado para la fabricación de los gabinetes de refrigeradora que se estableció en la sección anterior, los parámetros de control del proceso como el coeficiente de transferencia de calor lámina-molde, entre otros que se detallan posteriormente (Morales y Candal, 2006).

El uso correcto de estos parámetros permitirá reducir los defectos que pueden llegar a tener las piezas termoformadas realizadas, el buen control de los mismos no solo ayuda al personal de la planta a reducir 15% la posibilidad de una falla en el proceso, sino que le ayuda además a tener piezas con mejores acabados. El uso correcto de estos parámetros permite controlar el proceso de termoformado antes de que se produzca una falla en el formado de la pieza a realizar, donde el monitoreo de estas condiciones no solo ayuda al personal de la planta a reducir los defectos, sino que el proceso en línea sea más productivo (Joya, 2006).

Las técnicas de monitoreo de las condiciones de termoformado más utilizadas en la industria puede identificar con exactitud alrededor del 70% de los fallos dentro del proceso por el cambio de estos parámetros que puede tomar acción de corrección lo antes posible para evitar defectos en las piezas terminadas. El monitoreo en sí para todos estos parámetros se lo realizan a los ajustes de las máquinas de termoformado que hacen que todos los elementos se determinen dentro de un rango de valores, incluso dentro de lo que puede existir como materias primas en stock (Özdemir, Subaşı, y Karataş, 2020).

Figura 5.2

Mapa de temperatura para termoformadoras.



Nota: En la Figura se observa el consumo energético de la máquina termoformadora en función de la temperatura alcanzada (Ondas y partículas, 2023).

Según Espinoza (2018) el análisis del monitoreo realizado en cada condición de la máquina comúnmente utilizada para realizar ajustes que permiten mejorar el proceso, hace que sea un poco empírico estas actualizaciones, debido a la manipulación casi arbitraria de los operantes de cada línea del proceso, Dado que los datos que se han recopilado como parámetros que se han ido guardando digitalmente a través de fichas de seguimiento, ha permitido una mayor manipulación por parte del operador.

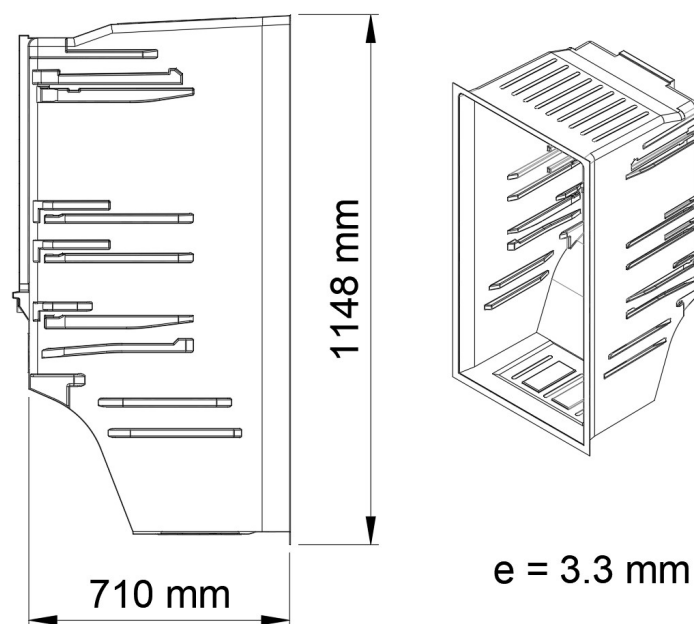
Como lo indica Morales y Candal (2006) en su investigación “Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas CAD/CAE”, que para cada proceso de termoformado se requiere un equipo especializado que puede dividirse en categorías definidas de acuerdo los usos de los productos. Estas categorías están abarcan el equipo de

termoformado industrial y los fabricantes profesionales pueden elegir entre estas opciones en función de su aplicación.

① **Geometría.** La geometría del gabinete del refrigerador depende del modelo del mismo, que para el caso de estudio fue el RI-480. La Figura 5.3 presenta las formas establecidas para el conformado al igual que sus dimensiones.

Figura 5.3

Geometría del gabinete.



Nota: En la Figura se observa la geometría del gabinete de poliestireno, en el Anexo D se presenta en detalle las dimensiones principales utilizadas para la simulación (las dimensiones del anexo están modificadas por ser información reservada).

② **Presión de vacío.** En el proceso de termoformado se utiliza el vacío para dar forma a la lámina, en primer lugar, la lámina de plástico se calienta para que sea flexible y a continuación, la máquina de moldeo en vacío extrae el aire, obligando a la lámina a abrazar un molde. El proceso con vacío es conocido por su rentabilidad y por la velocidad del proceso de fabricación.

Para la presión utilizada en el vacío, se estableció 1 GPa, que se seleccionó directamente en la máquina y es recomendada para láminas con espesores entre 3 a 5 mm. En la Figura 5.5 se observa el seteo de la máquina en la temperatura propuesta.

Figura 5.4

Presión de vacío.



Nota: En la Figura se observa el tablero de control de la presión de vacío para el termoformado de la lámina de poliestireno de alto impacto.

③ **Temperaturas y dimensiones de la lamina.** Para efectos de la simulación y la calibración de la máquina, la temperatura será isoterma a una temperatura de 430 °K (161,35 °C) que se establece como estándar dentro de la temperatura para las máquinas termoformadoras que se utilizan en el proceso y que podemos controlar en la calibración.

Figura 5.5

Temperatura de la lámina y el molde (Sistema Adiabático).



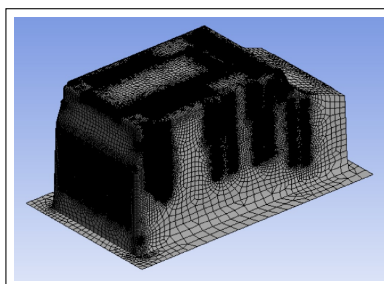
Nota: En la Figura se observa el tablero de control de la temperatura para el molde y los calefactores de la lámina (430 °K (161,35 °C) **Sistema Adiabático**).

La plancha de poliestireno de alto impacto para el formado del gabinete modelo RI-480 tiene las siguientes dimensiones: un espesor estándar para estas aplicaciones de gabinetes de refrigeradoras es de 3,3mm como base para el proceso; para las dimensiones finales del gabinete en estudio, el largo es de 1148 mm y el ancho de 710 mm.

④ **Mallado del molde.** Con la geometría ya en formato STL se procedió a importarla a ICEM, donde se manipuló las vistas de la geometría y se observa un movimiento con bastante fluidez.

Figura 5.6

Mallado del molde de termoformado.



Mesh information

File : PFL-BM-1.poly

Length Unit : _meter

Bounding box :

Size : 7.094E-01 x 1.148E+00 x 1.151E+00
Center : (0.000E+00, -5.000E-03, 5.755E-01)
Lower corner : (-3.547E-01, -5.790E-01, 0.000E+00)
Upper corner : (3.547E-01, 5.690E-01, 1.151E+00)

Sub-domains : 2

Boundary sets: 2

2D pmeshes : 0

1D pmeshes : 0

0D pmeshes : 0

3D elements : 0

2D faces : 480600 (quads,triangles)

Segments : 954821

Vertices : 474223

Nota: En la Figura se observa el mallado generado automáticamente, donde se obtuvo 480600 caras (cuadráticas y triangulares), 954821 segmentos y 474223 vértices.

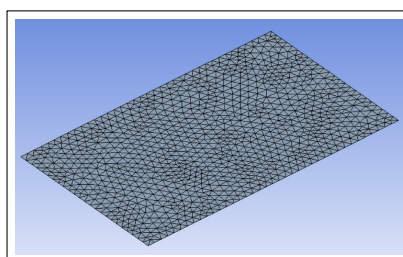
A partir de este punto se procedió a generar automáticamente la malla con el programa con “tetrahedral meshing”. En la generación de la malla del molde el software consideró el

uso de segmentos triangular - cuadrado, que permite una mejor adaptación del proceso para la simulación. En la Figura 5.6 se muestra el mallado del molde correspondiente para la simulación y análisis en el software.

⑤ **Mallado de la lámina a terformar.** Malla inicial triangular – cuadrada que permite una mejor adaptación del proceso para la simulación según representa la Figura 5.7, a continuación que nos detalla los aspectos de malla.

Figura 5.7

Mallado del molde de termoformado.



Mesh information

File : PFL-BM-1.poly

Length Unit : _meter

Bounding box :

Size : 7.094E-01 x 1.148E+00 x 1.151E+00
Center : (0.000E+00, -5.000E-03, 5.755E-01)
Lower corner : (-3.547E-01, -5.790E-01, 0.000E+00)
Upper corner : (3.547E-01, 5.690E-01, 1.151E+00)

Sub-domains : 2

Boundary sets: 2

2D pmeshes : 0

1D pmeshes : 0

0D pmeshes : 0

3D elements : 0

2D faces : 480600 (quads,triangles)

Segments : 954821

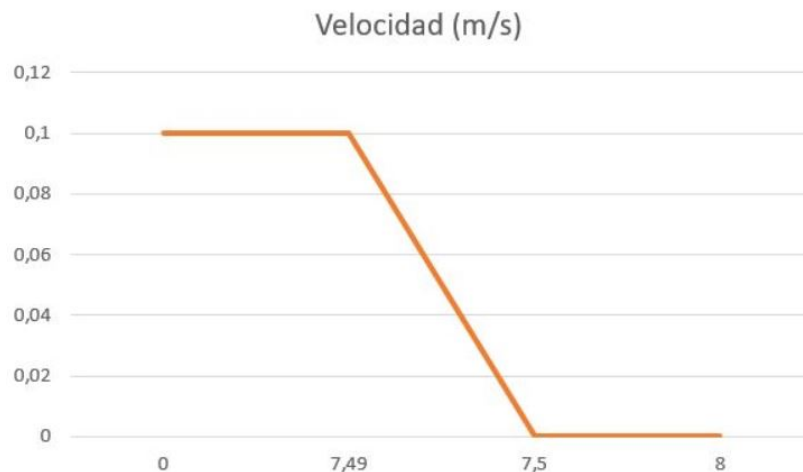
Vertices : 474223

Nota: En la Figura se observa el mallado generado automáticamente, donde se obtuvo 480600 caras (cuadráticas y triangulares), 954821 segmentos y 474223 vértices.

⑥ **Velocidad de termoformado.** Para determinar la velocidad del molde, se consideró que el mismo tiene un comportamiento adiabático y su velocidad será constante de 0,1 m/s durante 7,49 s con un trayecto, como se muestra en la Figura 5.8 y la Tabla 5.3 indica el cambio de velocidad en un tiempo de 8 s.

Figura 5.8

Velocidad del molde de termoformado.



Nota: En la Figura se observa trayectoria de la la velocidad de movimiento del molde de termoformado con respecto al tiempo en el proceso de termoformado. Los datos fueron obtenidos de una prueba real en la máquina termoformadora.

Tabla 5.3

Velocidad del molde durante el proceso de termoformado.

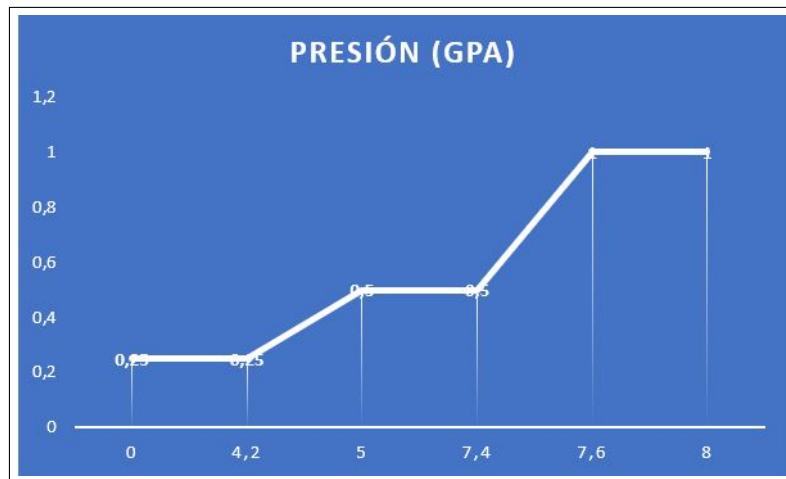
Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
0	0,1
7,49	0,1
7,50	0
8	0

Nota: La Tabla presenta la velocidad durante el proceso de termoformado del gabinete de la refrigeradora en un tiempo de 8 segundos.

