



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

“SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA  
EL MOLDEO DE PREFORMAS DE PET”

### TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
“INGENIERO QUÍMICO”

PRESENTA:

DIEGO ARMANDO ALMAZÁN RAMÍREZ.

ASESOR DE TESINA:

DR. ARMANDO RAMÍREZ SERRANO.

ASESOR ADJUNTO:

DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO.

TOLUCA, MÉXICO, NOVIEMBRE 2018

## DEDICATORIAS

A mi madre por brindarme todo el apoyo para salir adelante y darme la oportunidad de cumplir una de mis más grandes metas y por creer en mí.

A mi hermana y cuñado por todo el apoyo y por hacer de la casa un lugar agradable.

A mi abuela por cuidarnos y acompañarnos en cada momento.

A cada una de las personas que conocí en mi trayectoria profesional por la enseñanza y aliento.

A todos mis profesores, en especial a mis asesores por creer en mi trabajo y estar dispuestos a ayudarme a llevarlo a cabo.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	i
INTRODUCCIÓN .....	ii
<b>1. CARACTERÍSTICAS DEL TRABAJO</b>	
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Justificación .....	3
1.3. Objetivo general .....	4
1.4. Objetivos específicos .....	4
<b>2. GENERALIDADES DEL PET</b>	
2.1. Definición .....	6
2.2. Historia .....	6
2.3. Síntesis .....	7
2.4. Mecanismo de reacción .....	9
2.4.1. Esterificación .....	9
2.4.2. Poli condensación .....	11
2.4.3. Cristalización .....	12
2.4.4. Polimerización en estado sólido .....	12
2.5. Propiedades .....	13
2.5.1. Ventajas .....	13
2.5.2. Desventajas .....	14
2.6. Degradación .....	14
2.6.1. Degradación química .....	14
2.6.2. Biodegradación .....	15
2.7. Viscosidad intrínseca .....	16
2.8. Acetaldehído .....	16
2.9. Resinas .....	16
2.10. Temperatura de transición vítrea .....	17
2.11. Estados físicos .....	18
2.11.1. Estado Amorfo .....	18
2.11.2. Estado Cristalino .....	19
2.11.2.1. Modelo de micelas a franjas o con flecos .....	19
2.11.2.2. Modelo de cadenas plegadas .....	20
2.11.2.3. Cristalización esferulítica .....	22
2.11.2.4. Cristalización por inducción .....	23
2.11.3. Estado Biorientado .....	24

<b>3. PROCESO DE INYECCIÓN DE PREFORMAS DE PET</b>	
3.1. Proceso de secado de la resina.....	27
3.1.1. Descripción del proceso de secado .....	27
3.1.2. Consecuencias de un secado deficiente .....	30
3.2. Máquina de inyección .....	32
3.2.1. Unidad de cierre .....	32
3.2.2. Unidad de inyección .....	33
3.2.2.1. Extrusor o husillo .....	34
3.2.3. Unidad de control.....	35
3.2.4. Proceso de inyección de preformas de PET.....	36
<b>4. PROCESO DE MOLDEO POR ESTIRADO – SOPLADO (SBM)</b>	
4.1. Máquina de moldeo por estirado-soplado.....	39
4.1.1. Unidad de calentamiento. ....	40
4.1.1.1. Horno .....	40
4.1.1.2. Rampas de enfriamiento y ventilación ....	42
4.1.2. Unidad de soplado.....	43
4.1.2.1. Punto 0 y punto 10.....	43
4.1.2.2. Presoplado.....	44
4.1.2.3. Válvulas de flujo.....	46
4.1.2.4. Distribución de material .....	47
4.1.2.5. Crazing .....	48
4.1.3. Proceso de soplado .....	49
<b>5. TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA PREFORMA DE PET EN UN HORNO (SBM).</b>	
5.1. Transferencia de calor .....	51
5.1.1. Transferencia de calor por conducción .....	52
5.1.1.1. Conductividad térmica .....	52
5.1.2. Transferencia de calor por convección .....	53
5.1.2.1. Principios de convección .....	54
5.1.2.2. Capa límite térmica .....	55
5.1.2.3. Flujo a través de cilindros .....	57
5.1.3. Transferencia de calor por radiación .....	60
5.1.3.1. Leyes de radiación.....	61
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
6.1. Simulación de la transferencia de calor en la preforma 1 .....	65
6.1.1. Proceso de simulación de la preforma 1.....	68
6.1.2. Flujo de calor por convección en la preforma 1 .....	69
6.1.3. Flujo de calor por radiación en la preforma 1.....	70
6.1.4. Resultados de la simulación en la preforma 1 .....	70
6.2. Simulación de la transferencia de calor en la preforma 2 .....	72

6.2.1. Proceso de simulación de la preforma 2.....	73
6.2.2. Flujo de calor por convección en la preforma 2 .....	75
6.2.3. Flujo de calor por radiación en la preforma 2.....	75
6.2.4. Resultados de la simulación en la preforma 2 .....	76
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>83</b>



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue primeramente analizar las variables que pueden influir durante el termoconformado de botellas de PET durante el proceso de soplado en la industria embotelladora. Así mismo, se describe la naturaleza química y física del poli etilen tereftalato (PET), el mecanismo de inyección de preformas y la transformación final a botella. Se realizó una simulación para dos tipos de preformas utilizando el software comercial Comsol Multiphysics®, evaluando previamente cada una de las contribuciones de las formas de transferencia de calor. Se analizaron los perfiles de calentamiento en las paredes de la preforma en función del tiempo, destacando la importancia de los factores que determinan las características finales del producto para disminuir tiempos de procesamiento.

Los resultados obtenidos muestran que el incremento de la transferencia de calor por radiación disminuyó el tiempo en el que la preforma alcanza las condiciones necesarias para la generación del producto final. La elección de las dimensiones de la preforma mostrará si el proceso puede optimizarse y por ende incrementar la producción de las botellas con diferentes formas y estilos con la mejor calidad.

## INTRODUCCIÓN

La presente tesina realiza el análisis y evaluación del desempeño de la transferencia de calor sobre una preforma de PET (poli etilen-tereftalato) dentro de un horno, de acuerdo al proceso de moldeo por estirado – soplado (Stretch Blow Moulding), para la producción de botellas plásticas.

Cuando las paredes interna y externa de la preforma alcanzan la misma temperatura, el proceso de moldeo por estirado y soplado será más eficiente y reducirá la probabilidad de que las botellas tengan defectos de calidad como la cristalización. El tiempo de residencia en el horno tendrá que ser lo suficientemente corto para aumentar la producción.

El fundamento teórico en el que se basa el análisis de transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier), en sólidos junto con el proceso de convección forzada (Ley de Enfriamiento de Newton) y el de radiación (Ley de Stefan-Boltzmann). La convección juega un papel determinante en el proceso de calentamiento, en este sentido, se discutirá el método para determinar el coeficiente de transferencia de calor convectivo con base en las propiedades del flujo de aire y a la geometría de la preforma.

El estudio fue hecho sobre dos preformas de PET de tamaños distintos, la primera con un diámetro de 19.92mm, espesor de pared de 3.72mm y altura de 87.93mm, la segunda con un diámetro de 28.12mm, espesor de pared de 3.7mm y una altura de 134.49mm respectivamente.

Las preformas se encuentran a temperatura ambiente de 20°C antes de ingresar al horno de la máquina sopladora; se analizarán los tres mecanismos de transferencia de calor y se determinará la influencia de cada uno sobre el proceso general.

El Capítulo 1 se describe la problemática objetivo del estudio, la justificación del proyecto, el objetivo general y finalmente los objetivos específicos.

El Capítulo 2 aborda las generalidades del material utilizado (PET), desde su definición, algunas vías de síntesis, el papel que juegan propiedades como la

viscosidad intrínseca y la generación de acetaldehído dentro del proceso del moldeo de un envase y hacia qué productos finales puede ir destinado. Se define la diferencia entre tipos de resina PET y el efecto en el proceso, así como los estados físicos del material: cristalino en la resina, amorfo en la preforma y biorientación de la botella.

EL Capítulo 3 se refiere al proceso de inyección de una preforma de PET, que es la protagonista del estudio, desde la recepción de la resina, el proceso de secado, y la final inclusión a la máquina inyectora; además, se tratan algunos problemas comunes en la industria de calidad y operativos en esta fase.

El Capítulo 4 da continuidad al proceso global de la elaboración de la botella y muestra el moldeo por estirado–soplado que es uno de los métodos convencionales en la producción de envases. A lo largo de este capítulo se presenta la unidad de calentamiento en la cual se lleva a cabo el estudio.

Una vez que se conoce el proceso de moldeo y las secciones que participan en el objetivo del trabajo, el Capítulo 5 se presenta el sustento teórico del proceso de transferencia de calor por conducción, convección forzada y radiación, además de cómo obtener el coeficiente de transferencia de calor convectivo con base en las condiciones del flujo de aire. Los modelos de las dos preformas son esquematizados para simular la transferencia de calor mediante el software Comsol Multiphysics®, y de este modo, obtener los perfiles de calentamiento desde la pared externa hasta la interna en una preforma para un periodo determinado.

El Capítulo 6 presenta los resultados de la simulación de cada una de las preformas en cada uno de los tiempos de residencia, distribución de la temperatura y del flujo de calor.

Finalmente se presentan las conclusiones del estudio.

# **CAPÍTULO 1**

# **CARACTERÍSTICAS**

# **DEL TRABAJO**

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las regiones de México y Latinoamérica representan uno de los mercados más atractivos para la industria de refrescos, especialmente las bebidas carbonatadas; por lo tanto, la producción de botellas de PET en el menor tiempo y con calidad, representa un reto para los proveedores del envase.

El manejo adecuado de la preforma como materia prima, juega un papel fundamental para lograr el mayor número de botellas producidas con calidad evitando desperdicios o consumo excesivo de energía, lo cual representa una pérdida económica importante para la empresa.

Ante un cambio sustancial en el proceso de producción que ponga en riesgo la calidad del envase, el personal responsable debe de ser capaz de identificar la fuente de dicho cambio y corregirlo, la ingeniería química provee herramientas que ayudan al usuario a controlar el proceso y a actuar oportunamente ante un inconveniente.

La tecnología en el diseño de preformas se ha desarrollado en los últimos años con un enfoque ambiental, ya sea para reducir el peso de cada una de las botellas o la producción de las mismas con plásticos biodegradables y materiales reciclados.

La producción de una botella de alta calidad se basa en el buen manejo de la preforma durante el proceso de moldeo, específicamente la transferencia de calor determinará si el envase es funcional o presenta algún tipo de defecto por cristalización.

El software comercial Comsol Multiphysics® proporciona una herramienta versátil para realizar un estudio del fenómeno de transporte de calor en piezas sólidas con geometrías complejas y arrojar un panorama claro para una toma de decisiones efectiva.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Dentro de una planta embotelladora se encuentra una máquina que moldea, por el proceso de estirado-soplado, preformas de Poli etilen tereftalato con diseños distintos para, posteriormente, producir diferentes diseños de botellas.

La transferencia de calor a través de la pared de la preforma juega un papel determinante para lograr un producto de buena calidad; se busca idealmente que la pared externa e interna de las preformas alcancen la misma temperatura antes del estirado-soplado, superando la temperatura de transición vítrea (80°C). Conseguir que las dos paredes alcancen la misma temperatura podrá requerir tiempos relativamente largos, lo que resultará inconveniente para la industria productora de envases; para lograr un calentamiento eficiente y rápido, la máquina contiene lámparas que suministran la energía en arreglos que el usuario puede establecer.

Simular la transferencia de calor a través de la pared de la preforma durante su residencia en el horno de la máquina para cada uno de los diseños de la misma, permitirá al ingeniero conocer un panorama amplio del proceso desde el inicio en el cual pueda tomar decisiones para maximizar el número de piezas producidas con el menor tiempo posible y con la calidad deseada para lograr el cumplimiento de objetivos como minimizar costos, evitar contaminación, dar alternativas en el desarrollo, mostrar nuevos diseño de preformas y reducir peso en el PET modificando sus dimensiones.

### **1.3. OBJETIVO GENERAL**

Simular y evaluar la transferencia de calor en dos tipos de preforma de PET durante el proceso de moldeo para lograr un calentamiento homogéneo a través del material

### **1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la contribución de la conducción, la convección y la radiación en los sistemas de moldeo, con base en las condiciones y parámetros de operación actuales.
- Determinar los perfiles de temperatura de las paredes interna y externa de las preformas en función del tiempo, de acuerdo al tiempo de residencia operativo mediante una simulación en Comsol Multiphysics®
- Analizar las ventajas y desventajas del proceso de calentamiento bajo las condiciones actuales en cuanto a su calidad y producción se refiere.

# **CAPÍTULO 2**

# **GENERALIDADES**

# **DEL PET**

## 2.1 DEFINICIÓN

El tereftalato de polietileno, politereftalato de etileno, poli etilen tereftalato o polietileno tereftalato (más conocido por sus siglas en inglés PET, Polyethylene Terephthalate) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles.

## 2.2. HISTORIA

Fue creado en 1941 por los científicos Whinfield y Dickson, quienes en un inicio le dieron el uso exclusivo como polímero de fibras, en los tiempos de guerra, era de suma importancia buscar un sustituto del algodón para fabricar telas, ya que este material se exportaba desde Egipto [1].

Formalmente se inició el uso como fibra en 1946 y a la fecha el material se ha mantenido en la industria textil. Fue hasta 1952 cuando se integró a la fabricación de envases para alimentos, fue el material por excelencia para contenedores rígidos y su mayor éxito hacia 1971, fue sobre bebidas poco sensibles al oxígeno, como agua mineral y refrescos carbonatados. Desde principios del año 2000 se inició el uso para envasar cerveza [4].

Debido a sus propiedades resulta un material adecuado para envasar no solo productos de giro alimenticio, sino de algún otro tipo, como cosmético, limpieza, etc. Se trata de un material perteneciente a la familia de los poliésteres.

Es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante: extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado y lograr una mayor transparencia. La razón de su transparencia, al enfriarse rápidamente, consiste en que los cristales no alcanzan a desarrollarse completamente y su tamaño no interfiere (“scattering”) con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible, de acuerdo con la teoría cuántica [13].

## 2.3. SÍNTESIS

La obtención del polímero PET se lleva a cabo a través de un proceso de polimerización llamado poli condensación, en él parte de la molécula del monómero se pierde cuando pasa a ser parte del polímero. En este sentido, dos grupos funcionales se unen para formar un producto intermediario con la simultanea eliminación de una molécula pequeña, esta a su vez, debe ser eliminada del medio de reacción para que la polimerización se complete con normalidad. [13]

Para que la poli condensación se lleve a cabo los dos compuestos deben de participar en la reacción, aunque existe la posibilidad de que algunos materiales sufran una auto condensación como la poliamida 6.

En el caso del PET, los materiales por excelencia que participan en su síntesis son el ácido tereftálico y el etilenglicol y como subproducto de la reacción el agua. Con anterioridad se utilizó con más frecuencia el dimetil tereftalato; sin embargo, el producto secundario es metanol, el cual resulta más costoso y peligroso de separar [13]

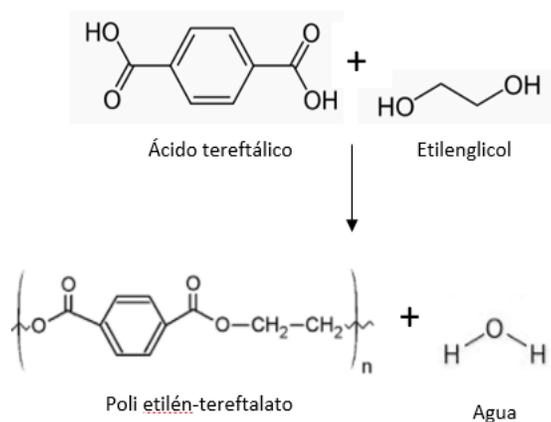


Figura 2.1. Síntesis de PET a partir de ácido tereftálico y etilenglicol

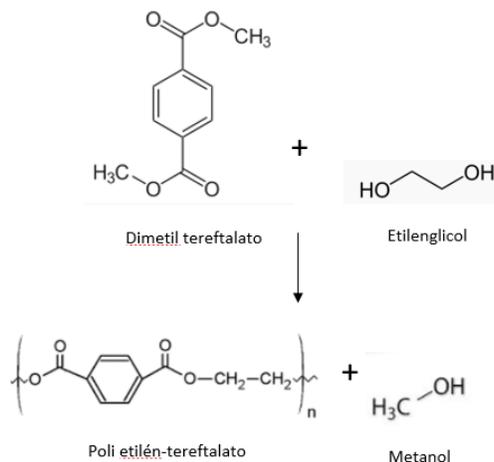


Figura 2.2. Síntesis de PET a partir de dimetil tereftalato y etilenglicol

Los polímeros resultantes de una reacción por condensación se denominan poli condensados, en este caso el PET. Debido a que se elimina una molécula, ya sea agua o metanol, algunos átomos del monómero no pasan a ser parte del polímero, entonces se dice que el producto está condensado respecto a su monómero, y el sub producto se denomina condensado.

En lo que a las materias primas respecta, el etilenglicol es un líquido incoloro. La primera etapa para su obtención es la síntesis del etileno, que posteriormente se oxida en presencia de catalizadores hasta obtener el óxido de etileno.

El óxido de etileno altamente reactivo es convertido en etilenglicol mediante la adición de agua, durante una reacción altamente exotérmica junto con la generación de dióxido de carbono. El etilenglicol debe ser lo más puro posible y libre de residuos de ácidos fuertes o bases para utilizarse la producción del PET.

El ácido tereftálico es un polvo blanco insoluble en agua. Su producción se realiza a partir del petróleo, donde la fracción de benceno, mediante diversas etapas de refinación, se convierte en para-xileno. Este se oxida en presencia de catalizadores hasta obtener ácido tereftálico crudo, que en etapas posteriores tendrá que ser debidamente purificado.

El ácido tereftálico puede ser fabricado a partir de diversas materias primas y a través de diferentes rutas de proceso. Las tecnologías existentes han sido desarrolladas en búsqueda de la opción de una producción más económica y funcional. Estas variantes en las rutas de obtención pueden consistir en:

- Oxidación directa del p-xileno.
- Hidrólisis del dimetil tereftalato.
- Oxidación del tolueno.
- Otros procesos, que continúan en su etapa de desarrollo sin haber superado la fase piloto, y que no han logrado llegar a su comercialización.

## 2.4. MECANISMO DE REACCIÓN

### 2.4.1. ESTERIFICACIÓN

Con anterioridad se mencionó que el PET se produce a través de una reacción de poli condensación y dependiendo de los sustratos se puede obtener como subproducto agua o metanol.

Partiendo de que la reacción se llevará a cabo con ácido tereftálico y etilenglicol; el paso inicial es la esterificación. La mezcla forma una pasta blanca, la cual es transferida a un sistema de reactores esterificadores, la reacción se lleva a cabo entre 260°C y 290°C, debido a la baja solubilidad del ácido en el etilenglicol.

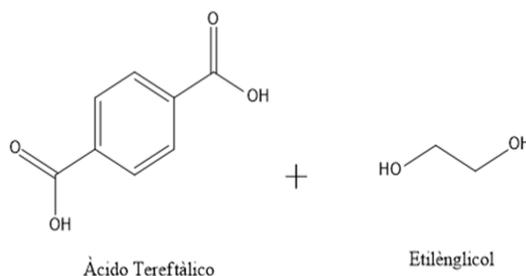


Figura 2.3. Materias primas en la síntesis del PET

La esterificación directa se puede llevar a cabo en ausencia de algún catalizador, ya que la reacción se basa en un equilibrio químico regulado por las

condiciones de reacción y de la remoción del agua residual, producto de la misma esterificación, que es destilada para lograr la reacción completa.

Industrialmente se utilizan compuestos de antimonio y titanio como catalizadores, ya que promueven una eficiencia del 90% en la formación del éster. Así, en ambos procesos, tanto en el que utiliza dimetil tereftalato como en el que se basa en ácido tereftálico se produce un monómero intermedio, el bis-hidroxi-etil tereftalato (**BHET**) [6].

