



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE PRESIÓN Y
TEMPERATURA EN EL PROCESO DE MOLDEO POR
INYECCIÓN DE POLIPROPILENO EN LA FABRICACIÓN
DE TAPAS PARA MEJORAR LOS ÍNDICES DE CALIDAD**

Letty Alejandra Castillo Reyna

Asesorado por: Inga. Wendy Corado Falla

Guatemala, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE PRESIÓN Y
TEMPERATURA EN EL PROCESO DE MOLDEO POR
INYECCIÓN DE POLIPROPILENO EN LA FABRICACIÓN
DE TAPAS PARA MEJORAR LOS ÍNDICES DE CALIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LETTY ALEJANDRA CASTILLO REYNA

ASESORADO POR: INGA. WENDY CORADO FALLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Ing. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Thelma Maricela Cano Morales
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establecen la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE PRESIÓN Y
TEMPERATURA EN EL PROCESO DE MOLDEO POR
INYECCIÓN DE POLIPROPILENO EN LA FABRICACIÓN
DE TAPAS PARA MEJORAR LOS ÍNDICES DE CALIDAD,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de marzo de 2006.

Letty Alejandra Castillo Reyna

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. GENERALIDADES	1
1.1. Proceso de moldeo	1
1.1.1. Moldeo por inyección	1
1.1.2. Moldeo por extrusión	2
1.1.3. Moldeo por soplado	3
1.1.4. Moldeo por vacío	4
1.1.5. Calandrado	4
1.2. Máquina de inyección para moldeo de plásticos	5
1.2.1. Descripción del equipo	5
1.2.1.1. Unidad de cierre	5
1.2.1.2. Unidad de inyección	7
1.2.1.3. Unidad de potencia	8
1.2.1.3.1. Sistema de potencia eléctrico	8
1.2.1.3.2. Sistema de potencia hidráulico	9
1.2.1.4. Unidad de control	9
1.2.2. Descripción del proceso	10
1.2.2.1. Primera etapa	10
1.2.2.2. Segunda etapa	10
1.2.2.3. Tercera etapa	11

1.2.2.4.	Cuarta etapa	12
1.2.2.5.	Quinta etapa	12
1.2.2.6.	Sexta etapa	13
1.2.3.	Datos generales del equipo	13
1.2.4.	Servicios requeridos para el funcionamiento	14
1.2.4.1.	Sistema eléctrico	14
1.2.4.2.	Sistema de aire comprimido	14
1.2.4.3.	Sistema de agua	14
1.2.5.	Documentos disponibles del equipo	14
1.3.	Resina de polipropileno	15
1.3.1.	Estructura del polipropileno	16
1.3.1.1.	Mecanismo de reacción	18
1.3.1.2.	Propiedades del polipropileno	19
1.3.1.2.1.	Dispersión de pesos moleculares	19
1.3.1.2.2.	Viscosidad-características reológicas	20
1.3.1.2.3.	Cristalinidad-propiedades mecánicas	20
1.3.1.3.	Grados del polímero	20
1.3.1.3.1.	Homopolímeros	20
1.3.1.3.2.	Copolímeros azar	21
1.3.1.3.3.	Copolímeros bloque	21
1.3.1.3.4.	Cauchos EPR	21
1.3.1.3.5.	Copolímeros especiales	21
1.3.1.4.	Compuestos y mezclas	22
1.3.2.	Procesos de fabricación de polipropileno	22
1.3.2.1.	Destilación del polipropileno	23
1.3.2.2.	Proceso Novelen	26
1.3.2.3.	Proceso LIPP	27
1.3.2.4.	Proceso <i>Spheripol</i>	28
1.3.3.	Aplicaciones generales del polipropileno	29