⑦ **Presión de aire para preinflación.** El modelo a utilizar para la plancha de poliestireno es un modelo viscoelástico no isotérmico con un espesor estándar que para estas aplicaciones de gabinetes de refrigeradoras es de 3,3 mm a una temperatura de 430 °K (153,35 °C) y con una presión de inflación inicial de 1 GPa, con un comportamiento como se ha representado en la Figura 5.9 con respecto al tiempo de 8 segundos.

Figura 5.9

Presión de inflación de la plancha.



Nota: En la Figura se observa el comportamiento de la presión de inflación con respecto al tiempo del ciclo de conformado de 8 segundos. Los datos son determinados en una prueba real.

Tabla 5.4

Presión de inflación durante el proceso de termoformado.

t(s)	Presión(GPa)
0	0,25
4,2	0,25
5	0,5
7,4	0,5
7,6	1
8	1

Nota: En La Tabla se indica el comportamiento de la presión de inflación con respecto al tiempo donde se realizan los cambios de presión.

⑧ **Parámetros no controlados o variables de ruido.** En este punto es importante recabar y recalcar las variables que en algún punto no se puede controlar y que varían dependiendo de factores externos que no están dentro de lo que podemos aterrizar como normal como previsto sino no son circunstancias que rodean el proceso que si bien

no son altamente afectantes nos pueden hacer lograr un cierto número de incertidumbre para con lo que se plantea. A continuación se nombran nuestras variables de ruido y que por su naturaleza nos llevarían a tener un poco de duda en la simulación del proceso.

- **Temperatura ambiente:** una de las variables que si bien dentro de la programación para la simulación si son tomados en cuenta pero que en la realidad pueden variar dependiendo del lugar donde se realiza el termoformado y su clima por lo que es una variable a tomar en cuenta.
- **Presión atmosférica:** al igual que el punto anterior es condicionada al lugar donde se realice el termoformado y que varía dependiendo de la ubicación geográfica pero que dentro de la simulación puede ser controlable pero que al momento de una prueba real nos pudiera generar cierta clase de ruido que pueda afectar las circunstancias y por lo tanto está fuera de nuestro control.
- **Polvo, condiciones del lugar y su contorno:** básicamente en este punto se refiere a las condiciones del lugar en donde se ha de realizar el termoformado su entorno como basuras, polvos, agentes químicos u otro tipo de sustancias que pueden alterar el resultado final del proceso pero que por su naturaleza no son tomados en cuenta en la simulación.
- **Fabricantes del poliestireno (material diferente):** este punto es importante ya que al existir una variedad de fabricantes y por tanto proveedores del material base en este caso el poliestireno puede existir variación química y mecánica entre cada uno de estos como lo revisamos en apartado anterior (Tabla 2) existen diferentes proveedores del material que tienen sus propias fichas técnicas y propiedades (Anexo 1); que pueden en cierta forma repercutir en los resultados deseados pero que en cierta forma lo tomados para la simulación (Poliestireno alto impacto de la biblioteca de ANSYS); ya que se debería realizar estudios reológicos de todos y cada uno de los Poliestirenos que se tienen como suministro para tener que cargarlos dentro del programa con cada una de sus variaciones lo que generaría una gran rama de polímeros cargados que la larga y dentro de la simulación vamos a tener las mismas recomendaciones de ajustes e interpretaciones para el proceso que como lo tenemos ahora con el material estándar de las bibliotecas del ANSYS.

5.2.2. Propuesta del modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480

A continuación se presenta los modelos matemáticos utilizados para el desarrollo del trabajo de titulación.

5.2.2.1. Modelo viscoelástico newtoniano

Las ecuaciones gobernantes adimensionales para un fluido newtoniano incompresible que se encuentra en flujo estacionario e isotérmico son la ecuación de continuidad:

$$\nabla \times v = 0 \quad (5.1)$$

Donde:

- ∇ - Gradiente operador nabla
- v - Velocidad

1.- La ecuación de Navier-Stokes

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \times \nabla)V \right] = -\nabla \rho + \mu \nabla^2 V \quad (5.2)$$

Donde:

- ∇ - Gradiente operador nabla
- v - Velocidad,
- ρ - Densidad
- μ - Viscosidad

Es importante mencionar en este apartado que las fuerzas de cuerpo no están incluidas en la ecuación anterior debido a que la atracción gravitatoria puede despreciarse al considerar una longitud característica pequeña.

Para completar la representación matemática del surfactante se requiere incluir dos condiciones de frontera apropiadas en la superficie libre. La primera es de origen cinemático y establece que no existe transporte de masa a través de la interfaz, lo cual se manifiesta así:

$$v \times n = 0 \quad (5.3)$$

Donde:

- n - Vector unitario normal a la superficie libre
- v - Velocidad

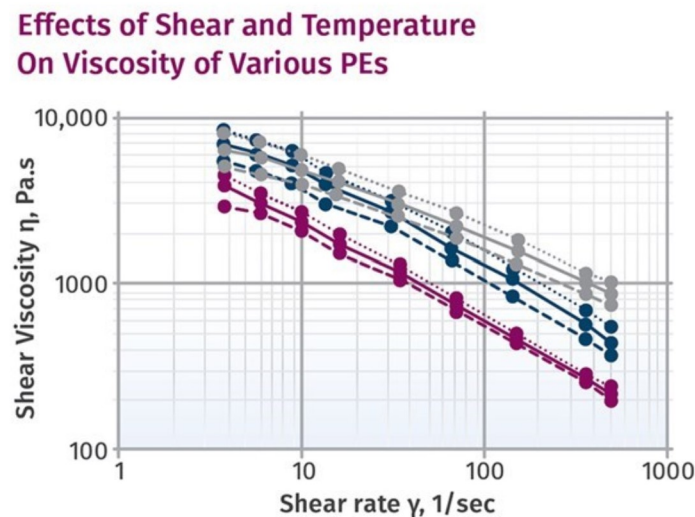
Y la segunda es la condición de frontera dinámica, esencial para relacionar las propiedades de la interfaz a la tracción en cualquier lado de la superficie libre (Martínez y Terreros, 2012).

5.2.2.2. Pseudo plasticidad bajo cizalla simple

Mientras que las ecuaciones de viscoelasticidad lineal predicen una viscosidad constante e independiente del esfuerzo cortante, de igual modo que la ley de Newton, la mayoría de polímeros fundidos y soluciones poliméricas presentan una disminución de la viscosidad con la velocidad de cizalla; a modo de ejemplo, en la Figura 5.10 se muestra el comportamiento pseudo plástico de algunos poliestirenos.

Figura 5.10

Viscosidad de poliestirenos.



Nota: En la Figura se observa que los polímeros pueden tener la misma viscosidad a una cierta velocidad y temperatura de cizallamiento, pero dado que eso puede ocurrir en un solo punto, es importante ver toda la curva tanto para su pendiente como para su desplazamiento en función de diferentes temperaturas (Frankland, 2021).

2.- La Ecuación de Jeffreys

Una de las ecuaciones empleadas para describir el comportamiento de los polímeros en viscoelasticidad lineal es la ecuación de Jeffreys; como se ha comentado anteriormente, esta ecuación puede ser modificada para obtener la ecuación de Jeffreys en un sistema de coordenadas móviles tan solo sustituyendo las derivadas parciales con respecto al tiempo:

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} = -\eta_0(\gamma_{(1)} + \lambda_2 \gamma_{(2)}) \quad (5.4)$$

Donde:

- η_0 - la viscosidad a bajas cizallas
- λ_1 - el tiempo de relajación
- λ_2 - el tiempo de retraso

Este modelo se reduce a otros cuando estos parámetros adoptan valores determinados:

- a) Si el tiempo de retraso es nulo, este modelo se convierte entonces en el de Maxwell en un sistema de coordenadas móviles.
- b) Si el tiempo de relajación es nulo, esta ecuación se convierte en la de un fluido de 2º orden.
- c) Si el tiempo de relajación y retraso coinciden, la ecuación se convierte en la ley Newton.

3.- La Ecuación de White-Metzner

Uno de los principales inconvenientes de la ecuación anterior es la consideración de una viscosidad constante, al igual que los valores de diferencias de esfuerzos normales que es capaz de predecir. Una forma de generalizar la ecuación es incluyendo la dependencia de alguno de los parámetros involucrados en el modelo con la velocidad de cizalla:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2}(\gamma_{(1)} : \gamma_{(1)})}$$

Modificando el modelo de Maxwell se obtiene la ecuación de White Metzner:

$$\tau + \frac{\eta_0}{G} \tau_{(1)} = -\eta(\gamma) \gamma_{(1)} \quad (5.5)$$

donde G es un módulo constante. Una de las principales ventajas de este modelo es que es relativamente simple, aun prediciendo formas razonables para las curvas de viscosidad y esfuerzos normales frente a velocidad de cizalla.

Tal y como se señala en los libros de Bair y Bird, esta ecuación ha resultado ser particularmente válida en procesos en los que el número de Deborah es alto, como ocurre en el hilado de fibras.

4.- La ecuación de Olroyd

Propuso la generalización de modelos como el de Jeffreys añadiendo a estos términos cuadráticos con productos de τ con $\gamma_{(1)}$ y de $\gamma_{(1)}$ consigo mismo:

$$\begin{aligned} \tau\tau + \lambda\lambda_1\tau\tau_1 + \frac{1}{2}\lambda_3(\gamma_{(1)} \times \tau + \tau \times \gamma_{(1)}) + \frac{1}{2}\lambda_5(tr\tau)\gamma_{(1)} + \frac{1}{2}\lambda_6(\tau : \gamma_{(1)})\delta = \\ -\eta_0(\gamma_1 + \lambda_2\gamma_2 + \lambda_4\{\gamma_1 \times \gamma_1\} + \frac{1}{2}\lambda_7(\gamma_1 : \gamma_1)\delta) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Como cabe imaginar, con los 8 parámetros del modelo es posible abarcar un mayor número de fenómenos, aunque no se llega a representar la dependencia de la viscosidad y los esfuerzos normales con la velocidad de cizalla tan fielmente que con el modelo de White-Metzner (J. García, 2018).

Restricciones de la temperatura en el modelado

Considerando que la temperatura de la lámina debe llegar a la óptima con una tolerancia de 5 °C y durante el transporte a la estación de moldeo no debe caer más de 5 a 10 °C (Özdemir y cols., 2020). Las distintas técnicas de calentamiento para mantener esta condición son:

- Alambre de calefacción de Ni/Cr
- Barras de resistencia metálicas,
- Radiadores cerámicos.
- Placas radiantes calentadas por gas,
- Calentadores de cuarzo en forma de placa o varilla,

- Lámparas calentadoras,
- Placas de cristal de cuarzo.

La temperatura superficial del calentador se controla mediante termopares o termistores y el calentamiento de la lámina se establece en relación con el tiempo, generalmente por iteración. Los alambres de calefacción y las barras de resistencia son económicos, pero se deterioran rápidamente por oxidación. Los calentadores de cuarzo son muy eficientes y no se deterioran, pero son costosos. Se prefieren para temperaturas altas y necesidades de calentamiento selectivo por zonas (ÖzdemiR y cols., 2020).

Aunque el calentamiento por infra-rojos es el más frecuente, algunas láminas pueden calentarse por contacto con una placa metálica caliente, o por convección en un horno con circulación de aire. El calentamiento por energía de radio-frecuencia (RF o microondas) requiere que el material absorba estas frecuencias, como en el caso del PVC, otros materiales pueden utilizar el sistema si son convenientemente dopados con materiales como el negro de humo, cuyas partículas entran en vibración bajo estas frecuencias, ocasionando el calentamiento del material (Hoffmann y cols., 2020).