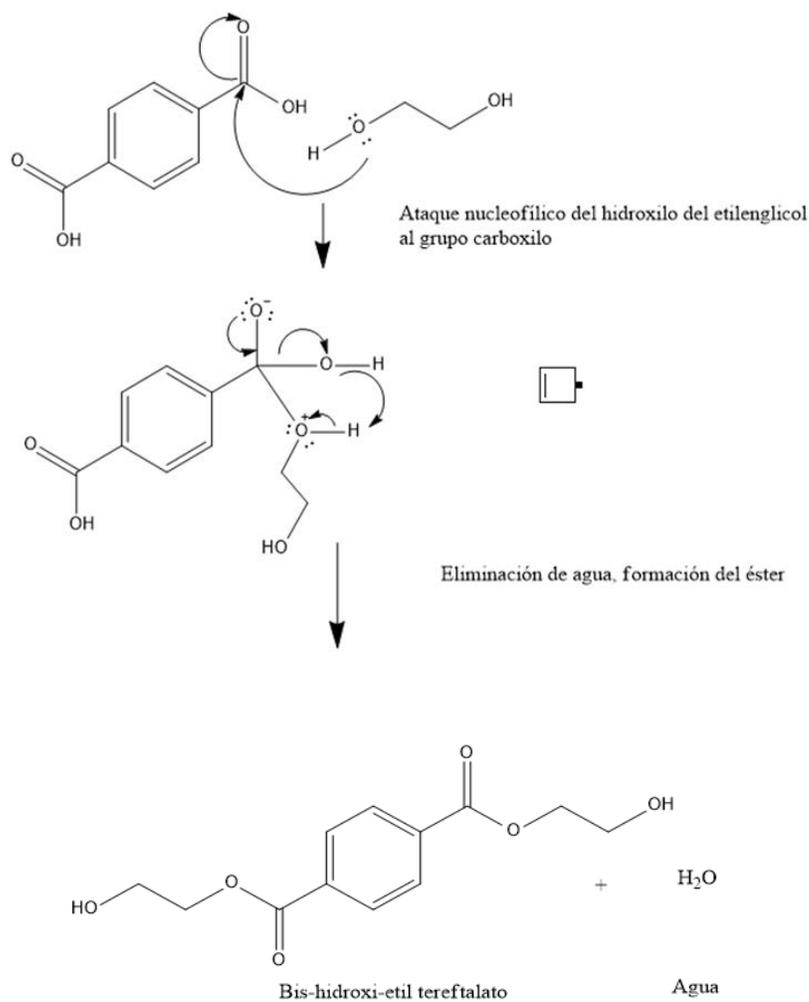


Figura 2.4. Mecanismo de reacción de la formación del intermediario Bis-hidroxi-etil tereftalato

## 2.4.2. POLICONDENSACIÓN

En esta reacción la cadena sufre un incremento de tamaño, el etilenglicol producido se retorna al primer reactor y el agua se condensa y se elimina del sistema. La extracción del glicol es favorecida por el vacío que se aplica en el sistema de reacción, este se recupera, se destila y vuelve al proceso de fabricación.

Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, registrada en un reómetro adecuado, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno en la autoclave. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación.

La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, en forma de spaghetti que, cayendo en una batea con agua se enfrían y consolidan. Los hilos que pasan por una cortadora, se reducen a gránulos, los cuales, tamizados y desempolvados se envían al almacenamiento.

El gránulo así obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad (0.55 a 0.65 dl/gr), o sea un bajo peso molecular; para volverlo apto para la producción de botellas serán necesarios otros dos pasos adicionales.

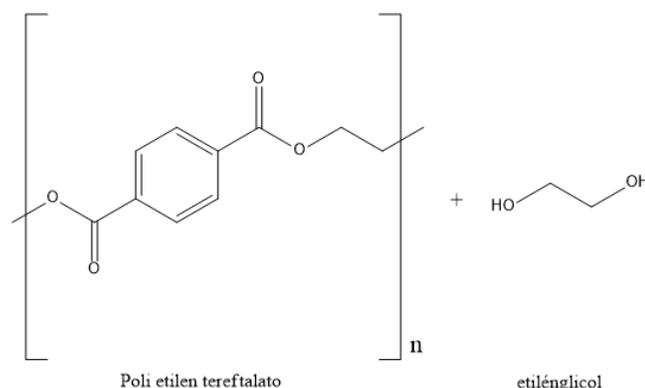


Figura 2.5. Productos de la reacción de poli condensación.

### **2.4.3. CRISTALIZACIÓN**

El objetivo de este proceso es cambiar la estructura del polímero del estado amorfo al cristalino, se distinguen entre si debido a que en el arreglo cristalino el material se torna blanco, lechoso y opaco. Más adelante se detallarán los estados físicos de los materiales termoplásticos.

El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico entre 130 y 160 °C, durante un tiempo que puede variar de 10 minutos hasta una hora, mientras el gránulo es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico. Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm<sup>3</sup> del amorfo a 1.4 del cristalino.

### **2.4.4. POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO**

Esta es una fase ulterior de polimerización del PET. El granulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior, durante tiempos muy largos, es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200°C).

Este tratamiento ceba una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes (0.72-0.86 dl/g) idóneos para la fabricación de la botella [5]. El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular.

Mientras se ligan las moléculas, es eliminado parte del acetaldehído que se forma en la primera polimerización. Un buen polímero tiene valores de acetaldehído inferiores a 1 ppm.

De estos reactores, se descarga PET de elevado porcentaje de cristalinidad (> 50) con viscosidad grado para Botella ("Bottle Grade").

## 2.5. PROPIEDADES

Sin lugar a duda el PET es el plástico por excelencia para contener un gran número de sustancias, aunque también puede ser usado para fibras o algunas otras aplicaciones. Por su naturaleza química posee limitaciones que hacen que no pueda ser usado con cierto tipo de materiales. A continuación, se enuncian algunas propiedades del material una vez transformado en botella.

### 2.5.1 VENTAJAS

- *Resistencia y rigidez elevadas.* - Una botella de PET puede ser muy ligera pero firme a la vez, esto ayuda a que puedan ser transportadas en gran número en trayectos muy largos sin temor a que se fracturen por el choque o movimiento brusco.
- *Elevada resistencia a la fluencia.* - Cuando un contenedor se deforma puede recuperarse su condición inicial en su totalidad.
- *Alta resistencia química y a la humedad.* - El material biorientado es resistente a cualquier otro compuesto de diversa naturaleza, es más sensible con los ácidos y las bases.
- *Transparentes o translúcidos.* - Aunque no todos los contenedores de PET deben ser translúcidos, esta propiedad brinda versatilidad en el mercado.
- *Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub>*
- *Compatible con otros materiales barrera.* - Mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- *Reciclable.* - aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.

### 2.5.2. DESVENTAJAS

- *Cambios dimensionales.* - El PET es higroscópico, la absorción de agua eventualmente modifica las dimensiones del contenedor.
- *Propenso a tornarse quebradizo a bajas temperaturas.*
- *Algunas variedades son degradadas por la luz ultravioleta.*
- *Ácidos y bases hidrolizan el polímero.*

## 2.6. DEGRADACIÓN

El PET es un material particularmente resistente a la biodegradación debido a su alta cristalinidad y a la naturaleza aromática de sus moléculas, por lo cual se le considera no biodegradable [10]. Puede ser degradado mediante un proceso químico por el cual se modifica su estructura molecular para reutilizar el material para un nuevo producto u obtención de combustibles [11].

Para realizar la degradación química del PET se deben tomar en cuenta primeramente las propiedades físicas y mecánicas del desecho de PET [12].

Según el tipo de degradación puede dividirse en 2 tipos, por agentes químicos o biodegradación.

### 2.6.1. DEGRADACIÓN QUÍMICA

- *Degradación por medio de fluido supercrítico.* Los disolventes son usados a temperaturas entre 583-643 K y presiones de 4-6 MPa.
- *Hidrólisis alcalina o ácida.* Soluciones ácidas o básicas degradan el material al romper las cadenas del poliéster, es la técnica más común para eliminar los desechos del plástico.
- *Termo-oxidación.* Depende en gran medida de la disponibilidad de oxígeno para que se pueda llevar a cabo este proceso, ya que, en presencia de

oxígeno, las reacciones de escisión de la cadena dominan sobre las reacciones de ampliación moleculares.

La termo-oxidación y la oxidación se lleva a cabo a un intervalo de temperaturas de 150-250°C, en estas condiciones se promueve la generación de radicales libres los cuales afectan directamente el peso molecular del polímero.

El proceso y los mecanismos de degradación a altas temperaturas difieren de los mecanismos que tienen lugar durante envejecimiento a largo plazo a temperaturas moderadas. Una temperatura más alta significa reacciones más rápidas y mayor cantidad de radicales libres.

A temperaturas de reacción más bajas, que son las reales durante la degradación ambiental. La degradación, así como los tiempos de reacción son mucho más largos, el número de radicales es más pequeño y el oxígeno tiene más tiempo para difundir a los sitios de reacción [10].

### 2.6.2. BIODEGRADACIÓN

Cuando se deja el plástico al ambiente, la luz ultravioleta le proporcionará la energía de activación necesaria para la incorporación del oxígeno a su estructura y posterior descomposición. Aunque el PET se considera un material no biodegradable por su alta cristalinidad y la naturaleza aromática de sus moléculas [10], con el paso del tiempo las moléculas serán lo suficientemente pequeñas para ser absorbidas por microorganismos.



Figura 2.6. Representación del efecto de la biodegradación

## **2.7. VISCOSIDAD INTRÍNSECA**

Es una medida indirecta del peso molecular del polímero o del grado de polimerización. Esta propiedad es de suma importancia al momento de moldear el plástico ya que un valor suficientemente bajo repercute directamente en la fortaleza del material, por ello, es fundamental conocer la viscosidad intrínseca del PET.

## **2.8. ACETALDEHIDO**

Durante el proceso de producción del PET, cantidades residuales de acetaldehído se conservan dentro de la estructura del polímero. El acetaldehído es un gas que se volatiliza con el paso del tiempo. Esta sustancia se incorpora al líquido que la contiene, en el caso de las bebidas el productor de las botellas debe cuidar la calidad del PET que se usa para su elaboración.

Esta es la razón principal de que una bebida contenida en una botella de PET y la misma contenida en vidrio se perciban con diferente sabor.

## **2.9. RESINAS**

En este sentido deben fabricarse resinas de PET de distinta viscosidad intrínseca ya que la cantidad de acetaldehído es proporcional a la cantidad de moléculas del polímero.

De este modo las botellas destinadas a agua natural o mineral deben producirse con una resina con viscosidad intrínseca más baja que una botella destinada a un producto con sabor carbonatado. Los valores de acetaldehído en una botella de agua deben mantenerse alrededor de las 4ppm mientras que para una bebida gaseosa alrededor de 15ppm.

Existen también otros tipos de resinas de PE; por ejemplo, las destinadas a bebidas isotónicas o que deben llenarse en caliente. También aquellas resinas que pueden ser biodegradadas más rápido debido a que en su síntesis, el etilenglicol es sustituido por productos similares a la celulosa.



Figura 2.7. Pellets cristalizados de resina PET

## 2.10. TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

Es un punto intermedio de temperaturas entre el estado rígido y el estado líquido del material, en realidad se trata de un pseudo estado termodinámico en el que el polímero se vuelve maleable [14], en el caso del PET el rango está entre los 70 a los 80°C. En esa temperatura el polímero disminuye su densidad, dureza, rigidez y el porcentaje de elongación disminuye de forma drástica.

Para el moldeo es necesario vencer este rango de temperaturas, por eso es que todas las preformas se calientan alrededor de los 100°C. Un exceso de temperatura promoverá la formación de cristales, por lo tanto, la consigna de la temperatura de la pared deberá establecerse tomando en cuenta el espesor de la preforma y la altura.

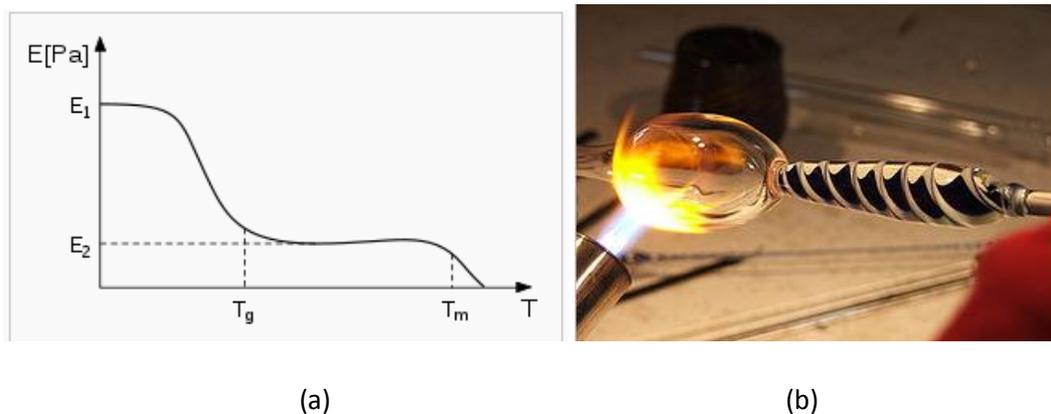


Figura 2.8. (a) Gráfico del comportamiento de la elongación respecto a la temperatura, (b) Técnica del vidrio soplado, el cual necesita cierta temperatura para poder moldearse.

## 2.11. ESTADOS FÍSICOS

El PET presenta tres estados físicos característicos, el cristalino, el amorfo y el biorientado. Existen teorías sobre la disposición molecular del estado cristalino en polímeros como el PET. La cristalización por inducción y la cristalización esferulítica son las responsables de los defectos más comunes en las botellas, los cuales son generados durante el proceso de moldeo por soplado. Para evitar presenten se necesita tener un proceso de calentamiento adecuado que es el fin del estudio.

### 2.11.1. ESTADO AMORFO

En este estado las cadenas poliméricas se encuentran sin algún orden específico asemejando espagueti, los núcleos no necesariamente se encuentran cercanos entre sí por lo tanto la luz puede atravesar el material y hacerlo traslúcido [15].

En general, estos polímeros presentan como púnica transición la temperatura de transición vítrea, ya que no existe realmente una fusión de cristales. Se considera que el estado sólido corresponde únicamente al de un líquido subenfriado, este es el estado en el que se encuentran las preformas. [14]

Generalmente la entropía de un polímero amorfo es mayor que la de uno similar cristalino, su densidad es mayor y no experimenta refuerzo en pruebas de tracción (estrés-elongación).

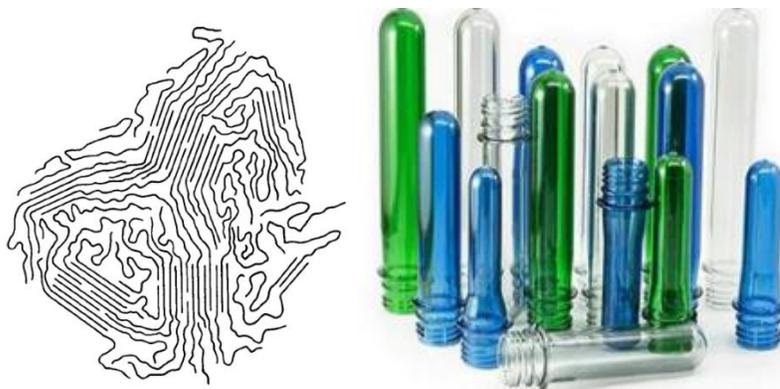


Figura 2.9. Representación del estado amorfo en cadenas y en preforma de PET.

### **2.11.2. ESTADO CRISTALINO.**

Mientras la cristalinidad en los metales y en las cerámicas implica disposición de átomos e iones, en los polímeros implica la ordenación de moléculas y, por lo tanto, la complejidad es mayor. Puede considerarse como el empaquetamiento de cadenas moleculares para producir una disposición atómica ordenada.

Las sustancias como el agua son completamente cristalinas en estado sólido y completamente amorfo en estado líquido, el PET, debido a su complejidad molecular y tamaño posee regiones cristalinas y regiones amorfas en su estructura.

Las zonas cristalinas son las responsables de la resistencia mecánica. Nunca es posible lograr un 100% de la estructura cristalina y habrá que definir el grado de la cristalización como la fracción del polímero que presenta estructura cristalina en relación al polímero total, aunque algunos polímeros muy regulares pueden presentar grados de cristalización del 90%, la mayoría no supera el 50%

. La densidad de un polímero cristalino es mayor a la de un material amorfo debido a que sus moléculas están más empaquetadas, la cristalización tiene un efecto útil para mejorar propiedades tales como la resistencia, la rigidez y la estabilidad dimensional.

#### **2.11.2.1. MODELO DE MICELAS A FRANJAS O CON FLECOS**

Existe un modelo que describe la cristalización dentro del polímero, el cual es llamado “modelo de micelas a franjas o con flecos”, es el más simple y consiste en una mezcla de regiones cristalizadas ordenadas unidas entre sí por cadenas poliméricas (cristales ordenados y regiones amorfas distribuidas aleatoriamente).

Estudios han demostrado que este modelo no es del todo correcto, excepto para polímeros de baja cristalinidad, como el PVC, el modelo es válido para materiales con un porcentaje de cristalización menor al 50%.

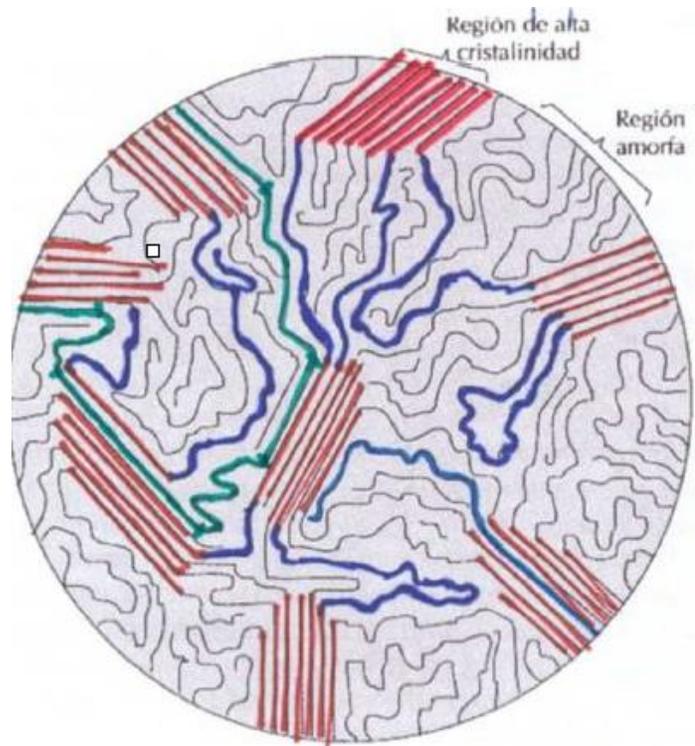


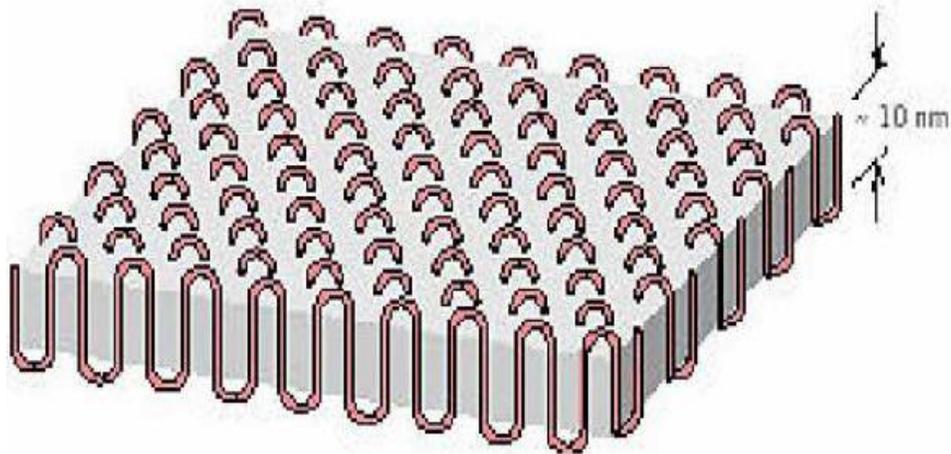
Figura 2.10. Modelo de micelas con flecos de un polímero semicristalino, mostrando las regiones cristalina y amorfa

#### 2.11.2.2. MODELO DE CADENAS PLEGADAS

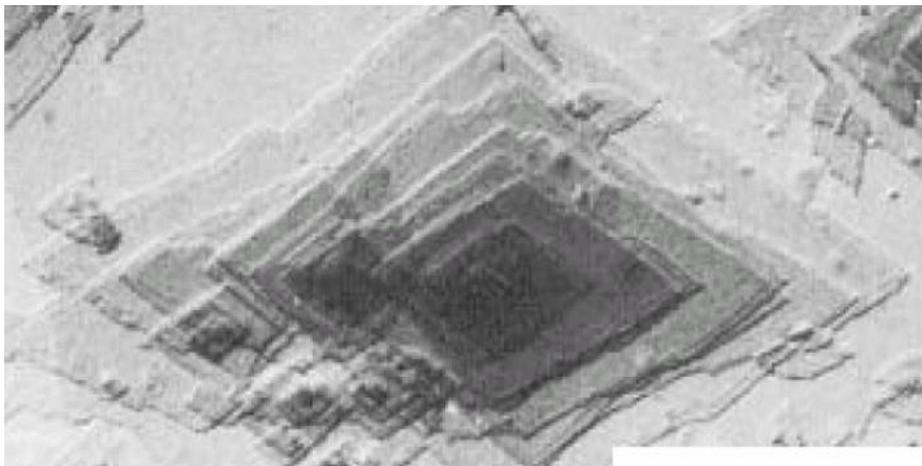
Este modelo es más reciente y muestra a los cristales como pequeñas láminas de las que sobresalen cadenas que están alineadas perpendicularmente, las láminas tienen un espesor de aproximadamente 10 o 20 nm.