1.3.3.1.	Aplicaciones en la industria automotriz	31
1.3.4.	Datos generales de la resina utilizada	32
1.3.5.	Propiedades de la resina	32
1.3.6.	Especificaciones del fabricante	33
1.3.6.1.	Aplicaciones	33
1.3.6.2.	Proceso de fabricación	34
1.3.7.	Características de la resina	34
1.3.7.1.	Información toxicológica	34
1.3.7.2.	Información ecológica	35
1.3.7.3.	Identificación de peligros	35
1.3.7.4.	Medidas de primeros auxilios	36
1.3.7.5.	Medidas de lucha contra incendios	36
1.3.7.6.	Manipulación, almacenamiento y eliminación	37
2.	VARIABLES DEL PROCESO	39
2.1.	Metodología	39
2.1.1.	Diseño experimental	39
2.1.1.1.	Método: estadístico muestral	39
2.1.2.	Recursos	40
2.1.3.	Muestreo	40
2.1.4.	Procedimiento	41
2.2.	Definición de variables	42
2.2.1.	Temperaturas	43
2.2.1.1.	Temperaturas de boquilla (1-3)	43
2.2.1.2.	Temperaturas de barril (5-8)	43
2.2.2.	Presión de inyección	44
2.2.3.	Índices de calidad	44
2.2.3.1.	Defectos de calidad	45
2.2.3.2.	Cálculo de índices de calidad	45

3. RESULTADOS	47
3.1. Optimización de las temperaturas y presión de inyección por medio de los índices de calidad	47
3.2. Cálculos estadísticos obtenidos mediante datos experimentales de los parámetros de control	48
3.3. Relación entre la presión de inyección y las temperaturas con los defectos del producto	49
3.4. Curvas de temperatura y presión de inyección con respecto a los índices de calidad	51
4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	61
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICE	77
A. Muestra de cálculo	77
B. Otros datos experimentales	78
C. Datos originales	84
D. Datos calculados	86
ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de moldeo por inyección	2
2.	Proceso de moldeo por extrusión	3
3.	Proceso de moldeo por soplado	4
4.	Máquina de inyección	5
5.	Unidad de cierre de una inyectora	6
6.	Mecanismos de unidad de cierre	6
7.	Esquema del proceso de inyección	7
8.	Fenómeno de plastificación	8
9.	Cierre de molde e inicio de inyección	10
10.	Inyección del material	11
11.	Aplicación de la presión de sostenimiento	11
12.	Plastificación del material	12
13.	Enfriamiento y extracción de la pieza	13
14.	Diagrama del proceso de destilación del polipropileno	24
15.	Diagrama del proceso Novelen	26
16.	Diagrama del proceso LIPP	27
17.	Diagrama del proceso Spheripol	29
18.	Histograma de la temperatura de boquilla 1	51
19.	Histograma de la temperatura de boquilla 2	52
20.	Histograma de la temperatura de boquilla 3	52
21.	Histograma de la temperatura de barril 4	53
22.	Histograma de la temperatura de barril 5	53
23.	Histograma de la temperatura de barril 6	54

24.	Histograma de la temperatura de barril 7	54
25.	Histograma de la temperatura de barril 8	55
26.	Histograma de la presión de inyección	55
27.	Histograma de los índices de calidad	56
28.	Optimización de la temperatura de boquilla 1	56
29.	Optimización de la temperatura de boquilla 2	57
30.	Optimización de la temperatura de boquilla 3	57
31.	Optimización de la temperatura de barril 4	58
32.	Optimización de la temperatura de barril 5	58
33.	Optimización de la temperatura de barril 6	59
34.	Optimización de la temperatura de barril 7	59
35.	Optimización de la temperatura de barril 8	60
36.	Optimización de la presión de inyección	60
37.	Histograma del tiempo de inyección	78
38.	Histograma de la velocidad de inyección	79
39.	Histograma del peso de las tapas del molde 1	79
40.	Histograma del peso de las tapas del molde 2	80
41.	Histograma del peso de las tapas del molde 3	80
42.	Histograma del peso de las tapas del molde 4	81
43.	Histograma del tiempo de enfriamiento	81
44.	Histograma del tiempo de sostenimiento	82
45.	Histograma de la presión de sostenimiento	82
46.	Histograma de la velocidad de dosificación	83
47.	Participación de los mercados en el consumo estimado I	89
48.	Participación de los mercados en el consumo estimado II	89
49.	Participación de los mercados en el consumo estimado III	90
50.	Participación de los mercados en el consumo estimado IV	90
51.	Participación de los mercados en el consumo estimado V	91
52.	Distribución por materiales del total de embalajes	91