5.2.3. Evaluación del modelo computacional mediante elementos finitos propuesto para la validación del proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480

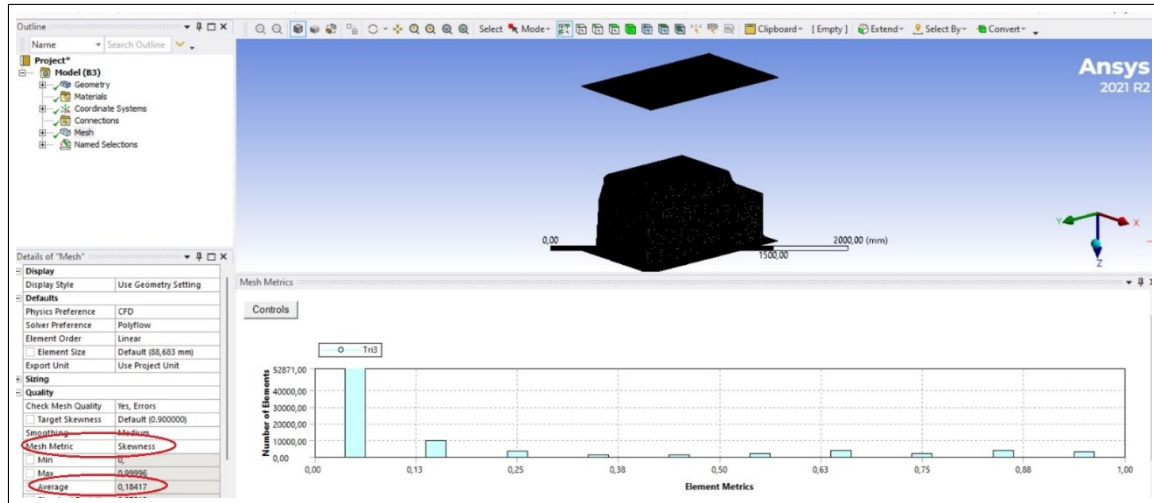
De acuerdo a Vehi (2016) el análisis de la calidad de una malla se determina analizando tres factores considerados los más importantes, y son el Skewness, el Smoothness y el Aspect Ratio. La oblicuidad (Skewness) se mide en una escala del 0 al 1, representando el 0 la mayor calidad posible e indica que todos los ángulos de nuestros elementos sean lo más parecidos posibles. En el caso de un elemento triangular, el de coeficiente 0 sería el equilátero y en el de un cuadrilátero aquel cuyos ángulos fueran rectos.

La suavidad (Smoothness) comprueba que no haya grandes diferencias entre los tamaños de elemento adyacentes, es decir, que los elementos crezcan o decrezcan de manera muy gradual. Por último, lo que el Aspect Ratio mide en una escala del 0 al 1, siendo 1 el valor ideal, es que las aristas de los elementos tengan un tamaño similar. En este caso los elementos de coeficiente 1 serían el triángulo equilátero y el cuadrado.

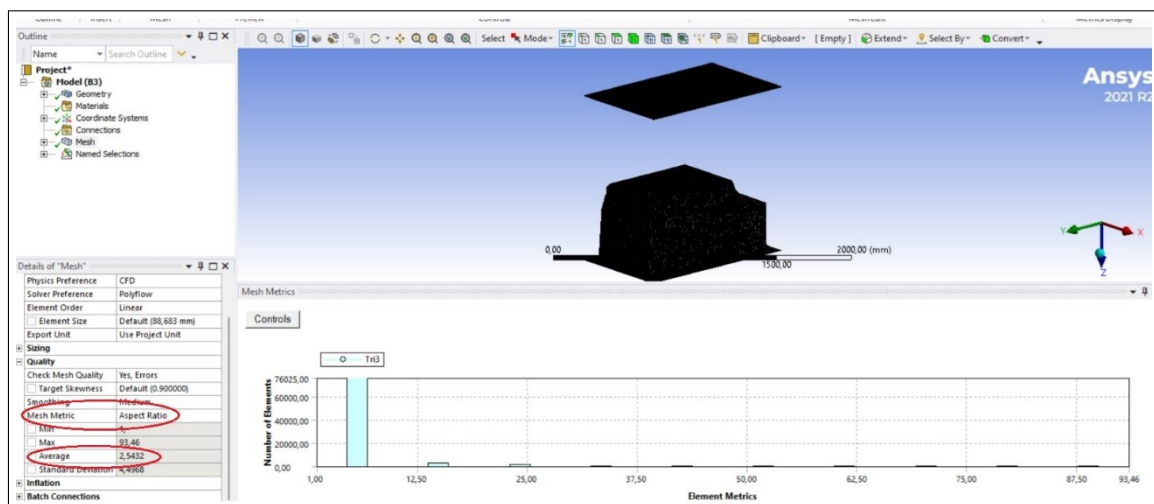
En este contexto se procede a la evaluación del mallado del molde y de la lámina de poliestireno, encontrando los siguientes valores de los factores considerados importantes, como se presentan en las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13.

Figura 5.11

Determinación de los factores Skewness – Aspect Ratio.



<u>Factor</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>
Skewness	0,18417	El valor debe estar entre 0 y 1, mientras más cerca del 0 mejor calidad del maldado

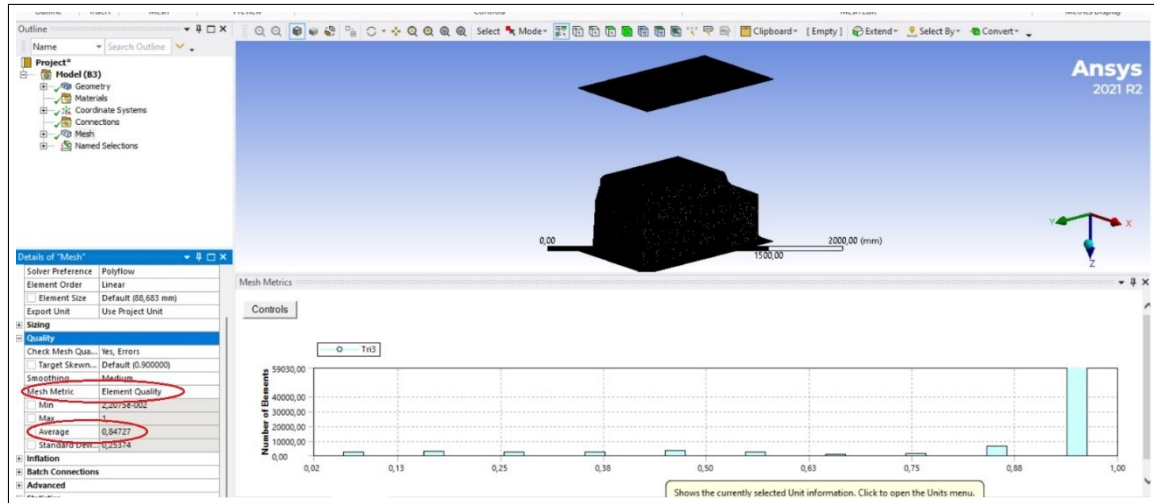


<u>Factor</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>
Aspect Ratio	2,5432	El valor varía entre 1 a 100 mientras más cerca de 1 mejor la calidad del maldado

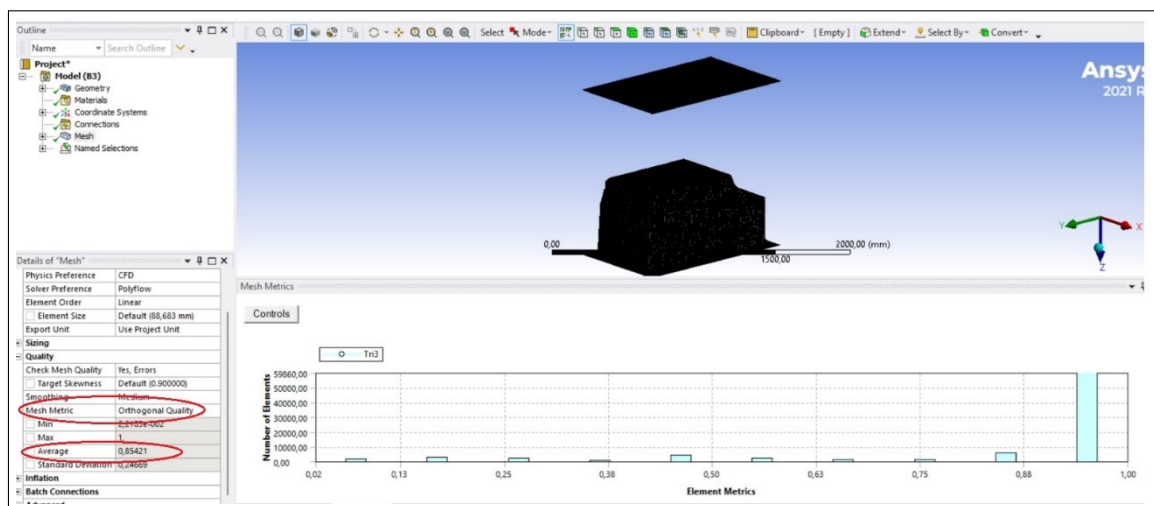
Nota: En la Figura se observan los valores del factor de Skewness y el Aspect Ratio determinados en el software para el molde y la lámina de poliestireno de alto impacto.

Figura 5.12

Determinación de los factores Element Quality – Orthogonal Quality.



<u>Factor</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>
Element Quality	0,84727	El valor entre 0 y 1 mientras más cerca del 1 mejor calidad del mallado

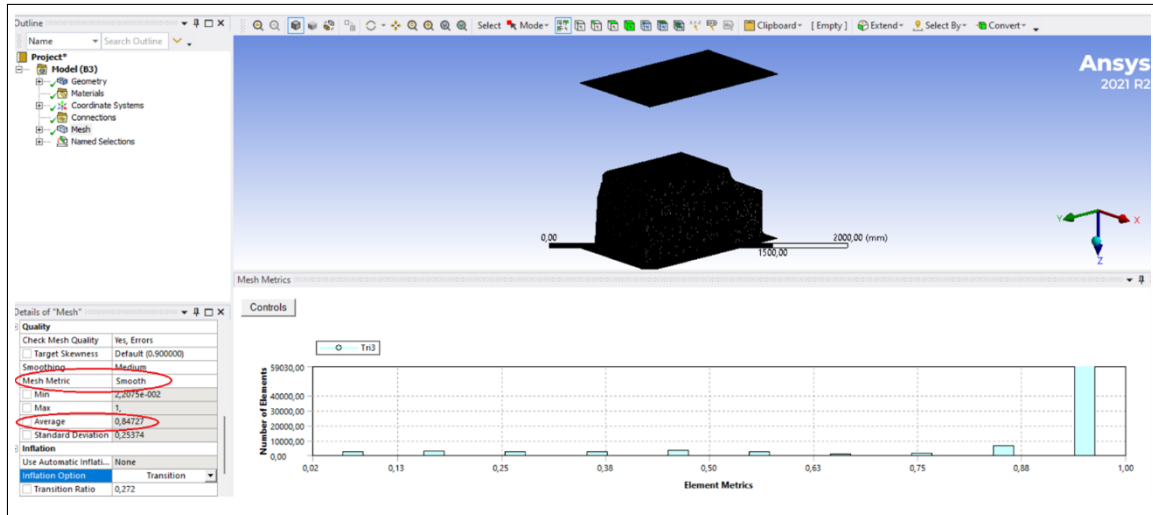


<u>Factor</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>
Orthogonal Quality	0,85421	El valor entre 0 y 1 mientras más cerca del 1 mejor calidad del mallado

Nota: En la Figura se observan los valores del factor de Element Quality y orthogonal Quality determinados en el software para el molde y la lámina de poliestireno de alto impacto.

Figura 5.13

Determinación del factor Smoothness.