Se teoriza que cada laminilla está formada por cadenas que se pliegan una y otra vez sobre sí mismas, que los dobleces de las cadenas se encuentran en las caras de la laminilla como lo muestra la figura 3.9.

Cada laminilla contendrá varias moléculas y la longitud media de las cadenas será muy superior al espesor de la laminilla. Las placas de cristal se pondrán una encima de otra como lo muestra la figura 3.10.



*Figura 2.11 Estructura de cadenas plegadas para una región cristalizada polimérica laminar.*



*Figura 2.12. Micrografía electrónica de un monocristal.*

El proceso de cristalización es el responsable de los efectos visuales no deseados en la producción de botellas de PET destinadas a bebidas, debido a que atentan contra la transparencia del envase. A continuación, se tratarán los defectos por cristalización.

### 2.11.2.3. CRISTALIZACIÓN ESFERULÍTICA

Las esferulitas consisten en un agregado de cristales en forma de esfera con cadenas plegadas de aproximadamente 10nm de espesor que parten de un núcleo central y que pueden tener un diámetro de hasta varios milímetros. La estructura detallada de la esferulita está esquematizada en la figura 3.11, donde se aprecia que los cristales están separados por material amorfo, por lo tanto, es probable que las láminas de cristales estén unidas de acuerdo a la teoría del modelo de micelas a franjas o con flecos. Así las cadenas comienzan en un cristal y se entrelazan a otro, este material de unión recibe el nombre de moléculas vínculo.

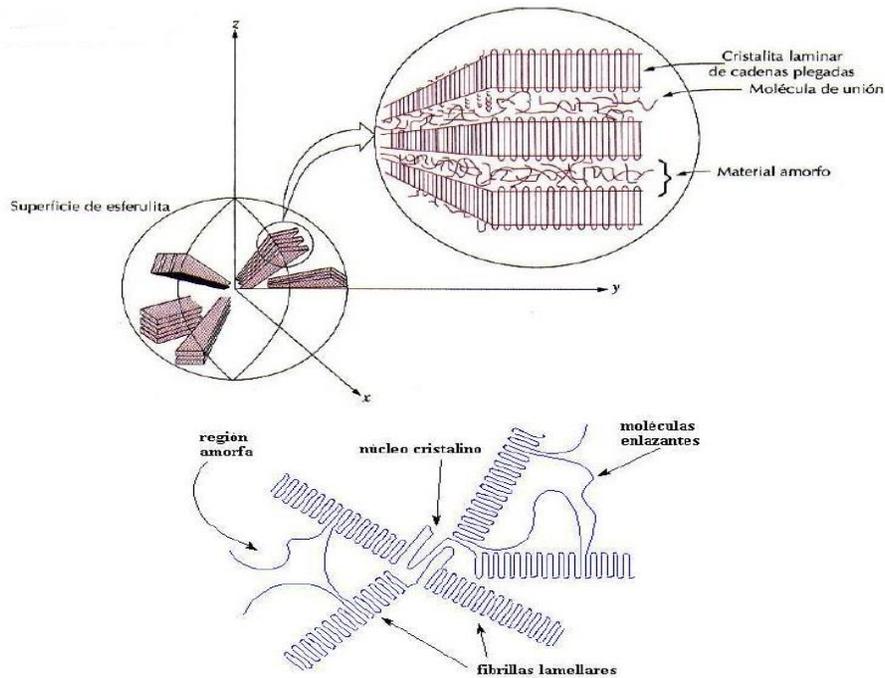
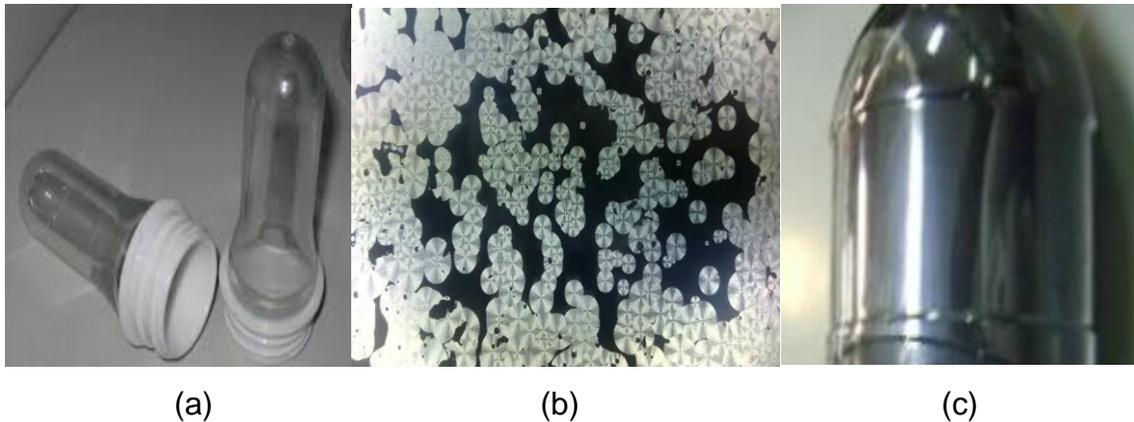


Figura 2.13. Representación detallada de una esferulita.

La cristalización se favorece en polímeros que no están ramificados, el PET al no ser completamente lineal, no es cristalino en su totalidad. La formación de esferulitas se relaciona con la temperatura, la solidificación del material fundido a baja temperatura da lugar a esferas de pequeño tamaño porque la velocidad de nucleación es alta y la de crecimiento baja. Recíprocamente, la solidificación a alta temperatura da lugar a esferas de gran tamaño porque la velocidad de nucleación es baja y con relación a la de crecimiento. En este sentido, si las paredes del envase

presentan un calentamiento excesivo, la cristalización esferulítica se presenta, se dice que la botella “se ha quemado” y el material se torna blanco - azulado debido a que los cristales interfieren con el paso de la luz.

La formación de las esferulitas no es conveniente para la producción de envases de bebida, debido a que la falta de transparencia podría confundirse con algún tipo de contaminación o líquido turbio. Además, una botella con cristalización esferulítica tendrá propiedades mecánicas distintas a una que no presente esta característica, por eso, es importante generar botellas, anticipándose a la formación de los cristales.



*Figura 2.14. (a) Preforma con la corona cristalizada, (b) Crecimiento de esferulitas, (c) Botella con el panel cristalizado por esferulitas.*

#### **2.11.2.4 CRISTALIZACIÓN POR INDUCCIÓN**

El otro tipo de cristalización corresponde al inducido, al contrario de la cristalización esferulítica, la inducida se produce cuando el material no tiene un buen calentamiento y es sometido a esfuerzos que promueven la formación de los cristales.

En el estado amorfo, las cadenas están dispuestas aleatoriamente, en el caso del PET, cuando se supera la temperatura de transición vítrea ( $\sim 80^{\circ}\text{C}$ ), las cadenas pueden moverse con relativa facilidad. Si existe un esfuerzo mecánico las cadenas

se acomodarán acercándose los núcleos por atracción electromagnética formando los cristales.

Este efecto es muy común y representa la mayor cantidad de merma durante la producción de botellas, para evitarlo debe existir un calentamiento eficiente. La cristalización por inducción recibe el nombre de “aperlamiento”, haciendo referencia al color que se observa.

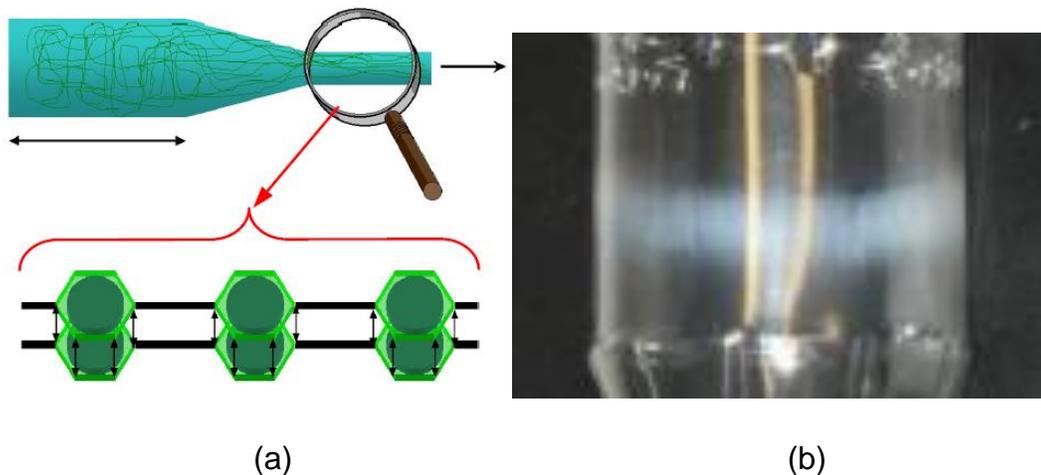


Figura 2.15. (a) Representación de la cristalización por inducción, (b) Botella con el panel cristalizado por inducción

### 2.11.3. ESTADO BIORIENTADO.

El material amorfo debe someterse a la temperatura de transición vítrea para poder moldearse, la preforma posteriormente sufre un estiramiento axial y radial para finalmente enfriarse, se dice entonces que el material se ha orientado en dos direcciones, esta propiedad le da mayor resistencia y barrera a los gases, se controla en base al espesor de pared del envase.

Entre otras propiedades que tiene este estado, se menciona la resistencia a las perforaciones, al agua e impermeables al vapor además de que brindan gran transparencia y brillo. Este es el estado en el que el PET se encuentra cuando se ha moldeado por alguna técnica.

En la figura 3.16 se muestra el proceso de biorientación de una preforma, en primera instancia la preforma se encuentra en estado amorfo, recibe un estirado axial al mismo tiempo que las cadenas se acomodan en un orden específico; después, en el proceso de soplado, el aire orientara las moléculas radialmente finalizando el proceso con un envase translúcido y resistente a debido al orden que adoptan las cadenas del polímero.

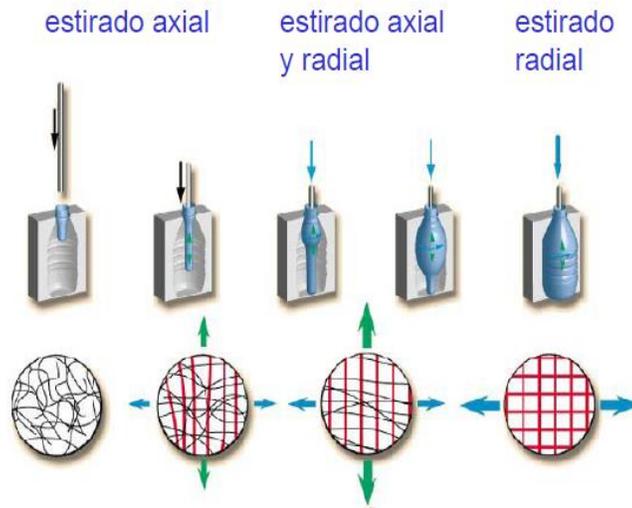


Figura 2.16. Proceso de biorientación de una preforma.

**CAPÍTULO 3**

**PROCESO DE**

**INYECCIÓN DE**

**PREFORMAS DE PET.**

### **3.1. PROCESO DE SECADO DE RESINA PET**

En el capítulo anterior se revisaron las propiedades y generalidades del PET, ahora se hablará del proceso para producir preformas, las cuales son el objeto de estudio del trabajo. Para ello, la resina de PET cristalizada deberá ingresar a una máquina de inyección.

Se discutió que la resina PET es altamente higroscópica y puede contener alrededor del 0.4% de su peso en humedad (4000 ppm); para evitar que el agua hidrolice las cadenas poliméricas y con esto la viscosidad intrínseca disminuya, el material deberá contener 40 ppm de agua como máximo. Es necesario que antes de ingresar a la máquina inyectora, la resina experimente un proceso de secado.

¿Por qué es importante secar la resina?, se mencionó que la hidrolización disminuye la viscosidad intrínseca del material. La resistencia de la pared del envase está relacionada con la cantidad de moléculas del polímero, si la viscosidad disminuye drásticamente, se promueve la cristalización en el proceso de inyección y de soplado.

Puesto que cada pellet de resina tendría que estar seco y caliente. El silo del secador está diseñado para que el flujo de aire sea uniforme en todas partes del mismo. Una buena forma de verificar la operación del secador es monitorear la cantidad de humedad en la resina seca y la temperatura de entrada en la zona de alimentación en la máquina.

#### **3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO.**

El secado con aire caliente se ha llevado a cabo desde hace tiempo y se usa actualmente para secar resina PET, las razones principales por las cuales este tipo de secado es tan popular son:

- Contacto eficiente de gas y sólido, permite unidades compactas y relativamente bajos costos de capital combinado con una relativa alta eficiencia térmica.
- El manejo de las partículas es bueno comparado con algunos otros tipos de secadores.
- La carencia de partes móviles, como la alimentación y descarga de material, hace que los costos de mantenimiento sean bajos.

Algunos materiales tienden a aglomerarse o simplemente no fluidizan, algunas técnicas optimizan el proceso implementando mecanismos de agitación o de vibración.

El calor es la fuerza que impulsa del secado, por encima de ciertas temperaturas, la fuerza que une las moléculas de agua con las cadenas poliméricas se reduce, permitiendo el libre movimiento para ayudar al proceso de secado.

El punto de rocío es el segundo parámetro fundamental para el secado de la resina PET, es la temperatura a la cual la humedad en el aire comienza a condensarse. La baja presión de vapor del aire seco que rodea el granulado hace, que las moléculas de humedad migren a la superficie del pellet.

El tiempo de secado es el tercer parámetro fundamental de secado. Los gránulos de plástico no se secan instantáneamente, debe de haber un tiempo suficiente para que las moléculas de agua se separen de la superficie del pellet o para que la humedad se evapore.

El cuarto parámetro fundamental es el flujo de aire. Para los materiales higroscópicos como el PET, se debe aplicar aire caliente mínimo al punto de rocío sobre el material para hacer que las moléculas de humedad se desconecten de las cadenas poliméricas y se desplacen hacia la superficie donde el flujo de aire seco arrastra el agua.

El secador consta de dos etapas, una de proceso y una de regeneración trabajando de manera independiente, cualquier variación en alguna de las fases aumentara la probabilidad de obtener productos de mala calidad.

La resina enviada a la tolva del secador donde se encuentra en constante agitación, en este punto se ventila aire a 180°C y con un punto de rocío de -40°C [7], el tiempo óptimo de secado es de 6 horas, por lo tanto, el ingreso de la resina debe estar en función del consumo de la máquina inyectora, esto corresponde a la fase de proceso de secado.

Durante la fase de regeneración, el aire que seca la resina se extrae de la tolva con 80°C y un punto de rocío de -20°C, este es ventilado a un intercambiador de calor que lo enfría a 40°C con un punto de rocío de -20°C, este aire contiene el agua extraída de la resina, por lo tanto, ingresa una cámara con material desecante, la cual retira la humedad y entrega aire seco a 40°C y un punto de rocío de -40°C.

Cuando el material desecante se satura una válvula de 4 vías dirige el flujo de aire a una segunda cámara con desecante seco, finalmente este aire es enviado a una caja de resistencias que le proveen energía para elevar su temperatura a 180°C y al punto de rocío inicial de -40°C. Este proceso se repite para retirar agua de la resina durante el tiempo de residencia establecido.

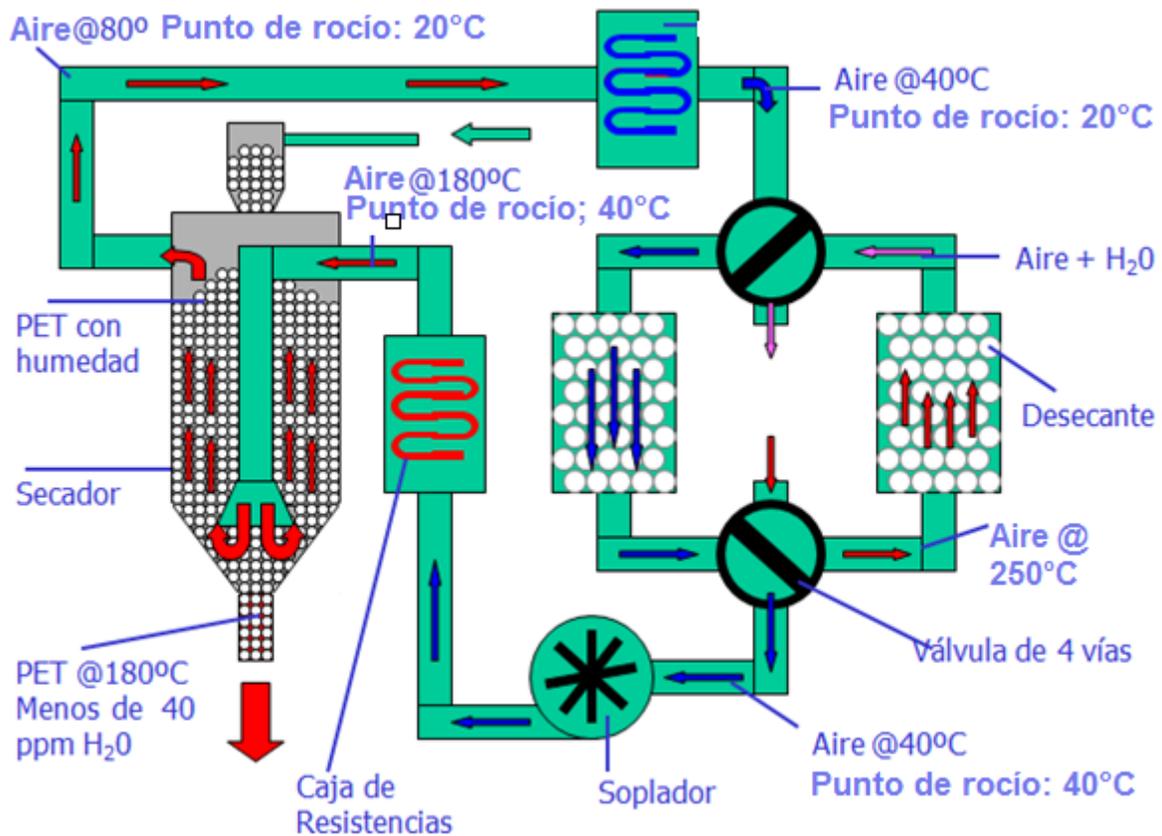


Figura 3.1. Diagrama del proceso de secado de resina PET.

### 3.1.2. CONSECUENCIAS DE UN SECADO DEFICIENTE.

El secado deficiente de la resina trae consigo problemas importantes al momento de procesarla mediante inyección, ya que el agua presente en sus moléculas promoverá la hidrólisis, caída de la viscosidad intrínseca y como resultado preformas de baja resistencia o cristalizadas, en general pueden existir defectos visibles o no visibles.

Entre los defectos visibles se encuentran:

- Cristalinidad en el cuerpo de la preforma.
- Cierre marcado (flash) debido a la baja viscosidad intrínseca.



(a) (b) (c)

*Figura 3.2. (a) Cristalinidad en el cuerpo, (b) Cierre marcado (flash), (c) Burbujas.*

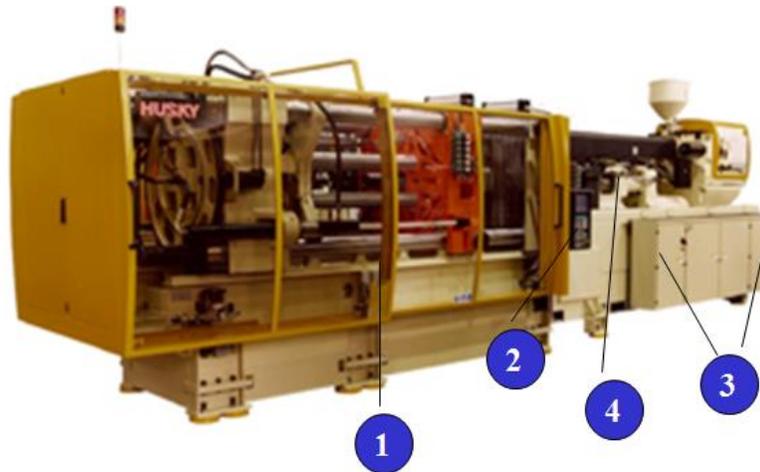
En lo que respecta a los defectos no visibles se encuentran:

- Reducción las propiedades mecánicas (flexión, torsión, elasticidad, etc.) debido a la caída de viscosidad intrínseca.
- Alta concentración de acetaldehído.

El extrusor de la máquina inyectora está diseñado para trabajar más eficientemente a una temperatura entre 160 y 175°C, si no alcanza la temperatura óptima de entrada se debe emplear mayor energía en el extrusor para fundir. Todo se ve reflejado en la calidad de la resina y el nivel de acetaldehído presente.

## 3.2. MÁQUINA DE INYECCIÓN

Una vez que la resina PET se encuentra con las condiciones de humedad óptimas, lo siguiente es procesarla en una máquina inyectora como la que se muestra en la figura 4.3.



- 1) Unidad de Cierre.
- 2) Interfase Hombre-Maquina (IHM).
- 3) Gabinete de Control Eléctrico.
- 4) Unidad de Inyección.

Figura 3.3. Máquina inyectora con sus partes.

En este capítulo se describirán las partes más importantes de la máquina inyectora y cómo es que intervienen para producir una preforma, la cual, es el objeto de este estudio.

### 3.2.1. UNIDAD DE CIERRE

Es una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre bastante grande que contrarresta la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa, que solo se encuentran en el planeta de forma natural únicamente en los puntos más profundos del océano.

Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material escapará por la unión del molde, causando así que la pieza final tenga defectos de rebabas. Es común utilizar

el área proyectada de una pieza (área que representa perpendicularmente a la unidad de cierre el total de la cavidad) para determinar la fuerza de cierre requerida, excluyendo posibles huecos o agujeros de la pieza.

En esta unidad se localizan dos platinas, una móvil y otra fija, la platina fija tiene perforaciones para alojar la nariz de inyección y la platina móvil se mueve para abrir y cerrar el molde.

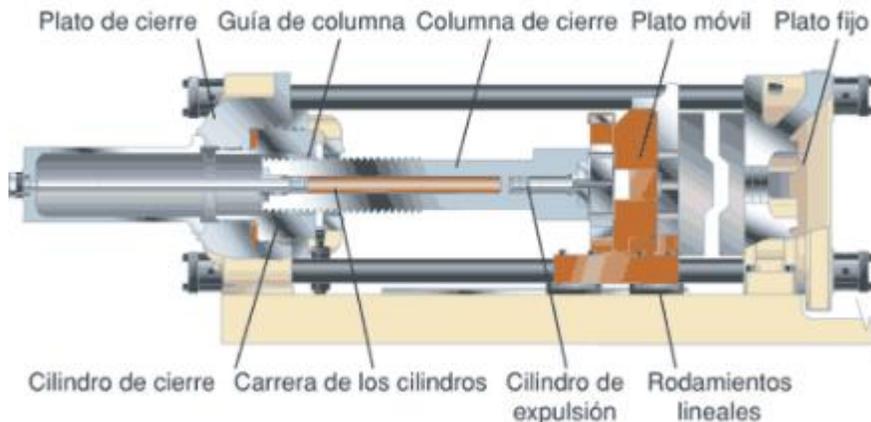


Figura 3.4. Unidad de cierre.

### 3.2.2. UNIDAD DE INYECCIÓN

La función principal de la unidad de inyección es la de fundir, mezclar e inyectar el polímero. Para lograr esto se utilizan husillos (tornillos de hierro o madera que se usan en el movimiento de algunas máquinas) de diferentes características según el polímero que se desea fundir. El estudio del proceso de fusión de un polímero en la unidad de inyección debe considerar tres condiciones termodinámicas:

1. La temperatura de procesamiento del polímero.
2. La capacidad calorífica del polímero  $C_p$  [cal/g °C].
3. El calor latente de fusión, si el polímero es semicristalino.

La unidad de inyección es en origen una máquina de extrusión con un solo husillo, teniendo calentadores y sensores para mantener una temperatura

programada constante. Cuenta con una tolva de recepción de resina directo del secador, la cual se funde mediante una serie de resistencias para su plastificado.

La inyección consta de dos etapas: en la primera, el extruder emplea un husillo (tornillo) para fundir la resina y llenar el shooting pot (cámara de inyección). La segunda etapa utiliza un cilindro para empujar la resina fundida de la cámara de inyección al molde (etapa de retención).



*Figura 3.5. Unidad de inyección.*

### **3.2.2.1. EXTRUSOR O HUSILLO**

Es el encargado de realizar la plastificación del material fundido. Cuando el material es plastificado el husillo llena la cámara de inyección hasta el “tamaño del tiro”, existen distintos diseños y tipos de husillos, la elección dependerá del material a manejar. Este elemento de la máquina inyectora es el corazón del proceso y un mal manejo del mismo repercutirá en la calidad de la preforma.

Consiste en un tornillo que gira mientras que una serie de resistencias funde la resina previamente seca, el objetivo de que gire es que el fundido sea homogéneo y no existan dificultades al momento de transferir el plástico a la cámara de inyección.

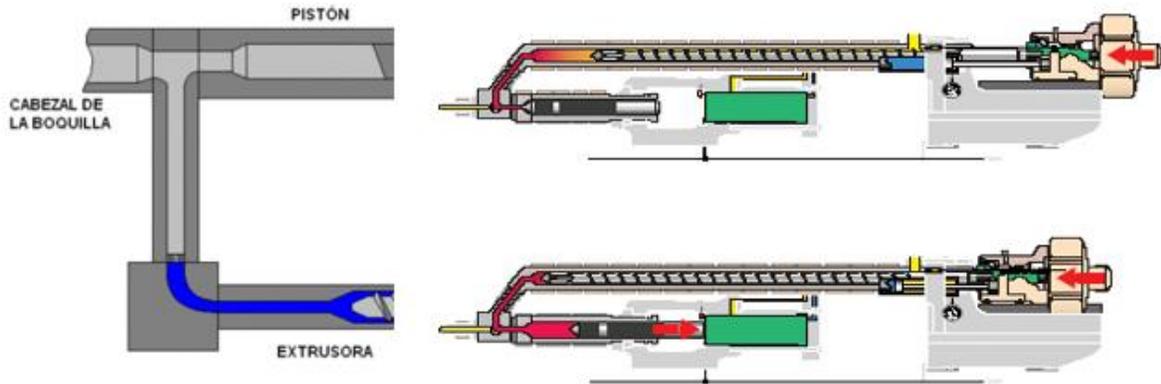


Figura 3.6. Extrusor o husillo en la unidad de inyección.

### 3.2.3. UNIDAD DE CONTROL

Está compuesta del gabinete Eléctrico y la Interface hombre-máquina. El gabinete eléctrico contiene el controlador de lógica programable, los interruptores de circuito. La IHM controla las funciones de la máquina y controla las funciones de operación.



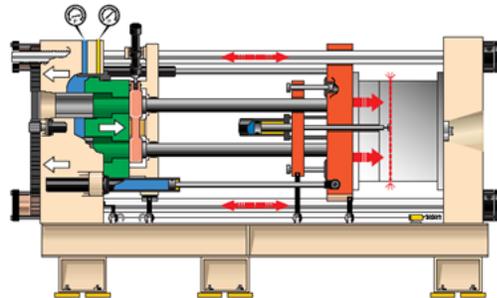
Figura 3.7. Unidad de control.

Existen diversos modelos de máquinas inyectoras, sin embargo, la teoría de la operación es la misma, algunas condiciones podrán variar en función al material que se esté inyectando.

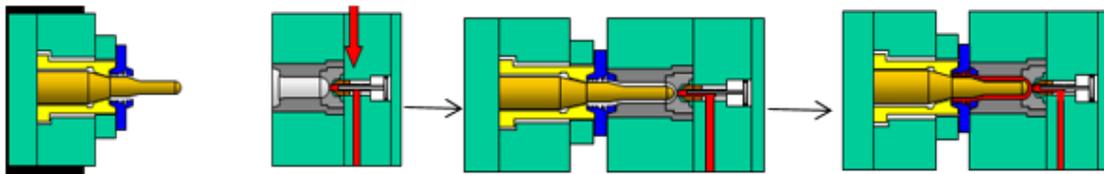
### 3.3. PROCESO DE INYECCIÓN DE PREFORMAS DE PET

Para producir las preformas de PET, la resina fundida de PET debe ser inyectada a un molde el cual se encuentra en la unidad de cierre, posteriormente debe ser enfriada para evitar la formación de cristales y así mantenga la transparencia deseada, el proceso para tal fin se describe a continuación:

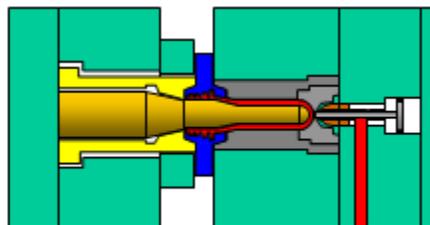
1. A través de pistones el molde se coloca en posición de inyección con la fuerza necesaria para mantenerse cerrado.



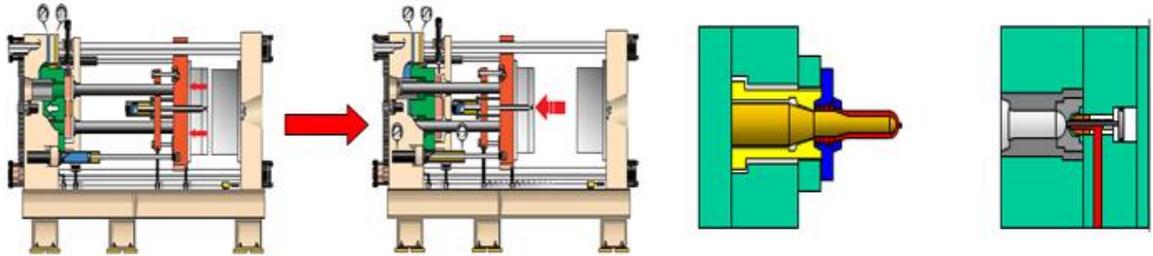
2. La válvula del distribuidor abre, entonces el pistón de inyección se extiende para inyectar un tiro de resina y llenar las cavidades del molde.



3. El pistón de inyección cambia la presión aplicada a la resina y realiza una presión de retención mientras se enfría la resina dentro de las cavidades.



4. Finalmente, la alta presión se libera regresando a la posición inicial el molde mediante los pistones.



La figura 4.7 muestra el esquema del proceso global de inyección desde el secado, el fundido, la plastificación, la inyección y la obtención de la preforma.

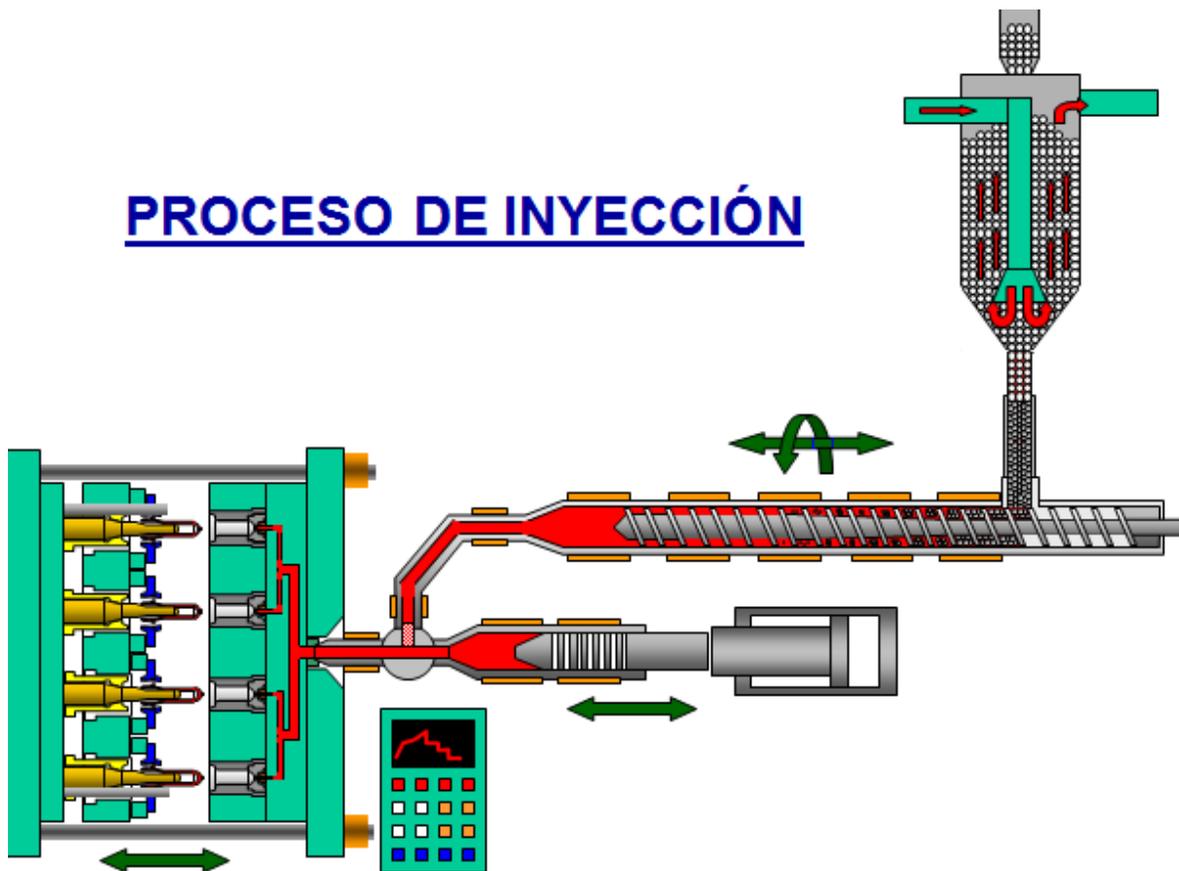


Figura 3.8. Esquema del proceso global de inyección.

**CAPÍTULO 4**  
**PROCESO DE MOLDEO**  
**POR ESTIRADO –**  
**SOPLADO (SBM).**

#### 4.1. MÁQUINA DE MOLDEO POR ESTIRADO – SOPLADO.

Hasta este punto, se ha mostrado a grandes rasgos como se produce una preforma de PET en una máquina inyectora. En este capítulo se hablará del proceso final para elaborar una botella, el moldeo por estirado – soplado (SBM).

El paso inicial es conocer las partes más importantes de la máquina de soplado.

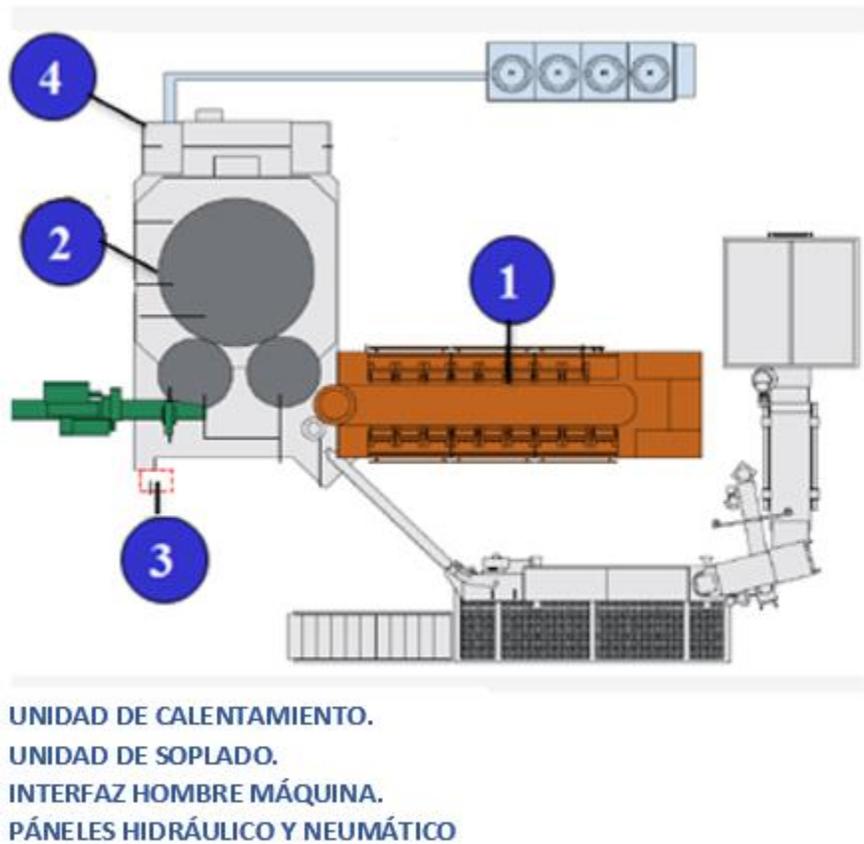


Figura 4.1. Esquema de una máquina sopladora

#### 4.1.1 UNIDAD DE CALENTAMIENTO.

Se conforma por un horno, el cual a su vez es constituido por una serie de lámparas infrarrojas destinadas a proporcionar la energía necesaria para moldear el plástico. En esta unidad es donde se llevará a cabo el estudio, una preforma tendrá un tiempo de residencia dentro del horno dado con un arreglo específico de lámparas.

##### 4.1.1.1 HORNO

Se compone de un arreglo de lámparas de luz infrarroja, las cuales calientan la preforma en zonas específicas y destacan dos tipos:

- **Lámparas de penetración:** Encargadas de lograr que la preforma alcance la temperatura de transición vítrea para que el material pueda moldearse, estas lámparas pueden regularse en función de su potencia y generalmente se encuentran encendidas a su 100% de potencia.
- **Lámparas de distribución:** Encargadas de calentar las zonas de forma superficial para que el material se distribuya durante el estirado – soplado, generalmente no se encuentran a su máxima potencia.

El ingreso de las preformas al horno será por medio de unas piezas en una cadena, las cuales sostienen de la corona de las preformas mientras que el cuerpo es expuesto a las lámparas. El tiempo de residencia dentro del horno dependerá de diversos factores como: espesor de la pared, color, resina o geometría.

Una preforma de la misma geometría con distinta resina puede tener un perfil de calentamiento distinto por lo que deberá existir un proceso específico para cada tipo.

Dentro del horno se localiza un pirómetro el cual mide la temperatura de la pared de la preforma sin necesidad de estar en contacto con ella.

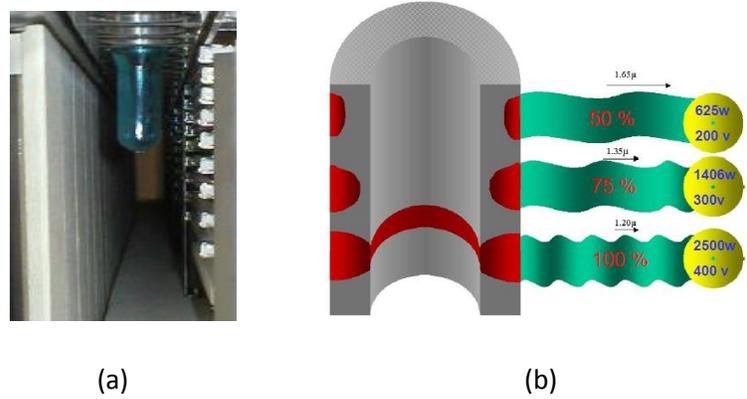


Figura 4.2. (a) preforma dentro del horno, (b) esquema de una preforma durante su calentamiento, la lámpara más abajo corresponde a una de penetración y las dos superiores de distribución

Las lámparas del horno se dividen en zonas de acuerdo a la altura de una preforma tendrá más o menos zonas de calentamiento, esto se esquematiza en la figura 4.3. Esta disposición de las zonas ayudará modificar la cantidad de material en alguna parte de la botella durante el proceso de soplado posterior, si una zona está más caliente se moverá relativamente más fácil.

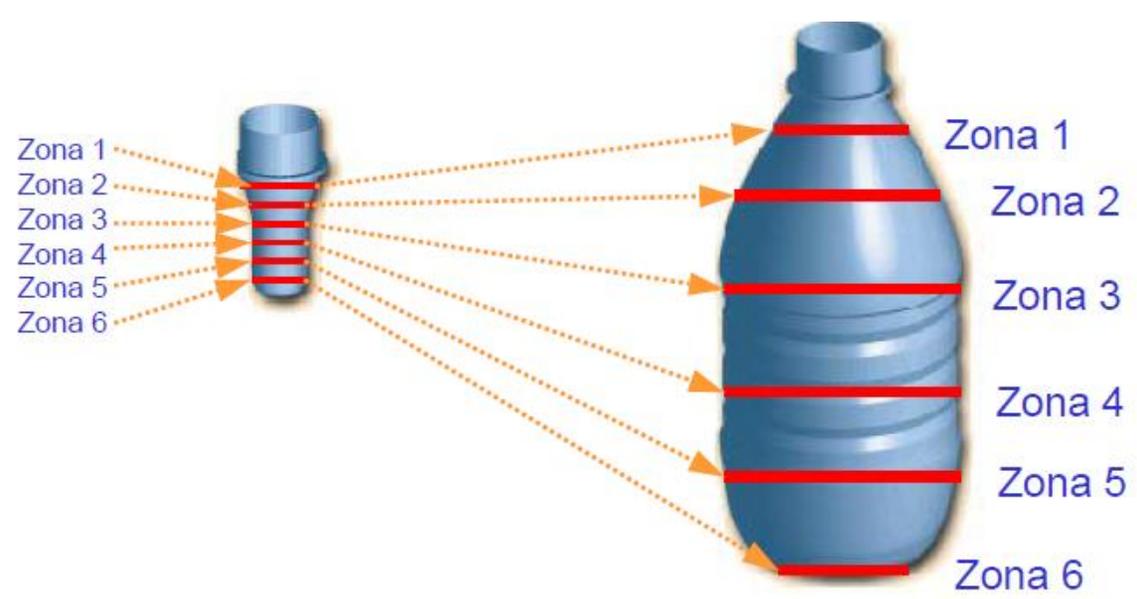


Figura 4.3. Zonas de calentamiento en una preforma y botella.