<u>Factor</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>
Smoothness	0,84727	El valor entre 0 y 1 mientras más cerca del 1 mejor calidad del mallado

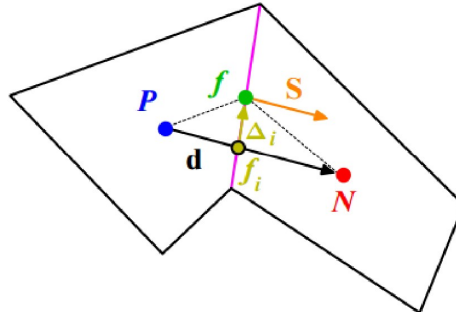
Nota: En la Figura se observa el valor del factor de Smoothness determinado en el software para el molde y la lámina de poliestireno de alto impacto.

A continuación se presenta la interpretación de los valores de los diferentes factores determinados mediante la simulación:

<u>Factor</u>	<u>Interpretación</u>
Skewness	Este valor indica la diferencia entre la forma del elemento de la malla y la forma del elemento ideal, de modo que se puede decir que tan ortogonal (90°) o que tan ideal (0°) es el elemento al momento de representar la geometría. Este parámetro influye en la precisión y estabilidad de la solución y este criterio siempre es el primero en revisar para determinar si existe solución y si es correcta y precisa (Farah y cols., 2018). El valor determinado en el software es de 0,18417 y determina una baja asimetría de la malla entendiendo que "la asimetría es una propiedad de determinados cuerpos, dibujos, funciones matemáticas y otros tipos de elementos en los que, al aplicarles una regla de transformación efectiva, se observan cambios respecto al elemento original" (Wikipedia, 2023).

Figura 5.14

Interpretación del factor Skewness.



Nota: En la Figura se observa que la asimetría esta determinada por la desviación del vector \mathbf{d} que conecta las dos celdas adyacentes (mientras menor sea el valor de \mathbf{d} , menor asimetría, el valor del ángulo formado entre el vector \mathbf{P} y \mathbf{N} tiende a cero), por ejemplo, \mathbf{P} y \mathbf{N} desde el centro de la cara, \mathbf{f} . Principalmente, agrega difusión a la solución y afecta los términos convectivos de la solución (Farah y cols., 2018).

Factor

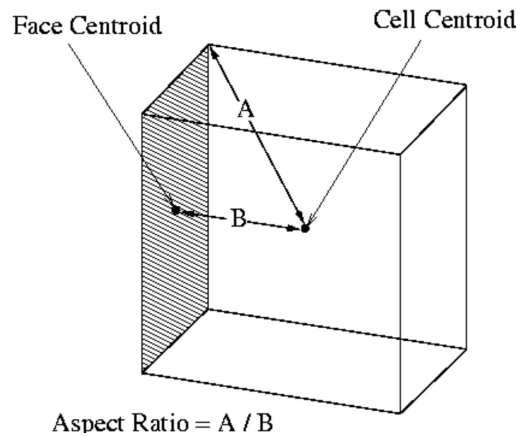
Interpretación

Aspect Ratio

El factor indica que tan esbelta es una celda, considerando que "se entiende por efecto de esbeltez la reducción de resistencia de un elemento sujeto a la compresión axial o a flexo compresión, debida a que la longitud del elemento es grande en comparación con las dimensiones de su sección transversal" (Jurado, 2021; Moreno, Ocampo, y Giraldo, 2007), su cálculo va en función de la distancia obtenida entre el centroide de la celda y el centroide de las caras divida por la distancia del centroide del elemento y los nodos, tal como se aprecia en la Figura 5.16. Los valores ideales que se manejan son de 1, así se garantizan elementos "perfectos" y que ayudarán a la solución y la precisión del resultado obtenido, de acuerdo al contexto presentado, el valor obtenido de aspecto de radio y que representa la esbeltez del elemento finito es de 2,5432 por lo que la malla presenta una imperfección de los mismos con prismas muy alargados con una relación no adecuada entre sus secciones transversal y longitudinal, que se podría mejorar aumentando el número de elementos en las geometrías de curvaturas complejas o cambiar la forma del elemento finito para el análisis.

Figura 5.15

Interpretación del factor Aspect Ratio.



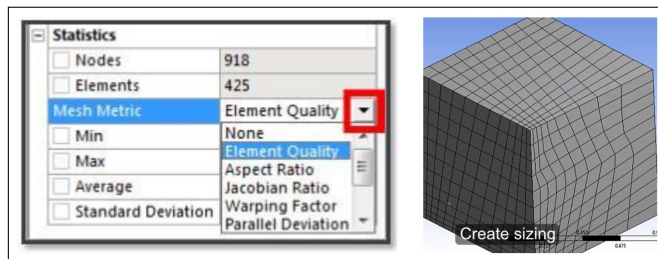
Nota: En la Figura se observa que el factor de Aspect Ratio esta en función de la división del vector **A** formado desde el centro del elemento hasta el nodo, con respecto al vector **B** formado desde el centro y el punto medio de una de las caras del elemento finito.

Factor

Interpretación

Analiza la calidad de la malla emitiendo un informe que permite conocer en detalle la calidad de cada elemento, así como localizar dónde se encuentran esos elementos en el modelo si fuese el caso. En el análisis realizado el valor del factor es de 0,84727.

**Element
Quality**

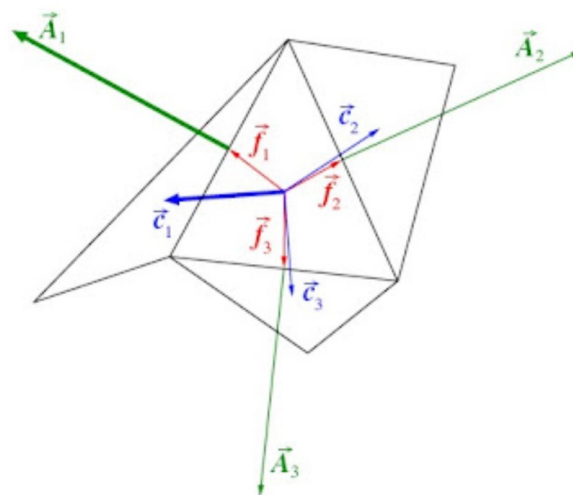


La calidad del elemento se basa en la relación entre el volumen y la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 2D quad/tri, o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 3D. La calidad del elemento es una métrica de calidad compuesta que oscila entre 0 y 1. Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo (Syed, 2022).

<u>Factor</u>	<u>Interpretación</u>
Orthogonal Quality	Se define como el ángulo en grados entre el vector de conexión de los centros celulares y el vector normal de la cara interna. El rango de ortogonalidad está entre 0 (peor) y 1 (ideal) (Vegas, 2020). En la investigación se obtuvo un valor de 0,85421 que es considerado muy bueno dentro del espectro de valores de los parámetros de orthogonal quality (Grau y Santacreu, 2018).

Figura 5.16

Interpretación del factor Orthogonal Quality.



Nota: El rango de calidad ortogonal es 0 – 1, donde un valor de 0 es peor y un valor de 1 es mejor. La calidad ortogonal de las celdas se calcula utilizando el vector normal de la cara, el vector del centroide de la celda al centroide de cada una de las celdas adyacentes y el vector del centroide de la celda a cada una de las caras. (Farah y cols., 2018; Satya, 2016).

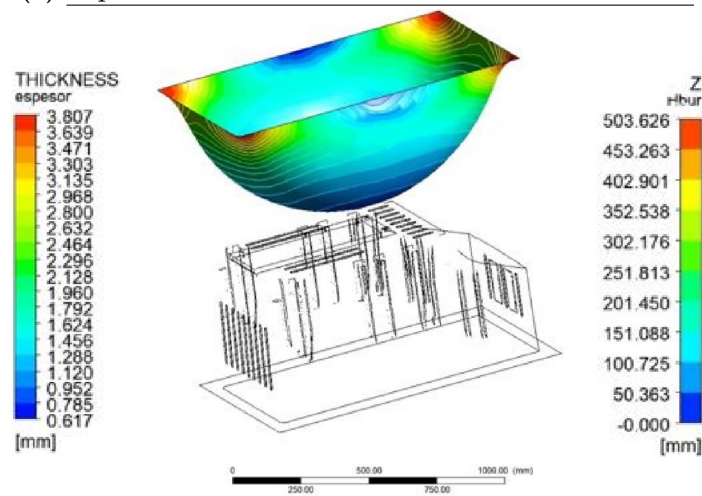
Finalmente, se tiene la interpretación del factor **Smoothness** que como se había mencionado anteriormente, representa la suavidad (Smoothness) y que principalmente comprueba que no exista grandes diferencias entre los tamaños de los elementos adyacentes, es decir, que los elementos crezcan o decrezcan de manera muy gradual y no existan distorsiones en tamaño muy diferenciadas. En la investigación el valor obtenido es de 0,84727 lo que indica que existe una gran calidad de mallado, lo que se interpreta como una buena interpretación del resultado esperado con una gran precisión del mismo en la solución del fenómeno estudiado.

Una vez establecido la calidad del mallado con los valores de los factores establecidos en la sección anterior, se procedió con el análisis del comportamiento de la lámina polimérica de PAI al momento de la pre-inflación, donde se la calienta y se aplica una presión hasta alcanzar una burbuja con un estiramiento aproximado de 50 cm (medida recomendada para obtener una altura de 710 mm como se observa en la Figura 5.3), necesaria para al termoformado, la Figura 5.17 presenta el análisis previo al termoformado.

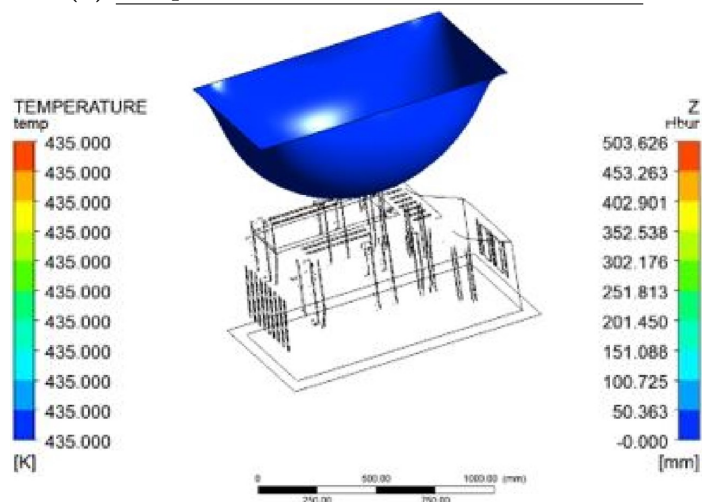
Figura 5.17

Pre-inflación para el termoformado..

(a) Espesor de la lámina en función del estiramiento.



(b) Temperatura en función del estiramiento.



Nota: En la Figura se observa la simulación en Ansys del comportamiento de la lámina polimérica al ser sometida a diferentes presiones de inflación con una temperatura constante de 435 °K (161.35 °C) porque se considera un proceso isotérmico en la lámina y un espesor constante de la lámina de 3,3 mm como dato de entrada.

La Tabla 5.5 presenta los resultados de la simulación del pre-inflamiento de la lámina polimérica.

Tabla 5.5

Datos obtenidos de la pre-inflación de la lámina.

Presión de inflación (Pa)	Temperatura de la plancha	Altura de la burbuja (mm)					Observaciones
		2s	3s	4s	5s	6s	
200	435 °K (161.35°C)	151	—	—	—	—	se rompe
400	435 °K (161.35°C)	379	—	—	—	—	se rompe
250	435 °K (161.35°C)	212	297	395	530	506	Termina

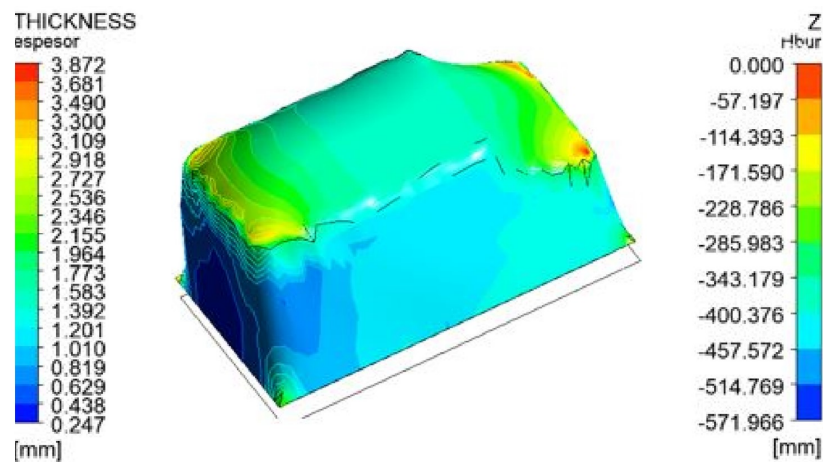
Nota: La Tabla presenta los resultados de la simulación de la pre-inflación de la lámina, donde la última fila indica que a una presión de 250 Pa y a una temperatura de 435 °K (161.35°C,) el proceso no presenta rotura en la lámina y a los 6s de iniciado el proceso se tiene una longitud de estiramiento de 506 mm.

En el proceso de conformado posterior a la pre-inflación de la lámina, se consideró que el molde tiene un comportamiento adiabático y su velocidad será constante de 0,1m/s con un trayecto hacia arriba en dirección contraria a la inflación de la lámina, y la misma se encuentra a una temperatura isotérmica durante todo el proceso hasta que se pueda alcanzar la termoformación y completar el moldeado con el molde y alcanzar la geometría deseada del gabinete para el refrigerador.

Al seguir el proceso de termoformado se puede evidenciar que el comportamiento de la plancha de PAI es el adecuado porque no se percibe que sufra desperfectos o que no haya un buen acople con el molde. En la Figura 5.18 se puede ver como la plancha va tomando la forma del molde que está preestablecido para el diseño del refrigerador, por lo tanto, las predicciones para un buen proceso de termoformado se van fijando en cuanto a lo que se va simulando porque los espesores muestran uniformidad en los puntos críticos y sobre todo que no existe roturas o pliegues desfavorables en el proceso. Para finalizar el proceso de simulación se tiene una presión de vacío (succión de la lámina hacia el molde), que según datos obtenidos por la experiencia y estudios relacionados debe de ser de 1 GPa y que se dispone dentro de los parámetros de calibración para la máquina termoformadora, además de acuerdo a las pruebas ensayadas en la máquina esta es la mejor presión para el vacío y genera un acople perfecto de la plancha y el molde. En la Figura 5.18 se puede observar el acople de la lámina con el molde considerando que es un sistema adiabático.

Figura 5.18

Variación del espesor al acoplarse el molde con la lámina polimérica.

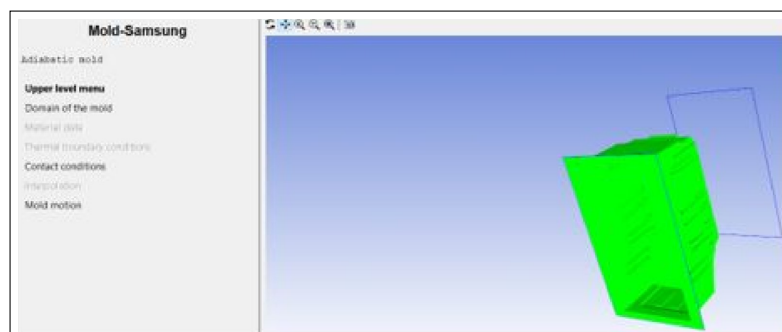


Nota: En la Figura se observa la variación del espesor de la lámina al realizarse el acople con el molde que contiene la forma del gabinete, existe un estiramiento debido a que la superficie que toma contacto no se estira, y tiende a estirarse la parte alta de la lámina que no sufrió cambio de espesor en el pre-inflamiento. El estiramiento es inverso por eso parte de un valor negativo hasta cero, es decir tiene una dirección contraria a la de la pre-inflación.

A continuación se presenta la configuración del molde donde la transferencia de calor será en un sistema adiabático y de temperatura constante que se describe y se carga en el software, a continuación la Figura 5.19 se observa lo descrito.

Figura 5.19

Molde configurado.

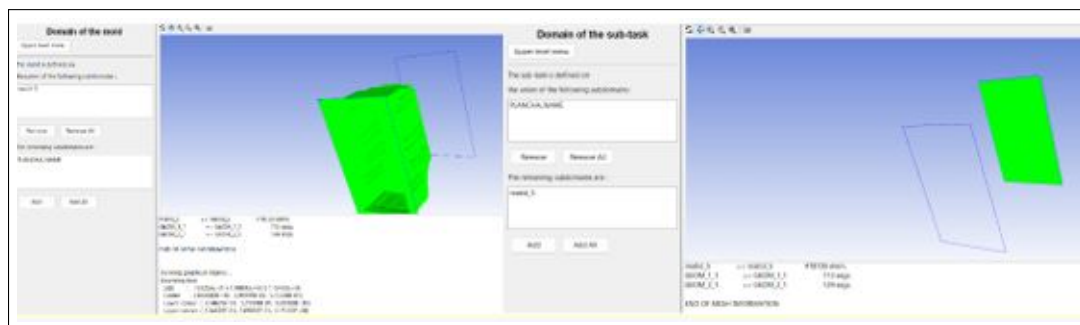


Nota: En la Figura se observa la configuración del molde como adiabático y temperatura constante para la simulación con Ansys previo a la obtención de los datos obtenidos anteriormente en las Figuras 5.18, 5.17 y la Tabla 5.5.

La temperatura en cada zona de la lámina será isotérmica y temperatura optimizada, la presión de procesamiento, pre estiramiento y termoformado serán optimizados. La Figura 5.20 presenta la configuración de optimizado del pre-estiramiento y el termoformado.

Figura 5.20

Configuración de optimizado del pre-estiramiento y termoformado.



Nota: En la Figura se observa la configuración de optimizado para el proceso del pre-estiramiento (inflación) y el termoformado, esta configuración se lo realizó en el software con las condiciones antes expuestas.

6. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a cada uno de los objetivos planteados.

6.1. Establecimiento de los parámetros y restricciones iniciales para el modelo computacional con elementos finitos en el proceso de termoformado

6.1.1. Propiedades del poliestireno.

A continuación la Tabla 6.1 presenta las principales propiedades mecánicas del poliestireno de alto impacto de acuerdo a las hojas técnicas establecidas por el proveedor.

Tabla 6.1

Propiedades del poliestireno.

Propiedades Físicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Densidad	1,05	g/cm ³	ISO 1183

Propiedades Mecánicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Resistencia a la atracción hasta la deformación	(*)	MPa	ISO 527
Resistencia a la atracción en la ruptura	59	MPa	ISO 527
Alargamiento hasta la ruptura	3%	%	ISO 527
Módulo de elasticidad en tracción	3250	MPa	ISO 527
Resistencia a la flexión	106	MPa	ISO 178
Resistencia al impacto Charpy con entalla	1,47	KJ/m ²	ISO 179
Resistencia al impacto Charpy	16	KJ/m ²	ISO 179
Dureza a la presión de la bola	150	MPa	ISO 2039

Continúa en la siguiente página.

Continuación de la Tabla 6.1

Propiedades Térmicas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Temp. máxima de utilización en continuo	80	°C	
Temp. reblandecimiento VICAT (10 N)	106	°C	ISO 306
Temp. reblandecimiento VICAT (50 N)	101	°C	ISO 306
Temp. reblandecimiento HDT A (1.8 Mpa)	86	°C	ISO 75-2
Temp. reblandecimiento HDT B (0.45 Mpa)	98	°C	ISO 75-2
Coefficiente lineal de expansión térmica	8×10^{-5}	°C ⁻¹	ISO 75-2

Propiedades Ópticas

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Transmisión de luz	89	%	ASTM D -1003
Refracción	1591	-	ASTM D -54

Nota: La Tabla indica las principales propiedades físicas, mecánicas, térmicas y ópticas del poliestireno de alto impacto utilizado en el proceso de termoformado de gabinetes de refrigeradoras (Acuña y Morales, 2011; Grassi y cols., 2001).

Las propiedades configuradas en el software para la lámina de poliestireno fueron las que se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2

Propiedades del poliestireno configuradas.

<u>Propiedades</u>	<u>Unidad</u>
Espesor	3,3mm
Densidad	1,05 g/cm ³
Coefficiente de expansión térmica	8×10^{-5}
Capacidad térmica	0,0425 W/mK
Viscosidad	12,7 MPa ^{1/2}
Permeabilidad	7,2

Nota: La Tabla presenta las propiedades configuradas de la lámina de poliestireno para la simulación en el software, las mismas cambiarán de acuerdo a las hojas técnicas de los nuevos materiales de poliestireno adquiridos como materia prima para la elaboración de gabinetes para refrigeradoras.

6.1.2. Temperatura y Dimensiones

La Tabla 6.3 presenta la temperatura configurada para la simulación, así como las dimensiones de acuerdo a la geometría establecida anteriormente en la Figura 5.3.

Tabla 6.3

Temperatura de termoformado y dimensiones de la geometría.

TEMPERATURA

Temperatura	Valor	Unidad
Temperatura isoterma	435	°K

DIMENSIONES

Arista	Valor	Unidad
Espesor	3.3	mm
Largo	710	mm
Ancho	1148	mm

Nota: La Tabla presenta el valor de la temperatura utilizado para la simulación del proceso de termoformado al igual que las dimensiones generales utilizadas para el dimensionamiento del gabinete y de la lámina de poliestireno.

6.1.3. Velocidad del molde para el termoformado

Para la configuración en el software se consideró una velocidad constante como se indica en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4

Velocidad del molde para el termoformado.

Magnitud	Unidad
0,1	m/s

Nota: La Tabla presenta el valor seleccionado de la velocidad del molde para el termoformado, que fue determinado de acuerdo a la experiencia en el proceso y recomendaciones por parte de los proveedores del material a termoformar.

6.1.4. Presión de inflación de la lámina

Para la configuración de la presión de inflación se eligió los valores que se presenta en la Tabla 5.5, que fueron utilizados para las simulaciones previas para determinar que no existan desgarras en la lámina sometida a pre-inflación.

6.1.5. Mallado del molde

A continuación, la Tabla 6.5 presenta algunos aspectos considerados en la configuración del mallado del molde para la simulación.

Tabla 6.5

Configuración del mallado del molde.

Caras	480600 (Cuadráticas y triangulares)
Segmentos	954821
Vértices	474223

Nota: La Tabla presenta el número de segmentos del mallado al igual que el número de caras y vértices de acuerdo a la geometría del gabinete.

6.2. Propuesta del modelo computacional mediante elementos finitos para simular el proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador del modelo RI-480

Para el modelo computacional se establecieron los siguientes modelos matemáticos, utilizados por el software para la simulación del proceso de termoformado.

6.2.1. Ecuación de Navier-Stokes

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \times \nabla)V \right] = -\nabla \rho + \mu \nabla^2 V \quad (6.1)$$

6.2.2. Ecuación de Jeffreys

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} = -\eta_0 (\gamma_{(1)} + \lambda_2 \gamma_{(2)}) \quad (6.2)$$

6.2.3. Ecuación de White-Metzner

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2}(\gamma_{(1)} : \gamma_{(1)})}$$

$$\tau + \frac{\eta_0}{G} \tau_{(1)} = -\eta(\gamma) \gamma_{(1)} \quad (6.3)$$

6.2.4. Ecuación de Olroyd

$$\tau \tau + \lambda \lambda_1 \tau \tau_{(1)} + \frac{1}{2} \lambda_3 (\gamma_{(1)} \times \tau + \tau \times \gamma_{(1)}) + \frac{1}{2} \gamma_5 (tr \tau) \gamma_{(1)} + \frac{1}{2} \lambda_6 (\tau : \gamma_{(1)}) \delta =$$

$$-\eta_0 (\gamma_1 + \lambda_2 \gamma_2 + \lambda_4 \{\gamma_1 \times \gamma_1\} + \frac{1}{2} \lambda_7 (\gamma_1 : \gamma_1) \delta) \quad (6.4)$$

6.3. Evaluación el modelo computacional mediante elementos finitos propuesto para la validación del proceso de termoformado en gabinetes de un refrigerador modelo RI-480

Los resultados encontrados en la evaluación del modelo computacional del proceso de termoformado de gabinetes del congelador se presentan a continuación.