#### 4.1.1.2. RAMPAS DE ENFRIAMIENTO Y VENTILACIÓN.

Dentro de la unidad de calentamiento se localiza una sección conocida como rampas de enfriamiento y su función es aislar la corona mientras la preforma se encuentra dentro del horno.

Sin las rampas, la corona también alcanzaría la temperatura de transición vítrea y se haría maleable, desde luego esta condición no es conveniente debido a que si existen deformidades en el sello de la preforma, habría fugas durante el tapado del envase. En este sentido, las rampas de enfriamiento no permitirán que la corona de la preforma alcance una temperatura superior a los 65°C.

Otro sistema fundamental dentro de la unidad de calentamiento es la ventilación, su función es mantener la temperatura homogénea en la preforma. Este efecto será considerado en el estudio de transferencia de calor. A través de las condiciones del aire se determinará el coeficiente de transferencia de calor por convección.

El aire es ventilado durante el tiempo de residencia de la preforma en el horno con una velocidad conocida y que se puede ajustar.

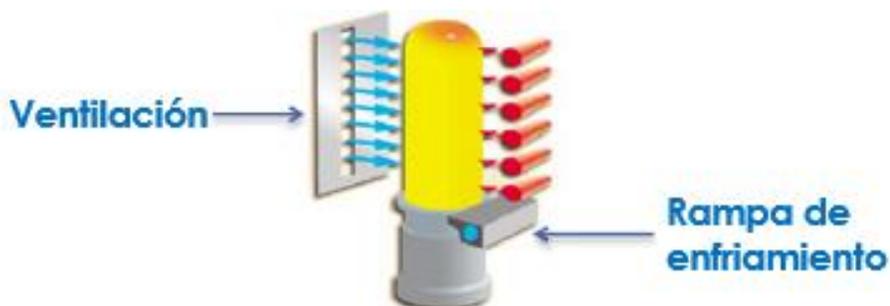


Figura 4.4. Imagen de una preforma en el horno con la rampa de enfriamiento y la ventilación señalizadas.

### 4.1.2. UNIDAD DE SOPLADO

Se compone de la rueda de soplado, la cual tiene cada una de los moldes de los envases. Cuenta con un módulo de válvulas que se activan dependiendo del estado del proceso (presoplado, soplado, desgasificación o desfogue).

Esta unidad cuenta con barras de estirado individuales por cada estación las cuales son las encargadas de estirar la preforma una vez que ha pasado por la unidad de calentamiento. Estas barras se introducen dentro de la preforma estirándola en función al punto 0 y al punto 10.

En esta unidad de la máquina se encuentra en una matriz giratoria y en cada vuelta se genera un envase, desde la toma de la preforma hasta la expulsión de la botella, por ello, es importante que exista una correcta sincronía entre los dispositivos encargados de estirar y soplar las preformas.



Figura 4.5. Imagen de un molde con la barra de estirado en la unidad de soplado.

#### 4.1.2.1. PUNTO 0 Y PUNTO 10

En la unidad de soplado hay dos parámetros que deben ajustarse para cada tamaño de preforma y se trata del punto 0 y el punto 10. El primero se trata del inicio del estirado activo; es decir, el momento en el cual la barra de estirado toca el fondo de la preforma e inicia su recorrido vertical.

El punto 10 se refiere al fin del estirado activo y sucede cuando el punto de inyección de la preforma se encuentra lo más próximo al fondo del molde.

La varilla no deberá bajar demasiado o podrá adelgazar excesivamente el punto de inyección y durante el llenado podrán existir explosiones o fisuras. Para ajustar el fin de carrera de la barra de estirado, en la parte superior se localiza un tope, el cual, impide que la varilla siga bajando. Este tope puede ser ajustado de acuerdo a la geometría de la preforma.

Algunas máquinas sopladoras ajustan automáticamente el punto 0 y el punto 10 mediante sensores.

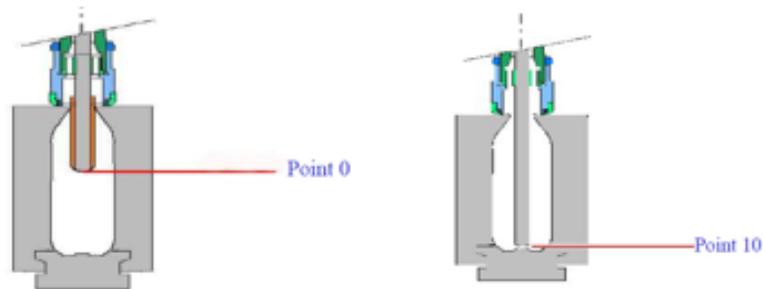


Figura 4.6. Representación del punto 0 y punto 10.

#### 4.1.2.2. PRESOPLADO

Consiste en aire a baja presión que se ejerce sobre la preforma generalmente una vez que el estirado ha comenzado, aunque puede iniciar antes del mismo.

La función primordial es distribuir el material a lo largo del molde formando una burbuja. Un adecuado presoplado determina la calidad de la botella, si se ejerce una presión inadecuada, el material se localizará acumulado en una zona de la botella, adelgazando en demasía las zonas adyacentes.

El presoplado generalmente termina en un tiempo muy corto después de que ha concluido el estirado activo (punto 10).

En el proceso hay reglas generales aplicables al estirado – soplado. El operador deberá combinar estos dos procesos para distribuir el material a conveniencia.

- **Inicio del presoplado antes del punto 0.**

Cuando esto ocurre, se empezará a formar la burbuja en el cuello de la preforma y por lo tanto la mayor cantidad de material se localizará en esta zona.

- **Inicio del presoplado después del punto 0.**

En este caso, el estirado se inicia y el presoplado le sigue, la burbuja se empezará a formar en alguna zona del cuerpo de la preforma o si se inicia a presoplar mucho después, el material se concentrará en la base de la botella.

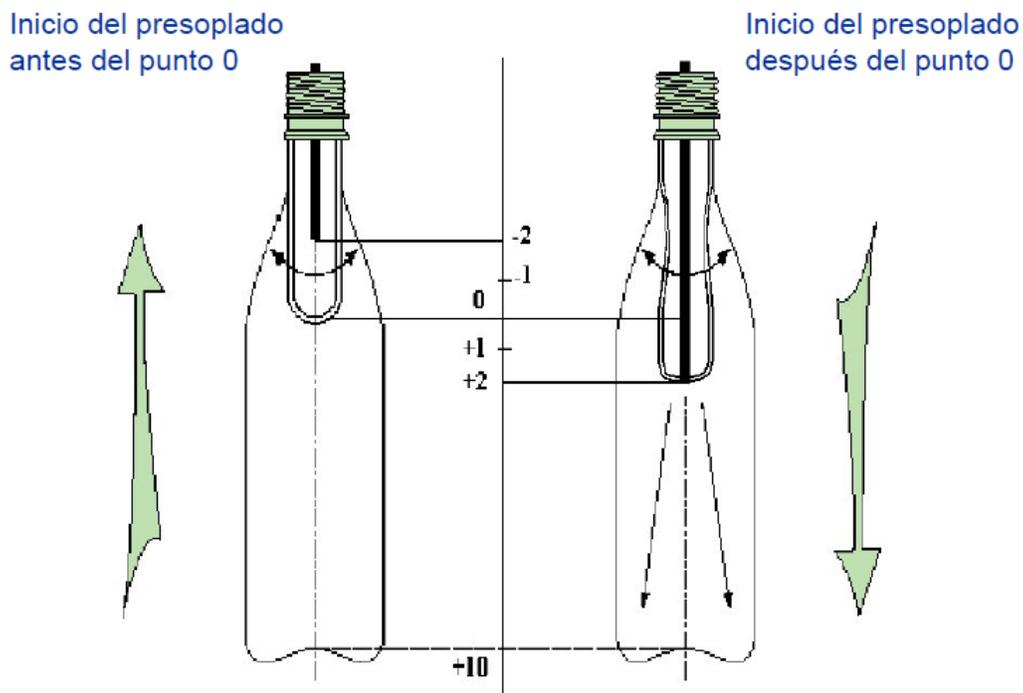


Figura 4.7. Inicio del presoplado antes y después del punto 0.

- **Presión de presoplado alta.**

La presión de presoplado va de los 8 a los 15 bar, cuando es muy alta la burbuja se formará muy rápido cerca del cuello de la botella por lo tanto el material se concentrará en esta zona.

- **Presión de presoplado baja.**

Por otro lado, cuando la presión es baja, se formará una burbuja alargada concentrando el material en la parte baja del envase.

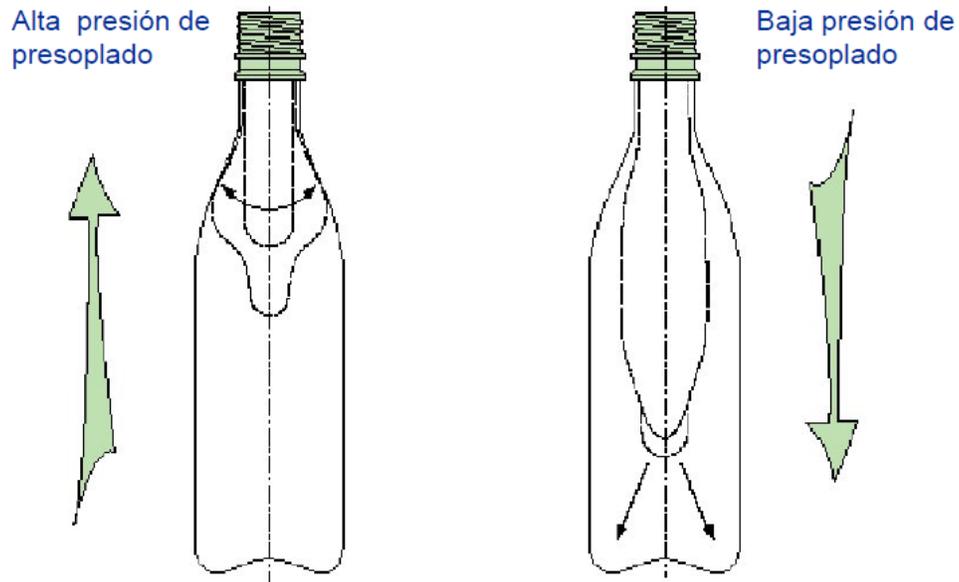


Figura 4.8. Presión de presoplado alta y baja.

Los ajustes combinados de inicios de estirado y presoplado determinarán un perfil de distribución de material en el envase particular, por ello el operario deberá hacer pruebas antes de cada producción de acuerdo a lo que convenga.

#### **4.1.2.3. VÁLVULAS DE FLUJO.**

Algunas máquinas poseen válvulas electrónicas que ejercen la presión de presoplado automáticamente abriendo o cerrando el caudal. Sin embargo, existen máquinas que tienen válvulas manuales de flujo y se ajustan dependiendo de la distribución inicial de material. Si una botella se produce con exceso de material en la base, su válvula de flujo individual deberá abrirse para que el aumento caudal de aire anticipe la formación de la burbuja.

Estas válvulas resultan convenientes en cierto sentido, ya que se tiene un control mayor sobre la apertura o clausura del flujo del aire.

#### **4.1.2.4. DISTRIBUCIÓN DE MATERIAL**

En resumen, existen 5 formas generales de distribuir el material a lo largo del envase en el proceso de soplado – estirado.

- **TÉRMICO**

Con el arreglo de lámparas, así como su porcentaje de intensidad, de esta forma solo puede distribuirse entre zonas próximas.

- **MECÁNICO**

El material puede distribuirse mediante 4 procesos entre zonas que no necesariamente sean continuas.

1. Velocidad de estirado.
2. Inicio de presoplado.
3. Presión de presoplado.
4. Tiempo de presoplado.

El especialista de proceso deberá contemplar todos los recursos neumáticos y térmicos para establecer un perfil de espesores óptimo sin defectos.

Los parámetros adicionales de proceso que se debe considerar son:

- **Consigna de temperatura de preforma.**

Es la temperatura que se establece para moldearse y actúa como un set point, debe ser superior a la temperatura de transición vítrea e inferior a la temperatura de fusión.

- **Cadencia de la máquina.**

Es la velocidad a la que la máquina sopladora trabaja y generalmente se mide en botellas por hora, determinará el tiempo de residencia de la preforma en el horno.

A cadencias bajas el moldeo puede controlarse mejor, previniendo los defectos, pero se producirán menos envases. A cadencias altas los defectos pueden controlarse menos debido a que se requiere más energía para calentar la preforma y que se obtenga en menos tiempo.

#### 4.1.2.5. CRAZING

Durante el calentamiento es importante que las paredes tanto interna como externa se encuentren a la misma temperatura, esto es lo ideal, sin embargo, para que esto suceda, puede que la preforma necesite estar demasiado tiempo dentro del horno y esto naturalmente no es atractivo para la industria.

¿Por qué es importante que la pared interna se caliente? La respuesta se puede entender con el siguiente ejemplo:

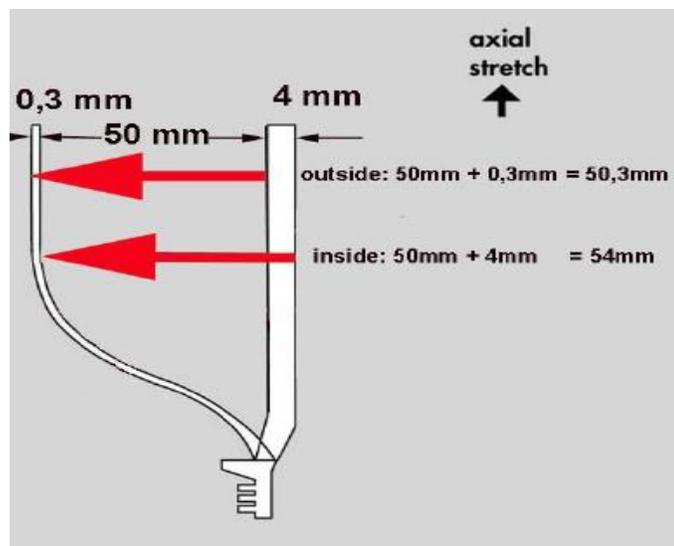


Figura 4.9. Representación del crazing.

Una preforma tiene de espesor 4mm, se desea que el espesor de la botella sea de 0.3mm. si el radio de la botella es de 54.3mm, la pared externa hace un recorrido total durante el soplado de 50.3mm mientras que la pared interna hace un recorrido total de 54. La pared interna entonces, realiza la mayor expansión y si se desea evitar defectos como la cristalización por inducción, debe estar por encima de la temperatura de transición vítrea. Uno de los propósitos de este estudio, es

determinar en qué tiempo las dos paredes obtienen el mismo valor de temperatura, y cual sería, por producción, el mejor tiempo de residencia en el horno.

### 4.1.3. PROCESO DE SOPLADO

Una vez que se han inyectado las preformas se introducen a una tolva, la cual, las acomoda en una carrillera para que el ingreso a la máquina sea en serie. Mandriles sujetan cada una de las preformas de la corona y las orientan 90°, anteriormente se ha fijado la consigna de temperatura de preforma y la cadencia de la máquina. Posteriormente las preformas ingresan al horno donde las rampas de enfriamiento protegen la corona mientras que el sistema de ventilación mantiene homogénea la temperatura en las paredes. Una vez terminada la residencia en el horno, las preformas están maleables ya que han alcanzado la temperatura de transición vítrea, una pinza manda la preforma al molde, el cual, se cierra y se mantiene sellado mientras la barra de estirado baja del punto 0 al punto 10, a la vez que el aire de presoplado ingresa y forma una burbuja, después, aire a alta presión pegará el material a las paredes del molde donde será rápidamente enfriado. Una válvula de desfogue quitará los gases para que el molde pueda abrirse de nuevo y otra pinza expulse el envase formado.

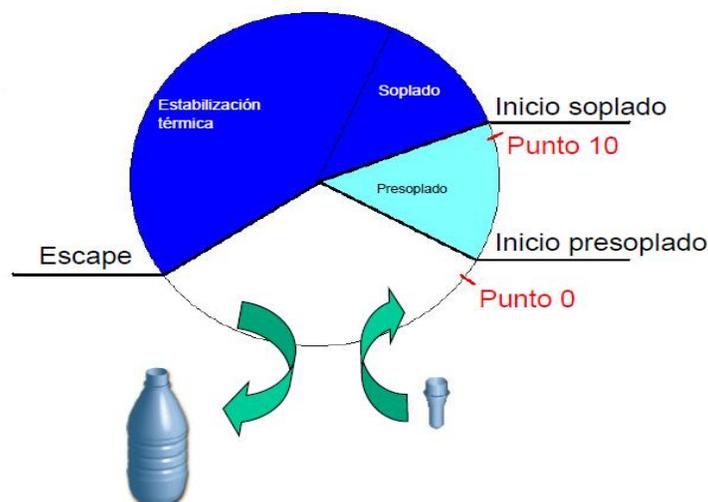


Figura 4.10. Esquema del proceso global de soplado.

**CAPÍTULO 5**  
**TRANSFERENCIA DE**  
**CALOR EN UNA**  
**PREFORMA DE PET**  
**EN UN HORNO (SBM)**

## 5.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la ciencia que busca predecir la transferencia de energía como resultado de una diferencia de temperatura. Habrá que distinguir la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica, esta última se encarga del estudio de sistemas en equilibrio mientras que la primera puede ocuparse de comportamientos de energía y temperatura fuera del equilibrio.

Un ejemplo es el enfriamiento de una barra de acero caliente sumergida en agua fría, la termodinámica puede decir las condiciones de equilibrio al final de la combinación, mientras que la transferencia de calor puede mostrar que tan rápido se llegó una condición dada; es decir, puede expresar a la temperatura en función del tiempo.

Las tres formas de transferencia de calor son: por conducción, por convección y por radiación.

### 5.1.1. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

El transporte de energía se realiza de la zona más caliente hacia la menos caliente en algún material o sustancia, se dice que el calor es transferido por conducción y la rapidez depende la conductividad térmica del material. La conducción de calor en fluidos se debe al movimiento de las moléculas mientras que en sólidos se debe a la interacción entre partículas adyacentes.

La ecuación que describe la transferencia de calor por conducción es la ley de Fourier [8], la cual expresa la rapidez de transferencia de energía por unidad de área como proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ecuación 5.1

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad,

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

Ecuación 5.2

La constante positiva  $k$  se le llama conductividad térmica, el signo menos es para satisfacer la segunda ley de la termodinámica, la cual establece que el sentido del transporte de energía deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura [3].

### 5.1.1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Por experiencia se sabe que algunos materiales son mejores para conducir calor que otros, por ejemplo, los metales a diferencia de la madera, la propiedad física que les da esta característica se llama conductividad térmica y se expresa como  $k$ . Para conocer el valor de dicha propiedad se pueden realizar mediciones experimentales, para gases a bajas temperaturas, pueden usarse tratamientos analíticos basados en la teoría cinética de los gases.

En el proceso de conductividad térmica en un gas se identifica la energía cinética a cierta temperatura, las moléculas se encuentran en movimiento aleatorio chocando unas contra otras intercambiando energía, si una molécula de alta temperatura colisiona con una de baja temperatura le transferirá energía.

El mecanismo de conductividad térmica en líquidos es similar al de los gases, aunque la situación es más compleja debido a que las moléculas se encuentran más cerca unas de otras y los campos de fuerza moleculares ejercen una fuerte influencia sobre el intercambio de energía.

En lo que respecta a los sólidos la conductividad térmica se da de dos formas: vibración de red y transporte por medio de electrones libres. En los buenos materiales conductores existe una gran cantidad de electrones libres del mismo modo que los electrones transportan carga eléctrica pueden llevar energía térmica de una zona de alta a una de baja temperatura.

La energía también puede ser transmitida por vibración en la estructura del material; sin embargo, esta forma de transferencia no es tan grande como la de los electrones libres, es por eso que casi siempre los buenos conductores de electricidad son buenos conductores de calor.

Las unidades de la conductividad térmica son watts por metro por grado Celsius cuando el calor se expresa en watts, como se observa se trata de la rapidez de transferencia de calor.

Para fines del estudio se trabajará con la conductividad térmica del polietileno tereftalato en su estado amorfo que es el correspondiente a la preforma, ya que se cuenta con el valor de la propiedad en estado cristalino.

### **5.1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN**

Es la forma de transferencia de calor en la que participa un fluido de por medio por ejemplo aire, cuando un sólido caliente está expuesto a una corriente de aire se enfriará más rápido que si solo está expuesto a la intemperie.

Se dice entonces que se transfirió calor por convección, en este caso la velocidad del aire es un factor determinante en la transferencia de calor. La relación entre convección y conducción en el sistema se explica a continuación: el cuerpo tendrá una temperatura  $T_w$  y el fluido  $T_\infty$ , la velocidad del flujo aparecerá en torno al cuerpo sólido y se reducirá a cero justo en la superficie del mismo como resultado de la acción de la viscosidad, en este punto, la transferencia de calor se hará por conducción pura [3].