6.3.1. Evaluación de la calidad del mallado

La Tabla 6.6 presenta los resultados de los factores que indican la calidad del mallado, que para el caso de estudio se considera muy bueno y, por lo tanto, los resultados son confiables.

Tabla 6.6

Calidad del mallado del molde

Factor	Valor	Condición
Skewness	0,18417	El valor debe estar entre 0 y 1, mientras más cerca de 0, mejor la calidad del mallado.
Aspect ratio	2,5432	El valor varía entre 1 a 100, mientras más cerca de 1, mejor la calidad del mallado.
Element Quality	0,84727	El valor entre 0 y 1, mientras más cerca de 1 mejor calidad de mallado.
Orthogonal quality	0,85421	El valor entre 0 y 1, mientras más cerca de 1 mejor la calidad del mallado.
Smoothness	0,84727	El valor entre 0 y 1, mientras más cerca de 1 mejor calidad de mallado.

Nota: La Tabla presenta el valor de los diferentes factores que determinan la calidad del mallado, que de acuerdo a los resultados obtenidos en las condiciones establecidas el mismo es de muy buena calidad, lo que permite tener un nivel de confianza muy alto de los resultados que se obtuvieron por simulación.

6.3.2. Evaluación de la pre-inflación de la lámina polimérica

En la evaluación del pre-inflado de la lámina polimérica de poliestireno se determinó que la presión que no presenta inconvenientes en la formación de la burbuja es 250 Pa a una temperatura de 435 °K (161.35°C), durante un tiempo de 6s, en ese tiempo alcanza la longitud necesaria antes de que el molde suba para empezar el proceso de termoformado. La Tabla 6.7 presenta los resultados obtenidos de la simulación de la pre-inflación de la lámina de poliestireno.

Tabla 6.7

Datos de la evaluación de la pre-inflación.

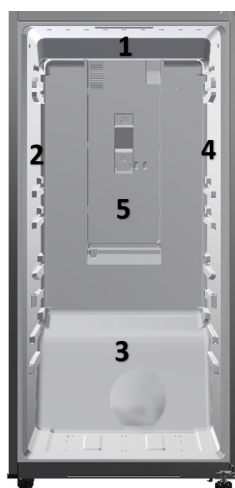
Presión de inflación (Pa)	Temperatura de la plancha	Altura de la burbuja (mm)					Observaciones
		2s	3s	4s	5s	6s	
200	435 °K (161.35°C)	151	—	—	—	—	se rompe
400	435 °K (161.35°C)	379	—	—	—	—	se rompe
250	435 °K (161.35°C)	212	297	395	530	506	Termina

Nota: La Tabla presenta los resultados de la simulación de la pre-inflación de la lámina, donde la última fila indica que a una presión de 250 Pa y a una temperatura de 435 °K (161.35°C,) el proceso no presenta rotura en la lámina y a los 6s de iniciado el proceso se tiene una longitud de estiramiento de 506 mm.

A continuación en la Tabla 6.8, se presentan los resultados de las medidas de los espesores tomados de forma física en los gabinetes del congelador de acuerdo a cinco diferentes zonas como se observan en la Figura 6.1. También se presentan las medidas simuladas en y su porcentaje de variación. Es necesario considerar que el resultado de las mediciones que se presentan en la Tabla son cada una de ellas el promedio de 15 datos tomados en los gabinetes ensayados.

Figura 6.1

Zonas determinadas para la toma de medidas de los espesores.



Nota: En la Figura se observan las cinco zonas determinadas para la medición de los espesores, dos de las zonas (2 y 4) son las caras laterales del gabinete, la zona (1) corresponde a la parte superior del gabinete, la zona (5) a la parte posterior, finalmente la zona 3 es la parte frontal del gabinete. Todas las medidas fueron tomadas en las mismas zonas en 15 diferentes gabinetes.

Tabla 6.8

Cuadro comparativo de espesores medidos versus lo simulado.

Espesores medidos en el gabinete (mm)

Zona	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
1	3	3,15	3,15	3,25	3,14
2	3	3,15	3,15	3,25	3,14
3	0,725	0,835	0,732	0,732	0,756
4	3	3,10	3,18	3,23	3,13
5	0,815	0,952	0,752	0,835	0,838

Espesores simulados del gabinete (mm)

Zona	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
1	2,90	3	3,05	3,10	2,95
2	2,90	3	3,05	3,10	2,95
3	0,765	0,756	0,726	0,726	0,743
4	2,90	3	3,05	3,10	2,95
5	0,805	0,895	0,726	0,726	0,788

Porcentaje de variación entre lo medido y simulado (%)

Zona	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
1	3,33	4,76	3,17	4,61	6,05
2	3,33	4,76	3,17	4,61	6,05
3	5,22	9,46	0,81	0,81	1,71
4	3,33	0,03	4,08	4,02	5,75
5	1,225	5,98	3,45	13,05	5,96

Nota: La Tabla presenta los resultados de los valores medidos del espesor en las diferentes zonas establecidas así como los resultados de los espesores encontrados mediante simulación finalmente se presenta el porcentaje de variación entre las medidas realizadas en el ensayo y las medidas encontradas mediante simulación.

A continuación en la Tabla 6.9 se presentan los resultados encontrados del espesor de acuerdo al número de elementos finitos utilizados durante la simulación, todo esto se realizó para determinar como converge la curva del espesor de la lámina polimérica de acuerdo al número de segmentos determinados de acuerdo a la geometría del gabinete. El número de elementos finitos se fueron aumentando, considerando que no se altere la calidad del mallado controlando los valores de los factores de la calidad, de manera que los mismos se encuentren en los rangos admisibles, de manera que garanticen la confiabilidad de los resultados simulados. En la Figura 6.2 se puede observar el comportamiento de los espesores simulados en referencia al número de elementos finitos y como la misma converge a un valor determinado.

Tabla 6.9

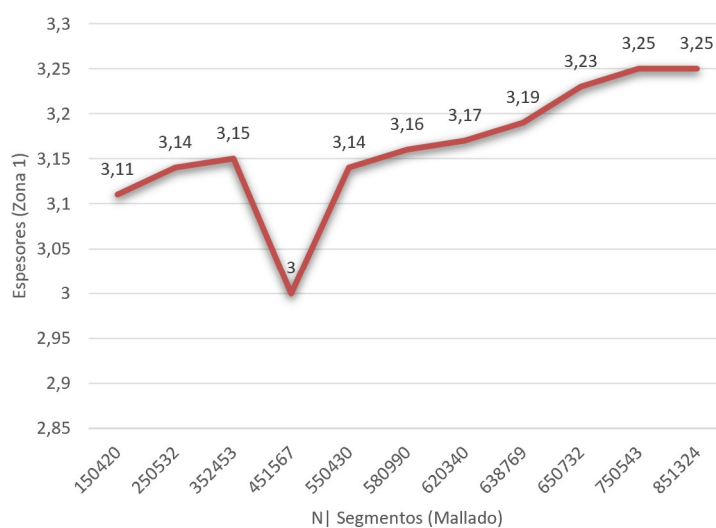
Variación del espesor de acuerdo al número de segmentos.

N° Segmentos	Espesor (mm)
150420	3,09
250532	3,11
352453	3,14
451567	3,15
550430	3,00
580990	3,14
620340	3,16
638769	3,17
650732	3,19
750543	3,23
851324	3,25
954821	3,25

Nota: La Tabla presenta los resultados obtenidos mediante simulación del espesor del gabinete formado por una lámina de poliestireno.

Figura 6.2

Comportamiento del espesor de acuerdo al número de segmentos.



Nota: En la Figura se observa el comportamiento del espesor de la lámina polimérica del gabinete con respecto al número de segmentos, presenta un fco negativo al tener 550430 elementos, que aunque en la gráfica parece considerable, en medida solo representa un cambio promedio 0.145 mm promedio entre la medida anterior y posterior.

A continuación en la Tabla 6.10 y la Figura 6.3 se presenta los resultados de la variación de los factores Skewness y Aspect Ratio en relación con los números de segmentos modificados para mejorar el mallado.

Tabla 6.10

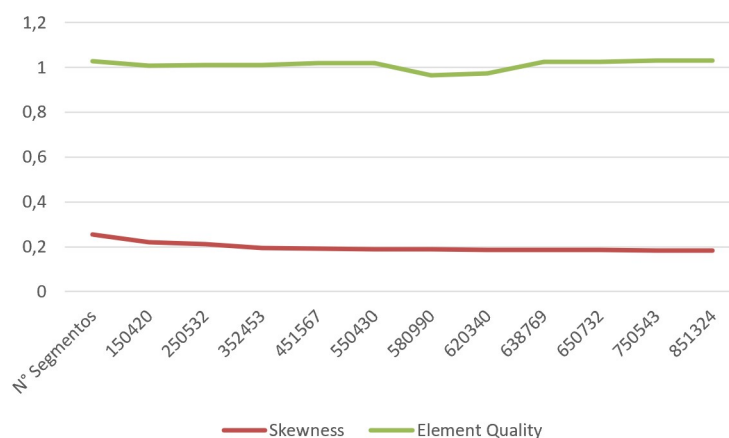
Variancia de los factores Skewness y Element Quality con respecto al número de segmentos.

N° Segmentos	Skewness	Element Quality
150420	0,25481	0,77356
250532	0,22125	0,78589
352453	0,21025	0,79859
451567	0,19525	0,81525
550430	0,19163	0,82569
580990	0,18978	0,82958
620340	0,18786	0,77589
638769	0,18658	0,78569
650732	0,18598	0,83776
750543	0,18571	0,83975
851324	0,18437	0,84578
954821	0,18417	0,84727

Nota: La Tabla presenta los resultados obtenidos mediante simulación del espesor del gabinete formado por una lámina de poliestireno.

Figura 6.3

Comportamiento de Skewness y Element Quality con respecto al número de segmentos.



Nota: En la Figura se observa el comportamiento de los factores analizados que tienden a tener un valor constante.

7. Conclusiones

Conclusión 1

Los parámetros establecidos del material termoformado como el espesor de 3,3 mm, la densidad de $1,05 \text{ g/cm}^3$, el coeficiente de expansión térmica, permeabilidad y la viscosidad de $12,7 \text{ MPa}^{1/2}$ junto a la geometría del gabinete, presión de vacío y pre-inflación de 1 GPa, y una calidad de mallado verificada con sus factores de Skewness, 0,18417; Smoothness de 0,84727 y otros influyen directamente en el proceso de termoformado que se ve reflejado en las variaciones del espesor de la simulación y lo ensayado.

Conclusión 2

Las ecuaciones de los modelos viscoelásticos de Navier-Stokes, establecidas para determinar el comportamiento de las láminas de poliestireno sometidas a una temperatura constante en la simulación, donde en el proceso disminuye su viscosidad con la velocidad de cizalla sometida a esfuerzos normales de su propio peso por la pre-inflación y posterior conformado, presentan resultados muy cercanos a los medidos en los gabinetes fabricados, por lo que los modelos utilizados son válidos para la investigación.

Conclusión 3

En la evaluación de los resultados obtenidos se estableció que existe una diferencia del 3,33% en las dimensiones del espesor entre lo medido y lo simulado en la zona 1, del 4,76% en la zona 2, 3,17% en la zona 3, 4,61% en la zona 4 y finalmente una diferencia del 6,05% en la última zona, lo que determina que los datos obtenidos por simulación son aceptables en todas las zonas evaluadas.

Referencias Bibliográficas

- Acuña, P., y Morales, G. (2011). *Síntesis de poliestireno de alto impacto (hips) a partir de diferentes iniciadores multifuncionales: Efecto de la estructura y del contenido de oxígeno activo del iniciador*. Revista Iberoamericana de Polímeros, ISSN-e 0121-6651, Vol. 12, N° 2, págs. 107-115.
- Ainia. (2022). *Simulación de procesos con modelos matemáticos*. [Disponible en: <https://www.ainia.es/ainia-news/simulacion-procesos-modelos-matematicos-utilizas/> Accedido el: 10 de enero del 2023].
- Almeida, A., Moura, P., y Quaresma, N. (2020). Energy-efficient off-grid systems. *Energy Efficiency*, 13(2), 349–376.
- Amazon. (2021). *Poliestireno de alto impacto lámina de plástico – 8 pack – 12 x 12 color blanco, suave, 1/16 de espesor caderas/poliestireno*. [Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/060-Poliestireno-impacto-P1%C3%A1stico-espesor-Poliestireno/dp/B017S4BEIM>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Ansys Software. (2019). *Ansys fluent | fluid simulation software*. [Disponible en: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>; Accedido el: 3/10/2022].
- Aristegui Maquinaria. (2023). *El proceso de termoformado en plásticos*. [Disponible en: <https://www.aristegui.info/el-proceso-de-termoformado-en-plasticos/> Accedido el: 9 de enero del 2023].
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson Editores.
- Beatove, S. (2014). La simulación numérica en problemas de ingeniería. *El hombre y la máquina*(44), 5–6.
- Billmeyer, F. (2004). *Ciencia de los polímeros*. Editorial Reverté S. A.
- Bird. (2021). *Conformado de polímeros*. [Disponible en: <https://creatup.net/conformado-polimeros/> Accedido el: 9 de enero del 2023].
- Bonaglia, F., Goldstein, A., y Mathews, J. A. (2007). Accelerated internationalization by emerging markets' multinationals: The case of the white goods sector. *Journal of world business*, 42(4), 369–383.
- Bricoplástico. (2023a). *Poliestireno cristal*. [Disponible en: <http://www.bricoplastico.com/2014-02-16-15-24-00/poliestireno-cristal>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Bricoplástico. (2023b). *Polipropileno: Qué es y sus propiedades*. [Disponible en: <https://plasticosascaso.es/polipropileno-que-es-propiedades/>; Accedido el: 27 de marzo del 2023].
- Cleary, P. W. (2004). Large scale industrial dem modelling. *Engineering Computations*, 21(2/3/4), 169–204.
- Danosa. (2023). *Poliestireno extruido (xps)*. [Disponible en: <https://www.google.com/search?q=poliestireno+extruido>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].

- El Telégrafo. (2017). *El telégrafo—la producción de línea blanca creció un 72% en cinco años*. [Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/1/la-produccion-de-linea-blanca-crecio-un-72-en-cinco-anos>; Accedido el: 3/10/2022].
- Embalajes Terra. (2023). *Poliestireno expandido*. [Disponible en: <https://www.embalajesterra.com/blog/poliestireno-expandido-mercancias/>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Espinoza, E. (2017). *Termoformado de geometrías complejas*. [Disponible en: http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/18751/TERMOFORMADO%20DE%20GEOMETRIAS%20COMPLEJAS_ERIK.pdf?sequence=1; Accedido el: 12/12/2022].
- Espinoza, E. (2018). *Termoformado de geometrías complejas*. Tesis de Máster.
- Farah, A., Mazharul, I., Franjo, J., Joel, G., David, w., y Farid, A. (2018). *Study of mesh quality improvement for cfd analysis of an airfoil*. IIUM Engineering Journal V.19; N.2; Pág. 203-212.
- Frankland, J. (2021). *Extrusión: entender el efecto de la viscosidad del polímero en la temperatura de fusión*. [Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/columnas/extrusion-entender-el-efecto-de-la-viscosidad-del-polimero-en-la-temperatura-de-fusion>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Gam Bit. (2023). *Simulazione del processo di termoformatura*. [Disponible en: <https://www.gambit.it/prodotti/software-di-simulazione/accuform/21-t-sim>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- García, F., y Salgado, D. (2021). *Maintenance strategies for industrial multi-stage machines: The study of a thermoforming machine. sensors, 21(20), 6809*. [Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s21206809>; Accedido el: 3/10/2022].
- García, J. (2018). *Viscoelasticidad no lineal*. [Disponible en: <https://es.scribd.com/document/381867513/Viscoelasticidad-No-Lineal>; Accedido el: 12/12/2022].
- Gfk Growth from Knowledge. (2019). *Tres tendencias que dan forma al mercado global de grandes electrodomésticos*. [Disponible en: <https://www.gfk.com/es/prensa/tres-tendencias-que-dan-forma-al-mercado-global-de-grandes-electrodomesticos>; Accedido el: 3/10/2022].
- Google Maps. (2023). *Ubicación de la universidad politécnica salesiana sede cuenca*. [Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Politecnica+Salesiana+del+Ecuador/>; Accedido el: 27 de marzo del 2023].
- Grassi, V., Madalena, M., y Dal, M. (2001). *Aspectos morfológicos y relación estructura-propiedades del poliestireno de alto impacto*. *Polímeros* 11 (3), Set 2001, <https://doi.org/10.1590/S0104-14282001000300016>.
- Grau, E., y Santacreu, E. (2018). *Análisis aerodinámico de las principales configuraciones de parte trasera de un vehículo convencional*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Groover, M. (2010). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mc Graw Hill.
- Hoffmann, G., Wienke, A., Reitberger, J., Franke, S., Kaielerle, y Overmeyer, L. (2020). *Thermoforming of planar polymer optical waveguides for integrated optics in smart packaging materials. journal of materials processing technology, 285*. [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116763>; Accedido el: 3/10/2022].

- Induform. (2023). *Termoformado*. [Disponible en: <http://induform.com/termoformado/>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Joya, D. (2006). *Optimización del proceso de termoformado en polipropileno para envases*. [Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9152/u271376.pdf?sequence=1&isAllowed=y>; Accedido el: 14/12/2022].
- Jurado, I. (2021). *Análisis mediante elementos finitos 3d de los efectos de las propiedades del substrato rocoso en la cimentación de turbinas eólicas*. Universidad de Cantabria.
- Martínez, L., Moya, F., Correa, J., y Salazar, F. (2023). *Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa miviltech soluciones industriales s.a.*
- Mejía, H., y Galofre, M. (2008). *Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos*. Prospectiva Vol. 6, No. 2.
- Miranda, L., y Sacasari, A. (2023). *Diseño de una máquina termoformadora para la elaboración de piezas plásticas*. [Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24355>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Morales, R., y Candal, M. (2006). *Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas cad/caedesign and manufacturing of thermoforming mold by use of cad/cae tools*. Rev. Fac. Ing. UCV, Caracas, V. 21, N.1, Págn. 83-99, marzo 2006. [Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000100009&lng=es&nr=1; Accedido el: 30 marzo del 2023].
- Mordor Intelligence. (2022). *Mercado principal de electrodomésticos: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2022 - 2027)*. [Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-major-home-appliances-market>; Accedido el: 21 de noviembre del 2022].
- Moreno, J., Ocampo, J., y Giraldo, L. (2007). *Simulación de una celda calorimétrica mediante elementos finitos*. Información Tecnológica V.18; N.2; Pág. 25-35.
- Narváez, F. (2017). *Simulación numérica de flujo de aire y transferencia de calor en un enfriador vertical con puerta panorámica*. [Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14662>; Accedido el: 3/10/2022].
- Navarro, J. (2019). *Modelos matemáticos para ciencias experimentales*. Díaz de Santos.
- Ondas y partículas. (2023). *Cómo funciona un refrigerador*. [Disponible en: <https://ondasypartículas.com/2019/08/01/como-funciona-un-refrigerador/>; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Panaplast. (2023). *LÁmina de poliestireno alto impacto*. [Disponible en: <https://panaplast.net/producto/lam-poliestireno/>; Accedido el: 8 de marzo del 2023].
- Perez, C., y Ortíz, J. (2018). *Caracterización de las partes termoformadas y su incidencia en las propiedades mecánicas para la fabricación de guardachoques con polipropileno de alto impacto en la empresa carroceras construcciones mecánicas albán en la ciudad de latacunga*. [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116763>; Accedido el: 3/10/2022].
- Plásticos Ascaso. (2023). *Poliestireno*. [Disponible en: <https://plasticosascaso.es/que-es-el-poliestireno/>; Accedido el: 9 de enero del 2023].
- Pérez, V., y Chavarro, B. (2022). *Diseño y construcción de una máquina de termoformado*. [Disponible en: <https://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/1976/1/Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20una%20m%C3%>

- A1quina%20de%20termoformado.pdf;Accedido el: 3/10/2022].
- Raimond, B., y Charles, E. (1995). *Química de los polímeros*. Editorial Reverté S. A.
- Reynoso, S. (2019). *Los polímeros plásticos*. Segunda Edición. ISBN: 9798787809695.
- Satya. (2016). *Capability and application of ansys*. [Disponible en: <http://ansys-satya.blogspot.com/2016/12/orthogonal-quality.html>; Accedido el: 22 de abril del 2023].
- Schäfer, M. (2006). *Computational engineering: Introduction to numerical methods* (Vol. 321). Springer.
- Somos industria. (2018). *Electrodomésticos: Sector en crecimiento | somos industria*. [Disponible en: <https://www.somosindustria.com/articulo/electrodomesticos-sector-en-crecimiento/>; Accedido el: 3/10/2022].
- Stamopoulos, A., y Di, I. (2021). *Numerical and experimental analysis of the thermoforming process parameters of semi-spherical glass fibre thermoplastic parts*. *procedia cirp*, 99, 420-425. [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.060>; Accedido el: 3/10/2022].
- Syed, W. (2022). *Structural analysis with ansys workbench*. [Disponible en: <https://featips.com/>; Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Thomas, P. J. (1999). *Simulation of industrial processes for control engineers*. Elsevier.
- Torres, P., y Naidiuk, O. (2018). *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante ansys*. [Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17052>; Accedido el: 3/10/2022].
- Van, M., Desplentere, F., Van, B., y Ivens, J. (2015). *Improvements in thermoforming simulation by use of 3d digital image correlation*. *express polymer letters*, 9(2), 119-128. [Disponible en: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2015.130>; Accedido el: 3/10/2022].
- Vegas, L. (2020). *Modelación en cfd de la transferencia de calor y comportamiento dinámico del aire en un secador solar de chimenea*. Universidad de Piura.
- Vehi, J. (2016). *Mallado de geometrías complejas mediante cfd*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Wikipedia. (2019). *Poliestireno de alto impacto*. [Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poliestireno_de_alto_impacto&oldid=120665511; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Wikipedia. (2021). *Poliestireno extruido*. [Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poliestireno_extruido&oldid=139373821; Accedido el: 28 de marzo del 2023].
- Wikipedia. (2022a). *Nomenclatura iupac - wikipedia, la enciclopedia libre*. [Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Nomenclatura_IUPAC&oldid=147634579 Accedido el: 9 de enero del 2023].
- Wikipedia. (2022b). *Poliestireno - wikipedia, la enciclopedia libre*. [Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poliestireno&oldid=147939407> Accedido el: 9 de enero del 2023].
- Wikipedia. (2023). *Asimetría. la enciclopedia libre*. [Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=simetr%C3%ADa&oldid=149550619>; Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Xie, F., Halley, P. J., y Avérous, L. (2012). Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials. *Progress in*

Polymer Science, 37(4), 595–623.

- Zhang, L., Scarpa, F., Barton, D., Rankin, K., Zhu, Y., Lang, Z., y Peng, H. (2021). *Topological characteristics and mechanical properties of uniaxially thermoformed auxetic foam. materials and design*, 211. [Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110139>; Accedido el: 3/10/2022].
- ÖzdemiR, A., Subaşı, M., y Karataş, C. (2020). *Investigating the effects of forming parameters on molding force and springback in deep drawing process of thermo-plastic composite laminates. gazi university journal of science*. [Disponible en: <https://doi.org/10.35378/gujs.765095>; Accedido el: 3/10/2022].