La consideración principal de que se trate como una transferencia de calor por convección más que por conducción, es que el gradiente de temperatura depende de la rapidez a la que el fluido conduce el calor; una velocidad alta produce un gradiente de temperatura más alto.

Para expresar el efecto total de la convección se utiliza la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = hA(T_w - T_\infty)$$

Ecuación 5.3

La rapidez de transferencia de calor se relaciona con la diferencia de temperatura entre la pared y el fluido y el área de la superficie,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. El valor del coeficiente se puede determinar analíticamente en situaciones sencillas, para casos más complejos es necesario determinarlo experimentalmente.

Cabe mencionar la importancia de las propiedades del aire en la transferencia de calor como la viscosidad, velocidad y densidad, después de todo la viscosidad influye en el perfil de velocidad. Dentro de la transferencia de calor por convección se distinguen dos tipos:

La *convección natural*, que se da cuando el fluido experimenta movimiento por diferencia de densidades sobre la placa [3], un ejemplo es el enfriamiento de un cuerpo en el medio ambiente y la *convección forzada*, en la cual el movimiento del fluido se da por medios externos, por ejemplo, un ventilador.

En este estudio se considerará la transferencia de calor por conducción, radiación y convección forzada, cuando una preforma entra al horno de la máquina sopladora un ventilador actuará para tratar de mantener la temperatura homogénea tanto en la pared interna como en la externa. En la simulación del proceso habrá que tomar en cuenta el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual, se determinará de forma analítica estableciendo valores de velocidad y propiedades térmicas del aire; por tal motivo es importante mencionar los principios de convección para llegar al valor deseado del coeficiente.

### 5.1.2.1. PRINCIPIOS DE CONVECCIÓN

Con anterioridad se trató el tema de las formas de transferencia de calor y se mencionó que procesos son los dominantes en el estudio. El sistema de ventilación en el horno es fundamental en el proceso de calentamiento de las preformas para

su posterior moldeo, en este sentido, es necesario conocer la velocidad óptima a la cual debe ventilarse el aire para mantener las paredes internas y externas del material a la misma temperatura.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección es necesario hacer un balance de energía y conocer las propiedades del fluido. El tratamiento que tendrá el estudio es en relación a la convección forzada.

El flujo de calor es constante durante el tiempo de residencia de la preforma en el horno, la temperatura de la pared externa aumenta desde que la preforma ingresa a la máquina y hasta que llega al valor establecido de consigna, la transferencia de calor del fluido a dicha superficie es laminar, bajo estas consideraciones debe hacerse un análisis para determinar el valor del coeficiente de película.

### 5.1.2.2. CAPA LÍMITE TÉRMICA

La transferencia de calor por convección se da entre un fluido y una superficie en la cual el calor es transportado hacia la pared y debido a las fuerzas viscosas sobre esta, la energía se mueve por conducción. Es precisamente sobre la pared donde existe una capa térmica y es aquella donde los gradientes de temperatura están presentes en el flujo [3].

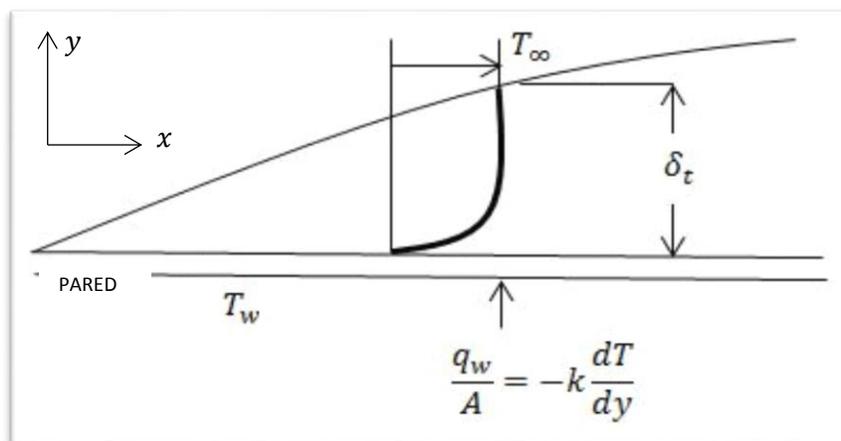


Figura 5.1. Perfil de temperatura en la capa límite térmica

La capa hidrodinámica se define como la región del flujo en donde se sienten las fuerzas viscosas [3], en la imagen anterior, la temperatura de la pared es  $T_w$ , la temperatura del fluido fuera de la capa límite térmica es  $T_\infty$  y el espesor de la capa límite es  $\delta_t$ . En la pared la velocidad es cero y la transferencia de calor tiene lugar por conducción. Si relacionamos la ley de calentamiento de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton:

$$h = \frac{-k(\partial T / \partial y)_{pared}}{T_w - T_\infty}$$

Ecuación 5.4

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, de este modo, es necesario encontrar el gradiente de temperatura en la pared para evaluar el coeficiente. Para establecer las propiedades del fluido y determinar el coeficiente es necesario conocer los números adimensionales y las relaciones matemáticas de las que forman parte. El científico alemán Ludwig Prandtl introdujo los conceptos de la teoría de capa límite, la siguiente ecuación es válida cuando una placa se calienta en toda su longitud.

$$\frac{\delta_t}{\delta} = \zeta = \frac{1}{1.026} Pr^{1/3}$$

Ecuación 5.5

Donde  $\delta_t$  es el espesor de la capa límite térmica y  $\delta$  es el espesor de la capa límite hidrodinámica. Este análisis supone que  $\zeta < 1$ . Esta suposición es satisfactoria para fluidos que poseen un número de Prandtl mayores a 0.7, la mayoría de los gases y líquidos caen dentro de esta categoría.

El número de Prandtl es un parámetro que relaciona los espesores relativos de las capas límite hidrodinámicas y térmicas [9]. La viscosidad cinemática y la difusividad térmica son cantidades que determinan cuan gruesas serán las capas límite para un campo de flujo externo dado. En este sentido, este número adimensional es un lazo entre el campo de velocidad y la temperatura.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho c_p} = \frac{c_p \mu}{k}$$

Ecuación 5.6

El número de Nusselt es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción [9], se define como:

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}}$$

Ecuación 5.7

Existen muchas correlaciones empíricas expresadas en términos del número de Nusselt para, por ejemplo, placas planas, cilindros, dentro de tuberías, etc., que evalúan generalmente el número de Nusselt medio en una superficie. Estas correlaciones tienen la forma de  $Nu = f$  (número de Reynolds, número de Prandtl).

$$Nu = \frac{hx}{k}$$

Ecuación 5.8

$$Nu = 0.332Pr^{1/3}Re^{1/2}$$

Ecuación 5.9

Para una placa calentada en toda su longitud.

### 5.1.2.3. FLUJO A TRAVÉS DE CILINDROS

Para el fin de este estudio es importante considerar la geometría de nuestro sistema, el cual es un cilindro con un flujo de aire a través de este.

El desarrollo de la capa límite determina las características de la transferencia de calor, depende en mayor medida de la velocidad de flujo y deberá tenerse en cuenta el gradiente de presión ya que influye de forma apreciable sobre el perfil de velocidad de la capa límite [2]. De hecho, es este gradiente el que genera el desarrollo de una región de flujo separado en la parte posterior del cilindro cuando la velocidad de corriente libre no es lo suficientemente grande.

Cuando un flujo de aire fluye libremente sobre la superficie de la pared externa de la preforma (cilindro), ocurre un fenómeno de separación de capa límite, de acuerdo a la teoría, la presión en la capa es esencialmente constante en cualquier posición, en el caso del cilindro existe un punto de estancamiento correspondiente al frente del mismo, la presión debería ser la misma de la corriente libre, a medida que el flujo progresa la presión disminuiría y en seguida aumentaría en la parte posterior del cilindro dando como resultado un incremento de la velocidad del flujo en la parte frontal y una reducción en la parte posterior.

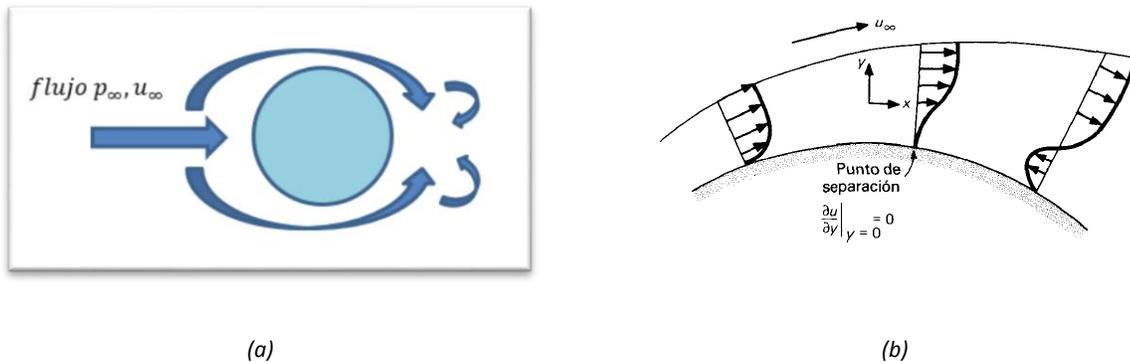


Figura 5.2. (a)Representación del flujo de un fluido a través de un cilindro. (b)Perfil de velocidad de la capa límite en la separación.

La presión es constante a través de la capa límite, puede comenzar un flujo inverso cerca de la superficie, el momento de las capas del fluido no es lo suficientemente grande como para vencer el incremento de la presión. Cuando el gradiente de la velocidad en la superficie se vuelve cero, se dice que el flujo ha alcanzado su punto de separación [3]:

$$\text{Punto de separación en } \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

Ecuación 5.10

A partir del punto de separación pueden ocurrir fenómenos de flujo inverso. La región de flujo separado en la parte posterior del cilindro eventualmente se vuelve

turbulenta y de movimiento aleatorio. El comportamiento a detalle de la transferencia de calor de la preforma caliente hacia el aire ha sido investigado por Giedt. En los números de Reynolds menores, el punto mínimo del coeficiente de transferencia de calor ocurre en el punto de separación, hay un incremento subsecuente del coeficiente en la parte posterior del cilindro debido al flujo turbulento a contracorriente en el flujo separado.

Debido a la naturaleza compleja de los procesos de separación de flujo, no es posible calcular en forma analítica los coeficientes de transferencia de calor en el flujo transversal. Las correlaciones de datos experimentales de Hilpert [16], para gases, Knudsen y Kartz [17], para líquidos, indican que los coeficientes promedio de transferencia de calor se pueden calcular con:

$$\frac{hd}{k_f} = C \left( \frac{u_\infty d}{v_f} \right)^n Pr^{1/3}$$

Ecuación 5.11

Donde las constantes C y n están basadas en las correlaciones antes mencionadas y se muestran a continuación:

Tabla 5.1. Constantes C y n en función del número de Reynolds.

$Re_{df}$	C	n
0.4 - 4	0.989	0.330
4 - 40	0.911	0.385
40 - 4000	0.683	0.466
4000 - 40000	0.193	0.618
40000 - 400000	0.0266	0.805

Las propiedades se evalúan a las condiciones de la película, la temperatura en este punto se calcula por:

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$$

Ecuación 5.12

Dónde:

$T_f$  =Temperatura de la película

$T_w$  =Temperatura de la pared

$T_\infty$  =Temperatura del aire

La correlación original para gases omite el número de Prandtl, debido a que la mayoría de los gases diatómicos tienen un número de Prandtl cercano a 0.7.

Churchill y Bernstein nos dan una relación aún más completa [8]:

$$Nu_d = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

para  $10^2 < Re_d < 10^7$

Ecuación 5.13

Cualquiera de las dos relaciones nos dará un resultado satisfactorio en la búsqueda del coeficiente de transferencia de calor para aire que fluye a través de un cuerpo cilíndrico.

### 5.1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.

La tercera forma de transferencia de calor es la radiación térmica que emite un cuerpo como resultado de su temperatura, no se requiere un medio para la propagación de las ondas electromagnéticas que son radiadas. El calor irradiado por el sol se puede intercambiar entre la superficie solar y la terrestre sin calentar el espacio. Los objetos ideales que absorben toda la radiación que llega a su superficie y su emisividad es igual a la unidad, conocidos como cuerpos negros, y otros que se asemejan más a la realidad son llamados cuerpos grises [3]. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $\nu$ ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión:  $\lambda\nu=c$ , son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una rapidez constante  $c=299792$  km/.



Figura 5.3. Representación de las formas de transferencia de calor

### 5.1.3.1. LEYES DE RADIACIÓN

#### LEY DE STEFAN-BOLTZAMANN.

Todos los objetos emiten energía radiante, por ejemplo: el sol, la tierra, las personas, esta radiación se produce a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie. La rapidez a la cual se libera energía se llama potencia de radiación  $H$ , su valor es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta [19].

$$H = \varepsilon\sigma AT^4$$

Ecuación 5.14

Donde a  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$  se le conoce como constante de Stefan-Boltzmann y  $\varepsilon$  es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad, sus valores varían entre 0 y 1, es una medida de la eficiencia con la que la superficie emite energía radiante, depende del material. Un cuerpo emite energía radiante con una rapidez dada por la ecuación anterior, pero al mismo tiempo absorbe radiación. Si un cuerpo se encuentra a temperatura  $T$  y el ambiente a  $T_0$ , la energía neta ganada o perdida por segundo como resultado de la radiación es [19]:

$$H_{neta} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_0^4)$$

Ecuación 5.15

Un cuerpo que absorbe a la perfección se conoce como cuerpo negro, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie y su emisividad es igual a la unidad. No se conoce ningún objeto con estas características, el material que absorbe la mayor cantidad de radiación es el negro de carbono con un 97% de absorción. Los cuerpos con emisividad entre 0 y 1 se conocen como cuerpos grises y son los objetos reales.

### LEY DE WIEN

Al aumentar la temperatura de un cuerpo negro la cantidad de energía que emite se incrementa y la energía se desplaza a las longitudes de onda más cortas. Esto obedece la ley del desplazamiento de Wien [19]:

$$\lambda_{m\acute{a}x}T = 2897$$

Ecuación 5.16

Donde  $\lambda_{m\acute{a}x}$  es la longitud de onda que corresponde al máximo de la curva de radiación en micrómetros y T es la temperatura absoluta del objeto que emite radiación. Con esta ley se demuestra que la emisión de radiación de la superficie terrestre tiene un máximo de 9.9 micrómetros, que corresponde a la región infrarroja del espectro.

### LEY DE PLANCK

Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Planck afirma que la intensidad de radiación  $I(\lambda, T)$ , esto es, la energía por unidad de tiempo por unidad de área emitida en un intervalo de longitud de onda [19], por un cuerpo negro a temperatura absoluta T, está dada por:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{ch/k\lambda T} - 1}$$

Ecuación 5.17

Donde  $I(\lambda, T)$  es la densidad de flujo de energía por unidad de longitud de onda,  $h$  es la constante de Planck y  $k$  es la constante de Boltzmann de valor de  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

### LEY DE KIRCHHOFF

Establece que si un cuerpo o superficie está en equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorbanza ( $\alpha = \varepsilon$ ), [19].

Existen los siguientes corolarios:

- Un mal reflector es un buen emisor.
- La emisividad no puede ser mayor a 1 por la conservación de la energía por lo que no es posible termodinámicamente irradiar más energía que un cuerpo negro en equilibrio.

# **CAPÍTULO 6**

## **RESULTADOS Y**

### **DISCUSIÓN**

## 6.1. SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA PREFORMA 1

Después de conocer los métodos de transferencia de calor que participan se determinará que aportación hace cada uno de ellos durante el proceso de moldeo por estirado–soplado.

La preforma 1 tiene las siguientes características y medidas:



Figura 6.1. Corte transversal de la preforma 1 con algunas medidas en milímetros.

La altura total de la preforma es de 88.11mm, el espesor de la pared en el cuerpo es de 3.72mm mientras que el radio del cuerpo es de 9.96mm. Cabe mencionar que la simulación se hará sobre la mitad de la preforma debido a su simetría; la figura 6.1. muestra el corte transversal del sistema.

El área transversal aproximada de la preforma es de 0.0022 m<sup>2</sup>, este valor se obtuvo como la suma de las áreas desde el cuello hasta la base de la preforma.

La contribución de la transferencia de calor por conducción lo describe la ecuación 5.2:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

*Ecuación 5.2.*

El transporte de calor por conducción se realiza desde la pared externa de la preforma hacia la pared interna. La consigna de la temperatura externa se mantendrá en 114°C, mientras que la temperatura de la pared interna es de 25°C, por lo tanto, la cantidad de calor es:

$$q_{cond} = -kA(T_{int} - T_{ext})$$

$$q_{cond} = \left(-0.25 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)(0.0022m^2)(25^{\circ}C - 114^{\circ}C)$$

$$q_{cond} = 0.0489 \frac{W}{m}$$

El aporte que hace la transferencia de calor por convección de acuerdo a la ecuación 5.3. es la siguiente:

$$q_{conv} = hA(T_{\infty} - T_w)$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor convectivo se utilizará la ecuación 5.11 de la siguiente manera:

$$\frac{hd}{k_f} = C \left( \frac{u_{\infty} d}{\nu_f} \right)^n Pr^{1/3}$$

El número de Reynolds se obtiene a partir de las siguientes condiciones del aire ventilado:

Tabla 6.1. Variables del aire para calcular el coeficiente de película.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
v	Velocidad	50	m/s
d	Diámetro de la preforma	1.99E-02	m
T <sub>w</sub>	Temperatura de la pared	25	°C
T <sub>∞</sub>	Temperatura exterior	114	°C
T <sub>f</sub>	Temperatura de la película	69.5	°C
ρ <sub>f</sub>	Densidad a T <sub>f</sub>	1.024	Kg/m <sup>3</sup>
μ <sub>f</sub>	Viscosidad a T <sub>f</sub>	2.06E-05	Kg/ms
k <sub>f</sub>	Conductividad a T <sub>f</sub>	0.029	W/m°C
Pr	Número de Prandtl a T <sub>f</sub>	0.698	-----

Estos valores se obtienen por interpolación de las propiedades del aire de la tabla del anexo 1. Al sustituir los valores en y al hacer los cálculos pertinentes se obtiene un número de Reynolds de:

$$Re_f = 49488$$

Por lo tanto, las constantes C y n de la tabla 5.1 corresponden a 0.0266 y 0.805 respectivamente. Sustituyendo, el coeficiente de película es:

$$h = 209.95 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

La contribución de energía convectiva es:

$$q_{conv} = h \pi d (T_w - T_\infty)$$

$$q_{conv} = \left( 209.95 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (3.1416 * 0.01992m)(114^\circ C - 25^\circ C)$$

$$q_{conv} = 1169.35 \frac{W}{m}$$

Respecto a la transferencia de calor por radiación, se suministrará 5000 W/m<sup>2</sup> al sistema.

$$q_{rad} = 1000 \frac{W}{m^2} = 1000 * (3.1416 * 0.01992)$$

$$q_{rad} = 62.60 \frac{W}{m}$$

La transferencia de calor global es:

$$q_{total} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad}$$

Ecuación 6.1.

$$q_{total} = 0.05 \frac{W}{m} + 1169.35 \frac{W}{m} + 62.60 \frac{W}{m} = \mathbf{1232.00 \frac{W}{m}}$$

La contribución de energía que hace el proceso de conducción es despreciable con respecto a los otros dos mecanismos. En la simulación en Comsol Multiphysics® se considerará solo los procesos de radiación y convección.

### 6.1.1. PROCESO DE SIMULACIÓN DE LA PREFORMA 1

Con los valores obtenidos para el coeficiente de película y la cantidad de calor por radiación se procede a usar el módulo de transferencia de calor en sólidos de Comsol Multiphysics®.

La geometría usada es el corte transversal en dos dimensiones de la preforma debido a su simetría, este dibujo se realizó en un software de diseño y se importó a Comsol Multiphysics®. El material de toda la geometría corresponde al PET con las siguientes propiedades en estado amorfo



Figura 6.2. Geometría utilizada para la simulación de la preforma 1.

Tabla 6.2 Propiedades del PET amorfo aplicadas a toda la geometría de la preforma 1.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$\rho_f$	Densidad del PET	1370	Kg/m <sup>3</sup>
$k_f$	Conductividad del PET	0.24	W/m°C
$C_p$	Capacidad calorífica a presión constante	1200	J/Kg°C

La corona de la preforma se mantendrá aislada, esta condición se cumple gracias a las rampas de enfriamiento.

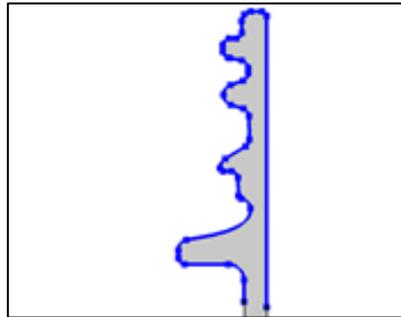


Figura 6.3. Las líneas azules representan el aislamiento térmico en la parte superior del modelo.

### 6.1.2. FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN EN LA PREFORMA 1.

Durante la transferencia de calor por convección la pared externa es la que permanece en contacto con el aire.

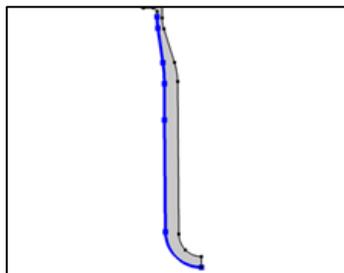


Figura 6.4. La línea azul representa la sección afectada por la transferencia de calor por convección.

Tabla 6.3. Parámetros de la simulación de la transferencia de calor por convección en la preforma 1.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$h$	Coefficiente de película	209.95	W/m <sup>2</sup>
Text	Temperatura externa	387.15	K

### 6.1.3. FLUJO DE CALOR POR RADIACIÓN EN LA PREFORMA 1.

En el flujo de calor radiactivo se afectan tanto la pared externa como la interna debido a la penetración de la luz infrarroja.

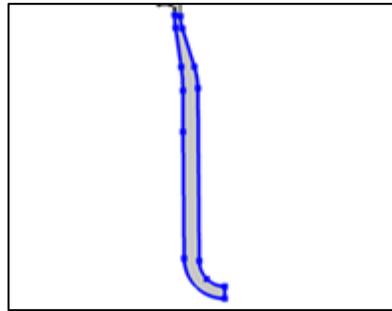


Figura 6.5. La línea azul representa la sección afectada por la transferencia de calor por radiación.

Tabla 6.4. Parámetros de la simulación de la transferencia de calor por radiación en la preforma 1.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
Q	Flujo de calor por radiación	1000	W/m <sup>2</sup> K

### 6.1.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LA PREFORMA 1.

Al término de la simulación de la transferencia de calor en la preforma 1 se obtiene la siguiente figura.

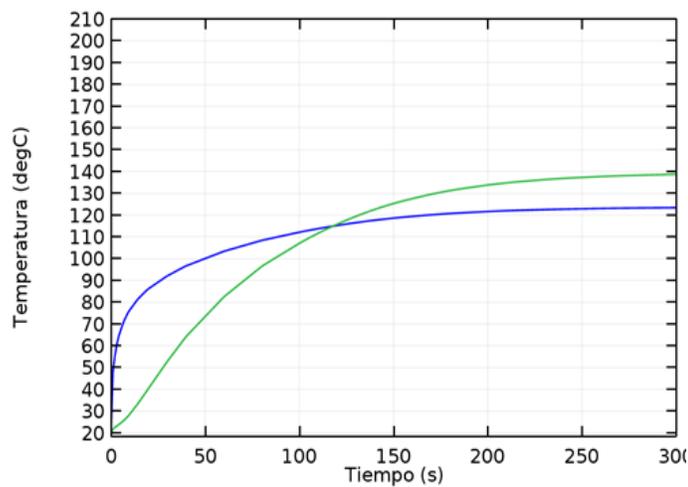


Figura 6.6. Calentamiento de las paredes de la preforma 1 a través del tiempo (línea azul externa, línea verde interna).

La línea azul representa el calentamiento de la pared externa y la línea verde el de la pared interna durante 300 segundos.

Las temperaturas se igualan alrededor de los 117 segundos con una temperatura de 115°C, estos resultados muestran que el tiempo de residencia de la preforma óptimo debe ser 2 minutos.

Las dos paredes superan la temperatura de transición vítrea (80°C) alrededor de los 60 segundos, esto sugiere realizar pruebas de apariencia en envases bajo estas condiciones y de ser satisfactorias podría aumentarse la productividad al reducir el tiempo de residencia de las preformas en el horno.



*Figura 6.7. Preforma 1 durante la simulación.*

Una simulación adicional de la misma preforma aumentando el flujo de calor radiactivo de 1000 W/m<sup>2</sup> a 5000 W/m<sup>2</sup>. La figura 6.8. muestra que las temperaturas se igualan en 41 segundos con un valor de 118°C, se consigue igualar la temperatura de las paredes en menos tiempo con un flujo mayor de calor.

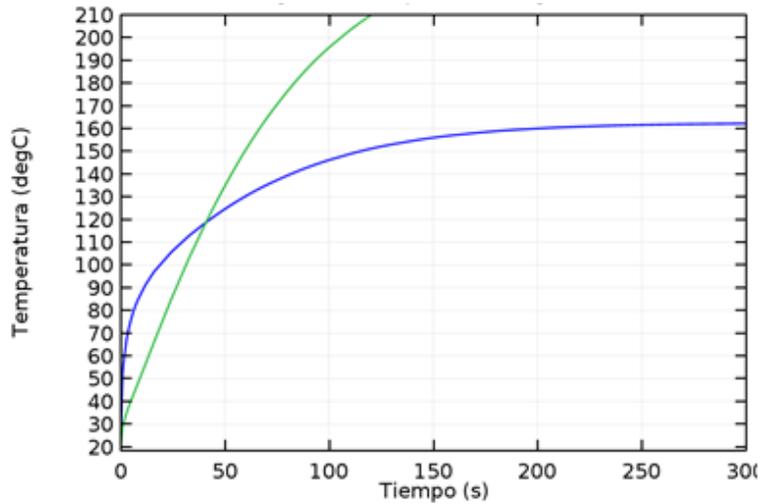


Figura 6.8. Calentamiento de las paredes de la preforma 1 a través del tiempo con 5000 W/m<sup>2</sup> de calor radiactivo (línea azul externa, línea verde interna).

## 6.2. SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA PREFORMA 2

Del mismo modo que se realizó la simulación de la preforma 1, se determinará que aportación hace cada uno de los mecanismos de transferencia de calor durante el proceso de moldeo por estirado – soplado para la preforma 2.

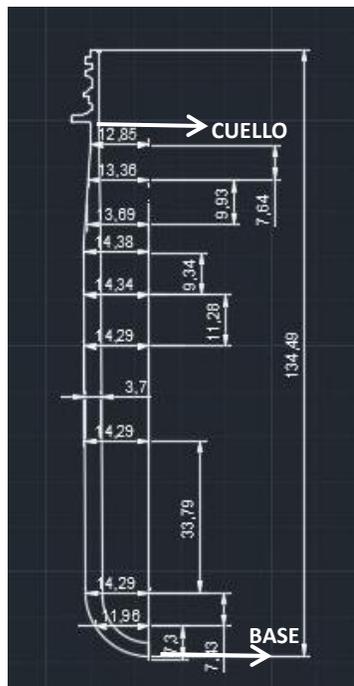


Figura 6.9. Corte transversal de la preforma 2 con algunas medidas en milímetros.

La altura total de la preforma es de 134.49 mm, el espesor de la pared en el cuerpo es de 3.7 mm mientras que el radio del cuerpo es de 14.29 mm, cabe mencionar que la simulación se hará sobre la mitad de la preforma, la imagen muestra el corte transversal del sistema.

El área transversal aproximada de la preforma es de 0.0042 m<sup>2</sup>, este valor se obtuvo como la suma de las áreas desde el cuello hasta la base de la preforma. La contribución de cada mecanismo de transferencia de calor se calcula del mismo modo que la preforma 1, se muestran los valores obtenidos:

*Tabla 6.5. Contribución de transferencia de calor en la preforma 2.*

<b>Transferencia de calor</b>	<b>Valor</b>
Conducción	0.09 W/m
Convección	1565 W/m
Radiación	89.85W/m
Total	1655 W/m

La contribución de energía que hace el proceso de conducción es despreciable con respecto a los otros dos mecanismos. En la simulación considerará solo los procesos de radiación y convección.

### **6.2.1. PROCESO DE SIMULACIÓN DE LA PREFORMA 2**

Con los valores obtenidos para el coeficiente de película y la cantidad de calor por radiación se procede a usar el módulo de transferencia de calor en sólidos en Comsol Multiphysics®. El material de toda la geometría es PET con las siguientes propiedades en estado amorfo.



Figura 6.10. Geometría utilizada para la simulación de la preforma 1.

Tabla 6.6. Propiedades del PET amorfo aplicadas a toda la geometría de la preforma 2.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$\rho_f$	Densidad del PET	1370	Kg/m <sup>3</sup>
$k_f$	Conductividad del PET	0.24	W/m°C
$C_p$	Capacidad calorífica a presión constante	1200	J/Kg°C

La corona de la preforma se mantendrá aislada, esta condición se la proporciona las rampas de enfriamiento.

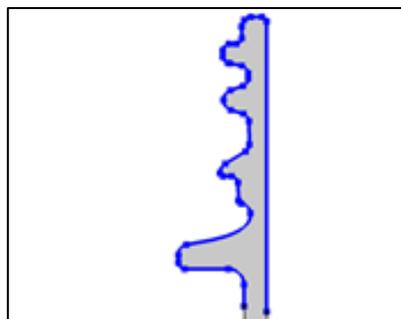


Figura 6.11. Las líneas azules representan el aislamiento térmico en la parte superior del modelo.

### 6.2.2. FLUJO DE CALOR POR CONVECCIÓN EN LA PREFORMA 2.

Durante la transferencia de calor por convección la pared externa es la que permanece en contacto con el aire.

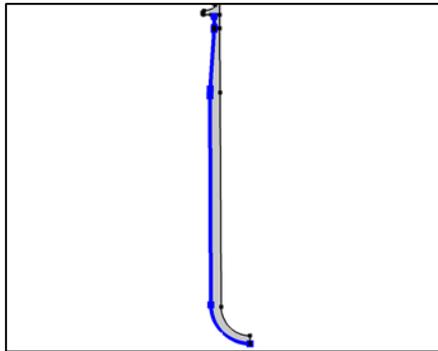


Figura 6.12. La línea azul representa la sección afectada por la transferencia de calor por convección.

Con los siguientes parámetros para la simulación:

Tabla 6.7. Parámetros de la simulación de la transferencia de calor por convección en la preforma 2.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
h	Coefficiente de película	195.66	W/m <sup>2</sup>
Text	Temperatura externa	387.15	K

### 6.2.3. FLUJO DE CALOR POR RADIACIÓN.

En el flujo de calor radiactivo se afectan tanto la pared externa como la interna debido a la penetración de la luz infrarroja.

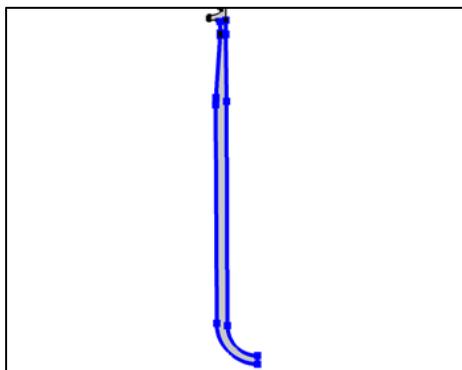


Figura 6.13. La línea azul representa la sección afectada por la transferencia de calor por radiación.

Tabla 6.8. Parámetros de la simulación de la transferencia de calor por radiación en la preforma 2.

Variable	Descripción	Valor	Unidades
Q	Flujo de calor por radiación	1000	W/m <sup>2</sup> K

#### 6.2.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LA PREFORMA 2.

Al término de la simulación de la transferencia de calor en la preforma 1 se obtiene la siguiente figura.

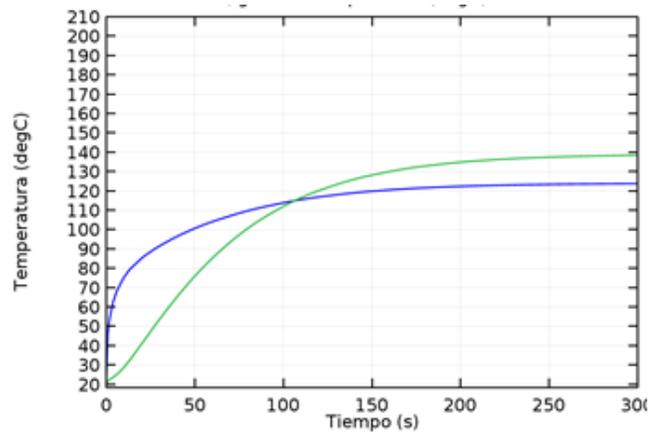


Figura 6.14. Calentamiento de las paredes de la preforma 2 a través del tiempo (línea azul externa, línea verde interna).

La línea azul representa el calentamiento de la pared externa y la línea verde el de la pared interna durante 300 segundos.

Las temperaturas se igualan alrededor de los 105 segundos con una temperatura de 115°C, estos resultados muestran que el tiempo de residencia de la preforma óptimo debe ser 2 minutos.

Las dos paredes superan la temperatura de transición vítrea (80°C) alrededor de los 54 segundos, esto sugiere realizar pruebas de apariencia en envases bajo estas condiciones y de ser satisfactorias podría aumentarse la productividad al reducir el tiempo de residencia de las preformas en el horno.



Figura 6.15. Preforma 2 durante la simulación.

Una simulación adicional de la misma preforma se realiza aumentando el flujo de calor radiactivo de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $5000 \text{ W/m}^2$ . La figura 6.16. muestra que las temperaturas se igualan en 41 segundos con un valor de  $119^\circ\text{C}$ , se consigue igualar la temperatura de las paredes en menos tiempo con un flujo mayor de calor, las dos paredes superan la temperatura de transición vítrea a los 23 segundos, pared interna  $81.73^\circ\text{C}$  y externa  $104.26^\circ\text{C}$ .

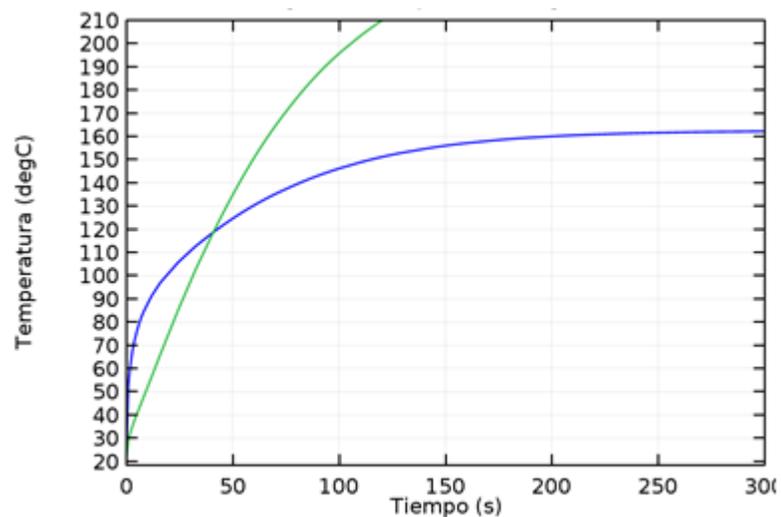


Figura 6.16. Calentamiento de las paredes de la preforma 2 a través del tiempo con  $5000 \text{ W/m}^2$  de calor radiactivo (línea azul externa, línea verde interna).

La preforma 1 es de un tamaño menor respecto a la preforma 2, al calcular la influencia de los tres mecanismos de transferencia de calor se determinó que la radiación y la convección son los que predominan, la conducción por su parte es insignificante respecto a los otros dos debido a que se trata de un espesor muy pequeño (3.72mm) y por lo tanto se desprecia, siendo la radiación la forma de transferencia que más contribuye mediante las lámparas infrarrojas en el horno de soplado.

Al simular la transferencia de calor por convección y radiación se obtuvo un perfil de temperatura tanto de la pared externa como de la pared interna en la que efectivamente las dos paredes igualan su temperatura al cabo de cierto tiempo, con el valor de la temperatura de transición vítrea (80°C) se conoce el tiempo en el que las paredes la superan y en este punto pueden hacerse pruebas de calidad para conocer las condiciones en las que se obtiene el envase, de ser satisfactorias el tiempo de procesamiento por botella podría reducirse de 2 minutos a 1 minuto bajo las condiciones descritas en las simulaciones

Una simulación adicional se basó en aumentar el flujo de calor por radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> a 5000 W/m<sup>2</sup>, con esta variación el tiempo logró reducirse aproximadamente 20 segundos, el 83% del tiempo menos que en las condiciones donde iniciales.

El aumento de calor radiactivo mediante las lámparas dentro del horno hace que el tiempo de residencia de las preformas en el mismo sea menor, si se agrega el hecho de que la preforma podrá moldearse superando la T<sub>g</sub> y no esperando a que se iguale a la temperatura de la pared interna, el tiempo podría reducirse aún más aumentando la productividad de envases, sin embargo; los defectos por cristalización inducida o esferulítica deben ser evaluados mediante pruebas de calidad formales.

# CONCLUSIONES

La influencia de los tres mecanismos de transferencia de calor en este estudio se determinó que la mayor aportación corresponde a la radiación, ya que contribuye la significativamente con la energía de las lámparas infrarrojas en el horno de soplado. Posteriormente la energía por la convección debido al movimiento del aire en el interior de la cámara y finalmente, con una aportación menor, la transferencia por conducción debido a que el espesor de la preforma es muy pequeño. La simulación permitió determinar el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de transición vítrea ideal en las paredes internas y externas de la preforma, así como alcanzar el espesor especificado por botella. Además, se observó que el aumento de flujo de calor por radiación en el horno reduce el tiempo de procesamiento aproximadamente en un 83% respecto a las condiciones normales de operación. Con esta estimación permitirá proyectar pruebas de calidad para evaluar la disminución del tiempo de procesamiento por botella y establecer nuevas condiciones de operación.

El aumento de calor por radiación mediante las lámparas del horno permite que el tiempo de residencia de las preformas sea menor. Partiendo de que la preforma puede moldearse por arriba de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). El tiempo podría reducirse aún más aumentando la productividad de envases; sin embargo; los defectos por cristalización inducida o esferulítica podrán resaltar, por lo que se deberá ser evaluados mediante pruebas de calidad formales.

Las dos preformas tienen espesores de pared muy similares a pesar de que una es más pesada también es más alta, estas consideraciones son importantes a la hora de diseñar una preforma ya que podría buscarse un espesor determinado y variar la altura de la preforma, o aplicarlo en espesores más gruesos con preformas más pequeñas.

Para el diseño de las botellas es importante conocer desde el inicio el espesor de las paredes y la masa de las preformas. Puede haber varias preformas del mismo peso con distintas alturas, en este sentido, podría no ser el mejor modelo el actual. Deberá evaluarse si existe una geometría alterna que disminuya el tiempo de procesamiento entregando un producto con buena calidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morton D.H. y Lancaster, Jones. (1993). Procesamiento de plásticos. México D.F., Editorial Limusa.
- [2] Geankopolis, Christie J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. México D.F., Compañía Editorial Continental S.A de C.V.
- [3] Holman, J.P. (1999). Transferencia de calor. México D.F., Compañía Editorial Continental S.A de C.V.
- [4] Savgorodny, V. K. (1978). Transformación de plásticos. Barcelona, Editorial Gustavo Gilli.
- [5] Crawford, R. J. (1989). Plastics Engineering. Singapur, Editorial Maxwell Mc Millan International.
- [6] Hernández Wong, Joel. (2013). Análisis de la transferencia de calor mediante la técnica Hot Wire y COMSOL Multiphysics. Tesis Dr. en tecnología avanzada. México D.F., Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. 81p.
- [7] Verdezoto Ganchozo, Richard. (2015). Estudio de proceso de secado de resina PET para inyección de preformas y reingeniería con ahorro de energía”. Informe Profesional Magíster en automatización y control industrial. Guayaquil Ecuador, Instituto Politécnico Nacional, escuela superior politécnica del litoral. 97p.
- [8] Schneider, P. J. (1955) Conduction Heat Transfer,” Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Mass.
- [9] Churchill, S. W., and M. Bernstein (1977), A Correlating Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow, J. Heat Transfer, vol. 99, pp. 300-306.
- [10] Crawford, Russell; Webb, Hayden, K.; Arnott, Jaimys; Ivanova, Elena P. (2013). Plastic degradation and its environmental implications with special reference. Polymers 5 (1). ISSN 2073-4360.
- [11] Pilato, Louis (2010). Phenolic Resins: A century of Progress. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 518. ISBN 978-3-642-04714-5.
- [12] Abdelaal, Magdy Y.; Sobahi, Tariq R.; Makki, Mohamed S. I (2008). Chemical degradation of Poly Ethylene Terephthalate. International Journal of Polymeric Materials (57). ISSN 0091-4037.
- [13] Scheirs, John; Long, Timothy E. (2003). Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters. Wiley, pp. 788, ISBN: 978-0-471-49856-8.