ANEXOS

Anexo A: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: Americas).

Información del producto

STYRON A-TECH® 1175

América Central y América del Sur



Poliestireno de Alto Impacto

Características del Producto

Permite reducción de espesores
Facilidad de procesamiento en extrusión y termoformado.
ESCR a sustancias alimenticias e hidrocarburos
Excelente comportamiento en termoformado
Clasificación UL 94 HB⁽²⁾

Aplicaciones Típicas

Electrodomésticos / interiores en refrigeradores
Aplicaciones generales de extrusión y termoformado donde se requiera ESCR

Propiedades ⁽⁴⁾	Sistema Inglés		Sistema Internacional		Método ASTM Valor
	Valor	Unidades	Valor	Unidades	
Propiedades Físicas					
Índice de Fluidéz (200°C/5 Kg)	2.8	g/10 min	2.8	g/10 min	D-1238
Gravedad Específica	1.03		1.03		D-792
Expansión Térmica Lineal (10-5)	5	pulg/pulg/°F	9	cm/cm/°C	D-696
Dureza Hardness – R/L/M					
Contracción en el molde (10 ⁻³)	4 to 8	in./in.	4 to 8	cm/cm	D-955
Propiedades Moldeo por Inyección					
Propiedades Mecánicas					
Resistencia a la Tensión	2050	psi	14	MPa	D-638
Resistencia Final a la Tensión	3350	psi	23	MPa	D-638
Elongación	65	%	65	%	D-638
Módulo de Tensión	200,000	psi	1380	MPa	D-638
Resistencia a la Flexión	3900	psi	27	MPa	D-790
Módulo de Flexión	196,000	psi	1350	MPa	D-790
Impacto IZOD @ 23°C	1.8	pie-lb/pulg	95	J/m	D-256
Propiedades Térmicas					
Temperatura de Deflexión Bajo Carga					
@ 264 psi	168	°F	75.5	°C	D-648
@ 66 psi	186	°F	85.5	°C	D-648
Temperatura de Ablandamiento, VICAT	211	°F	99	°C	D-648

1. Para aplicaciones que entran en contacto con los alimentos y utilizada sin modificaciones, este resina cumple con la Regulación relativa a los Aditivos para los Alimentos 21 CFR 177.1640 de acuerdo a US Food, Drug, and Cosmetic Act, así enmendada. Los usos mencionados anteriormente están sujetos a las buenas prácticas de fabricación y a cualquier limitación que sea parte de las regulaciones. Estas últimas deben consultarse para obtener mayores detalles.

2. www.Ul.com/archivo_E328905

3. Americas Styrenics no venderá ni enviará muestras de ningún producto o servicio ("Producto") para ninguna aplicación comercial o en desarrollo, en caso de tener conocimiento de que ésta se destina a:

- contacto permanente (a largo plazo) con fluidos corporales humanos o tejidos corporales. Se considera largo plazo cuando el uso exceda 72 horas continuas;
- uso en dispositivos para prótesis cardiacas independientemente del tiempo de uso involucrado (los dispositivos para prótesis cardiacas incluyen, pero no se limitan a, dispositivos y dispositivos y sondas para marcapasos, corazonas artificiales, válvulas cardiacas, bombas intra-arteriales y sistemas de control y dispositivos de bypass ventricular asistido; o
- como componente crítico de cualquier aparato médico que sostenga y mantenga la vida humana; o
- en cualquier aplicación que se haya diseñado especialmente para promover o interferir con la reproducción humana.

Adicionalmente, todos los productos que pretendan usarse en aplicaciones farmacéuticas deben cumplir con las Guías de Responsabilidad Farmacéutica (Pharmaceutical Liability Guidelines) vigentes.

4. Propiedades típicas. No utilizar como especificación.

STYRON A-TECH® marca registrada de Styron, LLC.

Anexo B: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: Americas).

Condiciones típicas de procesamiento

Moldeo por inyección

Parámetros típicos de máquinas de moldeo						
Zona	Sistema Internacional			Sistema Inglés		
Boguila	213	-	243	°C	415 - 470	°F
Zona #1	218	-	249	°C	425 - 480	°F
Zona #2	218	-	249	°C	425 - 480	°F
Zona #3	199	-	213	°C	390 - 415	°F
Contra Presión	2	-	12	bar	25 - 175	psi

Temperaturas de Moldeo

Altas temperaturas producen más brillo y minimizan las marcas y las líneas de unión. La orientación también se reduce, mejorando las propiedades de la pieza. Sin embargo, altas temperaturas de moldeo pueden requerir ciclos más largos para estabilizar el polímero. Bajas temperaturas de moldeo son usadas para ciclos más cortos. Partes con poco brillo, tienen pocas líneas de unión y un alto nivel de stress por moldeo. Las temperaturas recomendadas para moldeo de poliestireno varían en el rango 60° a 150° F. Use la temperatura más alta posible donde quiera mantener el tiempo de ciclo deseado.

Alimentación

El Control de alimentación debería ser ajustado igual al peso deseado de adición. Una regla general para partes moldeadas con una mínima cantidad de stress interno y libres de marcas de hundimiento es ajustar la alimentación para mantener el pistón libre de deterioro. La alimentación debería ser ajustada para dar una tolerancia de 1/4 pulgada. Una tolerancia mayor debería ser usada solo si el material contiene humedad, aire o excesivo contenido volátil que se ve como marcas negras o plateadas en la parte moldeada.

Rata de llenado

Ratas de llenado más altas generalmente dan una mejor uniformidad en el tamaño y la calidad de las piezas. Ratas de llenado rápidas son posibles si los tamaños de las compuertas y ubicaciones son seleccionados correctamente. Compuertas muy pequeñas para un espesor de pieza particular pueden causar problemas cuando son llenadas a alta velocidad. Use la velocidad de llenado más alta que el diseño del molde y la pieza puedan tolerar entendiendo que no todas las aplicaciones toleran una alta velocidad de llenado. Secciones pesadas de algunas piezas requieren una velocidad de llenado lenta para evitar fugas y marcas de líneas de unión en la superficie de las partes.

Retroseso del husillo

El tiempo de retroseso del husillo debería ser controlado para prevenir que el polímero fluya dentro o fuera de la cavidad. El tiempo de retroseso del husillo es una función de la temperatura del material y el moldeo, espesor de la pieza, tamaño de la compuerta y el canal. Si disminuye el tiempo de retroseso del husillo incrementa la contracción de las partes. Se deben hacer ajustes en el tiempo de retroseso del husillo para minimizar la contracción y las marcas de hendiduras. Tiempo excesivo de retroseso puede sobrepresionar el sistema de canales generando problemas de pegado del material.

Extrusión

Parámetros típicos de extrusoras						
Zona	Sistema Internacional			Sistema Inglés		
Zona # 1	177	-	193	°C	350 - 380	°F
Zona # 2	182	-	204	°C	360 - 400	°F
Zona # 3	188	-	210	°C	370 - 410	°F
Zona # 4	199	-	216	°C	390 - 420	°F
Zona # 5	204	-	221	°C	400 - 430	°F
Zona # 6	204	-	221	°C	400 - 430	°F
Bombas, Adaptador, Tuberías	193	-	232	°C	380 - 450	°F
Dado	199	-	232	°C	390 - 450	°F
Rodillos pulidores	66	-	104	°C	150 - 220	°F
Temperatura de fusión	193	-	232	°C	380 - 450	°F
Presión	10	-	21	MPa	1500 - 3000	psi

Condiciones de Extrusión

Una temperatura más baja dentro del rango típico de temperatura denota el uso del material con una mezcla de copolímero de estireno - butadieno con impacto modificado tipo block. El diseño del tornillo con una cámara de mezclada y una relación de compresión de aproximadamente 4:1 ó dispositivo de mezcla estática, son recomendados para una adecuada dispersión usando colorantes u otros aditivos. El dado extrusor debería ser ajustado entre un 110-150% del espesor de lámina requerido. El primer espacio del rodillo pulidor debería ser ajustado aproximadamente a un 95% del espesor de hoja final mientras que el espacio del segundo rodillo pulidor puede ser ajustado mayor o igual al 100% del espesor de hoja dependiendo de la superficie con la que deba salir la lámina usando el último rodillo. Para todos los productos de Poliestireno excepto OPS, la orientación de la hoja no debería exceder el 30%. La fragilidad y resistencia al desgarramiento de la lámina, especialmente en la dirección de la máquina, es dramáticamente deteriorada a niveles de orientación mayores a 30%. Las temperaturas recomendadas son solo rangos típicos.

Acompañamiento de producto: Americas Styrenics está comprometido con el acompañamiento y recomienda a todos los usuarios de sus productos tomar las acciones necesarias para proteger la salud de los empleados, la salud del público y nuestro medio ambiente durante el uso de sus productos. Un acompañamiento extenso es responsabilidad de cada uno de los individuos que están involucrados con productos de Americas Styrenics - Desde su concepto inicial e investigación, manufactura, distribución, uso y disposición de los productos.

Aviso para clientes: Antes de usar este producto, el usuario es acompañado para realizar una evaluación de la seguridad y la selección correcta del producto para el uso específico en cuestión sin tener en cuenta la información que aparece en este documento.

Americas Styrenics no afirma que sus productos sean aptos para aplicaciones médicas específicas. Solicitamos que cada cliente que considere el uso de productos de Americas Styrenics en aplicaciones médicas notifiquen a Americas Styrenics de tal forma que pueda ser realizado la evaluación requerida. Es la responsabilidad final del cliente asegurar que el producto es seguro, legal, y técnicamente apropiado para la aplicación específica del usuario.

Descargo de responsabilidad: Americas Styrenics LLC no otorga garantías y asimismo se libera de cualquier tipo de responsabilidad, incluyendo garantías por distribución e idoneidad del producto para un uso particular, sin tener en cuenta cualquier afirmación obtenida a partir de cualquier uso o comercialización, o de cualquier clase de manipulación en relación al uso de la información contenida en este documento o del producto como tal ya sea de forma oral o escrita, explícita o implícitamente. El usuario expresamente asume todos los riesgos y responsabilidad, ya sea derivado de un contrato, responsabilidad civil extracontractual o cualquier conexión con el uso de la información contenida en este documento o del producto como tal. Adicionalmente, la información contenida en este documento está revelada sin tener en cuenta ningún asunto de propiedad intelectual, así como a leyes locales o nacionales, que pueden ser aplicables. Todas preguntas y asuntos deberán ser investigados directamente por los usuarios.

Para información Adicional Contáctanos: En Colombia: 01 8000 41 00 15 o En Otros Países: +57 (5) 672 36 63

Anexo C: Hoja técnica del material de termoformado (Proveedor: China).



上海祺申塑业股份有限公司
SHANGHAI QISHEN PLASTIC INDUSTRY CO., LTD

NO.1338, FengLiang Road, Shanghai 201411, China

HIPS H0309

Physical Properties	Metric	Comments
Specific Gravity	1.04 g/cc	ASTM D792
Linear Mold Shrinkage	0.0040 - 0.0080 cm/cm	ASTM D955
Melt Flow	2.8 g/10 min @Load 5.00 kg. Temperature 200 °C	ASTM D1238
Mechanical Properties	Metric	Comments
Hardness, Rockwell L	103	ASTM D785
Tensile Strength	27 MPa	ASTM D638
Elongation at Break	45.00%	ASTM D638
Tensile Modulus	1.75 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	35 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	1.85 GPa	ASTM D790
Izod Impact, Notched	0.208 J/cm	ASTM D256
Thermal Properties	Metric	Comments
CTE, linear	90.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	ASTM D696
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66	88.3 °C	ASTM D648
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264	78.9 °C	ASTM D648
Vicat Softening Point	101 °C	ASTM D1525

Anexo D: Dimensiones del Gabinete modelo RI-480.