- [14] K.D. Maglic, A. Cezairliyan, V.E. Peletsky (1984), Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods, Plenum Press, Volume 1.
- [15] D. Turnbull (1969). Under what conditions can a glass be formed? Contemporary Physics 10:473-488.
- [16] Schmidt, E. (1932): Messung der Gesamtstrahlung des Wasserdampfes bei Temperaturen bis 1000°C, Forsch. Geb. Zingenieurwes., vol. 3, p. 57.
- [17] Schmidt, E., and E. R. G. Eckert (1935): Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen, Forsch. Geb. Zingenieurwes., vol. 6, p. 175.
- [18] Coulson, J. M.; Richardson, J. F. (1999). Chemical Engineering Volume 1, 6ta edición. Elsevier.
- [19] Sparrow, E. M., and R. D. Cess (1966): Radiation Heat Transfer, Wadsworth Publishing Co., Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- [20] Çengel, Yunus A. y John M. CIMBALA (2006), "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ra edición, McGraw-Hill.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

### PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN

ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

Propiedades del aire a 1 atm de presión							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para gases ideales,  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de  $\rho$  a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen  $\nu$  y  $\alpha$  entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

## ANEXO 2

### INTERPOLACIÓN DE DATOS

La ecuación que se utiliza para interpolar los datos es la siguiente:

$$y = y_1 + \left[ \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1) \right]$$

El uso de esta fórmula es para conocer los valores intermedios en las propiedades del aire que se usa durante la transferencia de calor por convección específicamente para conocer el valor del coeficiente de película.

En el anexo 1 se muestra la tabla de propiedades del aire a distintas temperaturas. El objetivo es conocer el valor de las propiedades a la temperatura de película.

Ejemplo:

Se desea conocer el valor del número de Prandtl a la temperatura de película de 345 K.

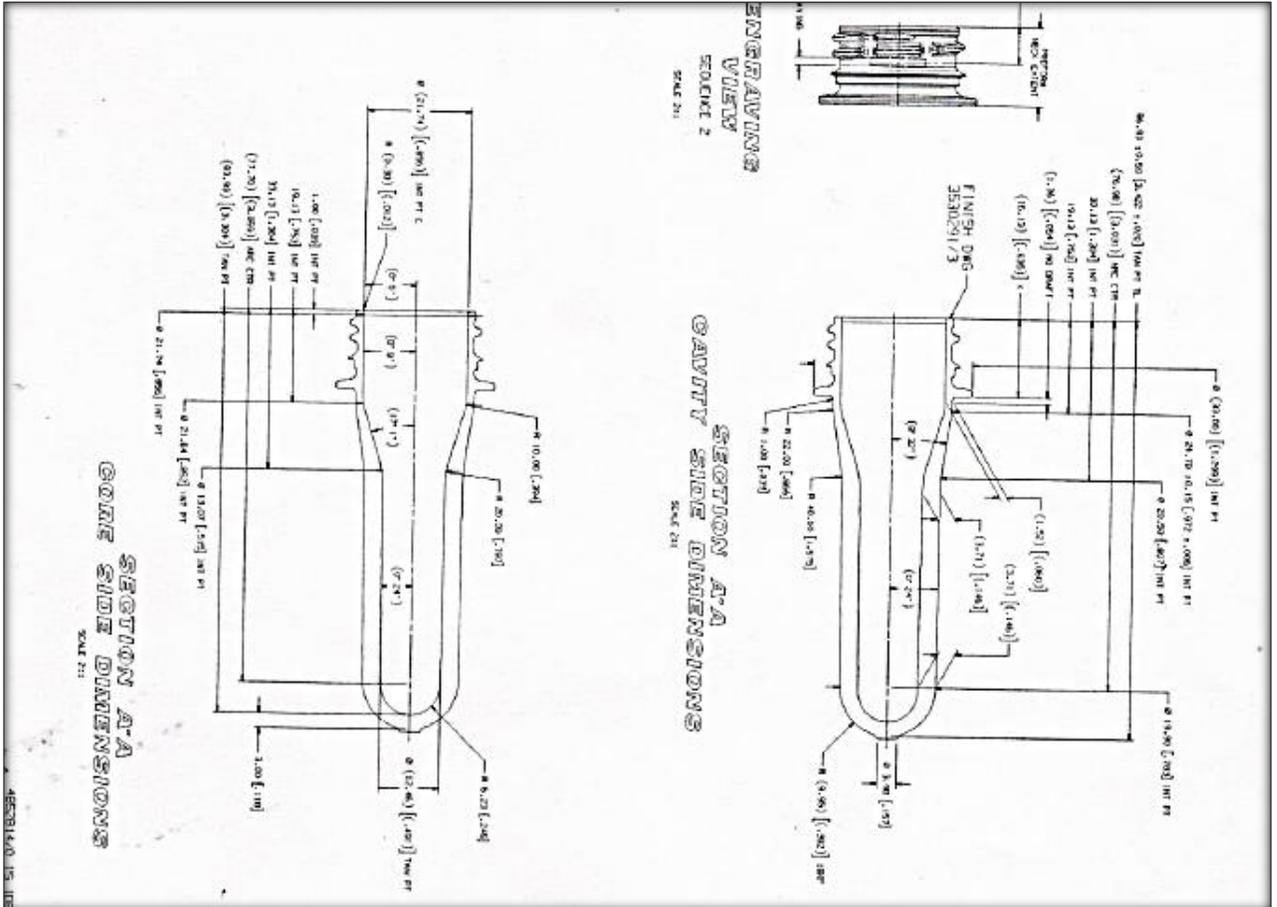
De la tabla del anexo 1 tenemos que  $y_1=0.708$ ,  $x_1=300$ , también que  $y_2=0.697$ ,  $x_2=350$ . El valor de  $x=345$ , para conocer el valor de  $y$  se aplica la ecuación descrita anteriormente.

$$y = 0.708 + \left[ \left( \frac{345 - 300}{350 - 300} \right) (0.697 - 0.708) \right]$$

El resultado es: 0.698.

# ANEXO 3

## PLANO MECÁNICO DE LA PREFORMA 1





## ANEXO 5

### VALORES DE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA VS TIEMPO EN LA PREFORMA 1

TIEMPO s	T PARED EXTERNA °C	T PARED INTERNA °C
0	20.085	20.004
1	47.542	21.766
2	54.922	22.498
3	60.201	23.125
4	64.092	23.717
5	66.783	24.402
6	69.297	25.101
7	71.573	25.855
8	73.364	26.718
9	75.155	27.582
10	76.459	28.641
11	77.633	29.753
12	78.807	30.864
13	79.980	31.976
14	81.154	33.088
15	82.104	34.292
16	82.961	35.534
17	83.817	36.777
18	84.674	38.019
19	85.531	39.262
20	86.226	40.506
21	86.823	41.752
22	87.420	42.998
23	88.018	44.244
24	88.615	45.490
25	89.212	46.736
26	89.809	47.982
27	90.407	49.228
28	91.004	50.474
29	91.601	51.720
30	92.137	52.922
31	92.601	54.072
32	93.064	55.221
33	93.528	56.371
34	93.991	57.521

35	94.455	58.671
36	94.919	59.820
37	95.382	60.970
38	95.846	62.120
39	96.309	63.270
40	96.734	64.348
41	97.068	65.255
42	97.401	66.163
43	97.735	67.070
44	98.068	67.978
45	98.402	68.886
46	98.735	69.793
47	99.069	70.701
48	99.402	71.608
49	99.735	72.516
50	100.069	73.424
51	100.402	74.331
52	100.736	75.239
53	101.069	76.147
54	101.403	77.054
55	101.736	77.962
56	102.070	78.869
57	102.403	79.777
58	102.737	80.685
59	103.070	81.592
60	103.404	82.500
61	103.655	83.203
62	103.904	83.899
63	104.152	84.595
64	104.401	85.292
65	104.649	85.988
66	104.898	86.684
67	105.146	87.381
68	105.395	88.077
69	105.643	88.773
70	105.892	89.469
71	106.140	90.166
72	106.389	90.862

73	106.637	91.558
74	106.886	92.255
75	107.134	92.951
76	107.383	93.647
77	107.632	94.344
78	107.880	95.040
79	108.129	95.736
80	108.377	96.432
81	108.586	97.021
82	108.774	97.549
83	108.961	98.077
84	109.148	98.605
85	109.335	99.133
86	109.522	99.661
87	109.709	100.188
88	109.897	100.716
89	110.084	101.244
90	110.271	101.772
91	110.458	102.300
92	110.645	102.828
93	110.832	103.356
94	111.020	103.884
95	111.207	104.412
96	111.394	104.940
97	111.581	105.468
98	111.768	105.996
99	111.955	106.524
100	112.143	107.052
101	112.324	107.564
102	112.493	108.040
103	112.660	108.511
104	112.825	108.977
105	112.989	109.438
106	113.151	109.895
107	113.311	110.347
108	113.469	110.794
109	113.626	111.237
110	113.781	111.674
111	113.935	112.107

112	114.087	112.535
113	114.237	112.959
114	114.385	113.377
115	114.532	113.791
116	114.677	114.200
117	114.820	114.605
118	114.962	115.004
119	115.102	115.399
120	115.240	115.789
121	115.376	116.175
122	115.511	116.555
123	115.644	116.931
124	115.776	117.302
125	115.906	117.668
126	116.034	118.030
127	116.160	118.387
128	116.285	118.739
129	116.408	119.086
130	116.529	119.428
131	116.649	119.767
132	116.768	120.101
133	116.885	120.431
134	117.000	120.756
135	117.114	121.076
136	117.226	121.392
137	117.336	121.703
138	117.445	122.009
139	117.552	122.311
140	117.658	122.608
141	117.761	122.901
142	117.864	123.188
143	117.964	123.471
144	118.063	123.750
145	118.160	124.023
146	118.256	124.293
147	118.350	124.557
148	118.442	124.817
149	118.533	125.072
150	118.622	125.322

## ANEXO 6

VALORES DE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA VS TIEMPO EN LA PREFORMA 1 CON 5000 W/m<sup>2</sup> EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.

TIEMPO s	T PARED EXTERNA °C	T PARED INTERNA °C
0	20.018	20.018
1	28.773	28.773
2	32.433	32.433
3	35.403	35.403
4	37.948	37.948
5	40.339	40.339
6	42.675	42.675
7	44.955	44.955
8	47.251	47.251
9	49.569	49.569
10	51.886	51.886
11	54.204	54.204
12	56.530	56.530
13	58.890	58.890
14	61.250	61.250
15	63.611	63.611
16	65.969	65.969
17	68.257	68.257
18	70.546	70.546
19	72.834	72.834
20	75.122	75.122
21	77.411	77.411
22	79.699	79.699
23	81.987	81.987
24	84.276	84.276
25	86.459	86.459
26	88.584	88.584
27	90.709	90.709
28	92.834	92.834
29	94.959	94.959
30	97.084	97.084
31	99.209	99.209
32	101.334	101.334
33	103.407	103.407

34	105.334	105.334
35	107.262	107.262
36	109.189	109.189
37	111.116	111.116
38	113.044	113.044
39	114.971	114.971
40	116.898	116.898
41	118.826	118.826
42	120.678	120.678
43	122.503	122.503
44	124.309	124.309
45	126.097	126.097
46	127.867	127.867
47	129.618	129.618
48	131.351	131.351
49	133.065	133.065
50	134.761	134.761
51	136.439	136.439
52	138.098	138.098
53	139.739	139.739
54	141.362	141.362
55	142.966	142.966
56	144.551	144.551
57	146.119	146.119
58	147.665	147.665
59	149.177	149.177
60	150.668	150.668
61	152.139	152.139
62	153.589	153.589
63	155.019	155.019
64	156.428	156.428
65	157.816	157.816
66	159.185	159.185
67	160.532	160.532
68	161.859	161.859
69	163.166	163.166
70	164.452	164.452

71	165.718	165.718
72	166.963	166.963
73	168.188	168.188
74	169.392	169.392
75	170.588	170.588
76	171.790	171.790
77	172.975	172.975
78	174.144	174.144
79	175.297	175.297
80	176.433	176.433
81	177.553	177.553
82	178.657	178.657
83	179.744	179.744
84	180.815	180.815
85	181.870	181.870
86	182.908	182.908
87	183.930	183.930
88	184.936	184.936
89	185.926	185.926
90	186.899	186.899
91	187.855	187.855
92	188.796	188.796
93	189.720	189.720
94	190.627	190.627
95	191.519	191.519
96	192.394	192.394
97	193.252	193.252
98	194.095	194.095
99	194.921	194.921
100	195.730	195.730
101	196.524	196.524
102	197.301	197.301
103	198.061	198.061
104	198.806	198.806
105	199.555	199.555
106	200.329	200.329
107	201.091	201.091
108	201.840	201.840
109	202.577	202.577
110	203.301	203.301

111	204.014	204.014
112	204.713	204.713
113	205.401	205.401
114	206.075	206.075
115	206.738	206.738
116	207.388	207.388
117	208.026	208.026
118	208.651	208.651
119	209.264	209.264
120	209.864	209.864
121	210.453	210.453
122	211.028	211.028
123	211.592	211.592
124	212.143	212.143
125	212.681	212.681
126	213.207	213.207
127	213.721	213.721
128	214.222	214.222
129	214.711	214.711
130	215.188	215.188
131	215.652	215.652
132	216.104	216.104
133	216.543	216.543
134	216.970	216.970
135	217.407	217.407
136	217.877	217.877
137	218.339	218.339
138	218.792	218.792
139	219.237	219.237
140	219.675	219.675
141	220.104	220.104
142	220.525	220.525
143	220.937	220.937
144	221.342	221.342
145	221.738	221.738
146	222.127	222.127
147	222.507	222.507
148	222.879	222.879
149	223.243	223.243
150	223.599	223.599

## ANEXO 7

### VALORES DE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA VS TIEMPO EN LA PREFORMA 2

TIEMPO s	T PARED EXTERNA °C	T PARED INTERNA °C
0	20.058	20.003
1	47.369	21.717
2	55.374	22.471
3	59.932	23.087
4	64.053	23.713
5	67.154	24.363
6	69.611	25.140
7	71.557	26.017
8	73.503	26.894
9	75.405	27.787
10	76.770	28.875
11	78.134	29.964
12	79.499	31.052
13	80.584	32.251
14	81.476	33.526
15	82.368	34.801
16	83.260	36.076
17	84.152	37.351
18	85.044	38.626
19	85.936	39.901
20	86.682	41.194
21	87.340	42.498
22	87.998	43.803
23	88.656	45.107
24	89.314	46.411
25	89.972	47.715
26	90.630	49.019
27	91.203	50.288
28	91.731	51.537
29	92.260	52.787
30	92.789	54.037
31	93.317	55.287
32	93.846	56.536
33	94.374	57.786
34	94.880	59.008

35	95.369	60.210
36	95.850	61.400
37	96.321	62.581
38	96.785	63.751
39	97.240	64.911
40	97.686	66.060
41	98.124	67.199
42	98.554	68.328
43	98.975	69.446
44	99.387	70.554
45	99.791	71.652
46	100.187	72.739
47	100.574	73.816
48	100.959	74.866
49	101.338	75.898
50	101.710	76.917
51	102.074	77.923
52	102.431	78.915
53	102.781	79.894
54	103.123	80.860
55	103.458	81.812
56	103.786	82.751
57	104.106	83.677
58	104.419	84.589
59	104.724	85.489
60	105.022	86.375
61	105.313	87.247
62	105.615	88.115
63	105.916	88.973
64	106.213	89.819
65	106.506	90.652
66	106.794	91.474
67	107.078	92.284
68	107.357	93.082
69	107.632	93.869
70	107.903	94.643
71	108.170	95.405
72	108.432	96.156

73	108.690	96.895
74	108.944	97.621
75	109.193	98.336
76	109.438	99.039
77	109.678	99.730
78	109.915	100.409
79	110.146	101.076
80	110.374	101.732
81	110.597	102.375
82	110.816	103.007
83	111.031	103.626
84	111.241	104.234
85	111.447	104.830
86	111.649	105.414
87	111.846	105.986
88	112.039	106.546
89	112.227	107.094
90	112.427	107.667
91	112.624	108.231
92	112.818	108.787
93	113.008	109.333
94	113.195	109.870
95	113.379	110.398
96	113.560	110.916
97	113.737	111.425
98	113.912	111.925
99	114.083	112.415
100	114.250	112.896
101	114.415	113.368
102	114.576	113.831
103	114.734	114.284
104	114.889	114.728
105	115.041	115.163
106	115.189	115.589
107	115.334	116.005
108	115.476	116.412
109	115.615	116.810
110	115.751	117.198
111	115.883	117.577

112	116.012	117.947
113	116.138	118.308
114	116.260	118.659
115	116.380	119.001
116	116.496	119.334
117	116.610	119.661
118	116.736	120.020
119	116.859	120.372
120	116.981	120.718
121	117.101	121.057
122	117.218	121.391
123	117.333	121.718
124	117.446	122.039
125	117.557	122.354
126	117.666	122.662
127	117.773	122.965
128	117.877	123.261
129	117.980	123.550
130	118.080	123.834
131	118.178	124.111
132	118.275	124.382
133	118.369	124.647
134	118.461	124.906
135	118.550	125.158
136	118.638	125.405
137	118.724	125.644
138	118.807	125.878
139	118.888	126.106
140	118.968	126.327
141	119.045	126.542
142	119.120	126.751
143	119.192	126.953
144	119.263	127.149
145	119.334	127.347
146	119.412	127.564
147	119.488	127.778
148	119.563	127.987
149	119.636	128.193
150	119.708	128.394

## ANEXO 8

VALORES DE LA GRÁFICA DE TEMPERATURA VS TIEMPO EN LA PREFORMA 2 CON 5000 W/m<sup>2</sup> EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.

TIEMPO s	T PARED EXTERNA °C	T PARED INTERNA °C
0	20.101	20.018
1	52.629	28.773
2	61.683	32.433
3	67.979	35.403
4	72.372	37.948
5	76.005	40.339
6	79.149	42.675
7	81.803	44.955
8	84.124	47.251
9	85.956	49.569
10	87.787	51.886
11	89.618	54.204
12	91.359	56.530
13	92.767	58.890
14	94.176	61.250
15	95.584	63.611
16	96.984	65.969
17	98.031	68.257
18	99.078	70.546
19	100.125	72.834
20	101.172	75.122
21	102.219	77.411
22	103.265	79.699
23	104.312	81.987
24	105.359	84.276
25	106.279	86.459
26	107.127	88.584
27	107.975	90.709
28	108.824	92.834
29	109.672	94.959
30	110.520	97.084
31	111.368	99.209
32	112.217	101.334
33	113.032	103.407

34	113.752	105.334
35	114.473	107.262
36	115.193	109.189
37	115.914	111.116
38	116.634	113.044
39	117.354	114.971
40	118.075	116.898
41	118.795	118.826
42	119.482	120.678
43	120.155	122.503
44	120.821	124.309
45	121.477	126.097
46	122.126	127.867
47	122.766	129.618
48	123.398	131.351
49	124.021	133.065
50	124.636	134.761
51	125.242	136.439
52	125.841	138.098
53	126.430	139.739
54	127.012	141.362
55	127.584	142.966
56	128.149	144.551
57	128.705	146.119
58	129.253	147.665
59	129.794	149.177
60	130.327	150.668
61	130.851	152.139
62	131.368	153.589
63	131.876	155.019
64	132.376	156.428
65	132.867	157.816
66	133.351	159.185
67	133.826	160.532
68	134.293	161.859
69	134.752	163.166
70	135.203	164.452

71	135.645	165.718
72	136.079	166.963
73	136.505	168.188
74	136.923	169.392
75	137.340	170.588
76	137.764	171.790
77	138.182	172.975
78	138.594	174.144
79	139.001	175.297
80	139.401	176.433
81	139.796	177.553
82	140.186	178.657
83	140.569	179.744
84	140.947	180.815
85	141.318	181.870
86	141.684	182.908
87	142.045	183.930
88	142.399	184.936
89	142.748	185.926
90	143.091	186.899
91	143.428	187.855
92	143.760	188.796
93	144.085	189.720
94	144.405	190.627
95	144.719	191.519
96	145.027	192.394
97	145.330	193.252
98	145.627	194.095
99	145.917	194.921
100	146.203	195.730
101	146.482	196.524
102	146.756	197.301
103	147.023	198.061
104	147.285	198.806
105	147.550	199.555
106	147.823	200.329
107	148.092	201.091
108	148.356	201.840
109	148.616	202.577
110	148.872	203.301

111	149.124	204.014
112	149.371	204.713
113	149.614	205.401
114	149.852	206.075
115	150.087	206.738
116	150.317	207.388
117	150.542	208.026
118	150.763	208.651
119	150.980	209.264
120	151.192	209.864
121	151.401	210.453
122	151.604	211.028
123	151.804	211.592
124	151.999	212.143
125	152.190	212.681
126	152.376	213.207
127	152.558	213.721
128	152.736	214.222
129	152.909	214.711
130	153.078	215.188
131	153.243	215.652
132	153.403	216.104
133	153.559	216.543
134	153.711	216.970
135	153.866	217.407
136	154.033	217.877
137	154.197	218.339
138	154.358	218.792
139	154.516	219.237
140	154.671	219.675
141	154.824	220.104
142	154.974	220.525
143	155.120	220.937
144	155.264	221.342
145	155.405	221.738
146	155.544	222.127
147	155.679	222.507
148	155.812	222.879
149	155.941	223.243
150	156.068	223.599