TABLAS

I.	Datos generales de la inyectora	13
II.	Datos disponibles del equipo	14
III.	Compuestos eliminados en el proceso de destilación	25
IV.	Datos generales de la resina	32
V.	Propiedades generales de la resina	32
VI.	Propiedades físicas de la resina	33
VII.	Propiedades físicas de las piezas moldeadas	33
VIII.	Obtención de muestras	41
IX.	Datos de optimización de temperaturas y presión de inyección	47
X.	Cálculos estadísticos de los parámetros de control	48
XI.	Defectos principales en las piezas moldeadas, causas y soluciones	49
XII.	Datos originales utilizados para la optimización	84
XIII.	Datos originales de otros datos experimentales	85
XIV.	Datos calculados para la optimización	86

GLOSARIO

Barril	Cubierta cilíndrica donde el tornillo rota, incluyendo el material superficial interno integralmente formado, o el trazador de líneas reemplazable, si se usa. También comúnmente conocido como cilindro.
Boquilla	Parte cónica que transporta el material plastificado hacia el molde.
Carcinógeno	Agente o sustancia que puede actuar sobre los tejidos vivos de tal forma que produce cáncer. Generalmente, el término se refiere a aquellos agentes que han sido introducidos por el hombre, pero puede usarse para toda sustancia que tiende a causar cáncer.
Cristalinidad	Estado en la estructura molecular de algunos polímeros que denota uniformidad y compatibilidad de las cadenas moleculares que conforman el polímetro.
Destilación	Operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla, aprovechando las diferencias de volatilidades de los compuestos a separar.
Desviación estándar	Medida estadística de dispersión (precisión).
Histograma	Representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los

valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.

Inyección Consiste en introducir el plástico granulado dentro de un cilindro, donde se calienta. En el interior del cilindro hay un tornillo sinfín que actúa de igual manera que el émbolo de una jeringuilla. Cuando el plástico se reblandece lo suficiente, el tornillo sinfín lo inyecta a alta presión en el interior de un molde de acero para darle forma. El molde y el plástico inyectado se enfrían mediante unos canales interiores por los que circula agua.

Media aritmética Cantidad total de la variable distribuida en partes iguales entre cada observación.

No-conformidad Incumplimiento de un requisito.

Olefina Hidrocarburos que tienen doble enlace carbono-carbono en su molécula, y por eso son denominados insaturados. La fórmula genérica es C_nH_{2n} .

Optimización Proceso que busca determinar un valor específico de cada uno de los parámetros de control que produzca la mejor calidad.

Compuestos organometálicos Compuesto en el que los átomos de carbono forman enlaces covalentes, es decir, comparten electrones, con un átomo metálico.

Polimerización	Proceso químico por el que los reactivos monómeros (compuestos de bajo peso molecular), se agrupan químicamente entre sí dando lugar a una molécula de gran peso llamada polímero; bien una cadena lineal; o una macromolécula tridimensional.
Rebaba	Resalte o aleta fina de plástico formada a los lados de una pieza, como sobrante, en donde estaban las juntas del molde.
Slurry	Fluido no homogéneo con alta concentración de sólidos suspendidos.
Termoplástico	Material que se ablanda cuando se calienta y se endurece cuando se enfría. Un termoplástico típico son los polímeros sintéticos y copolímeros, acrílicos, polietileno polipropileno, vinilo, nylon y varios materiales de flurocarbono.
Tornillo sin fin	Eje con forma de hélice y con filetes que rota dentro del barril para trabajar mecánicamente y hace avanzar el material mientras se procesa.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación relaciona la presión de inyección y las diferentes temperaturas de las zonas de calentamiento y moldeo, con la calidad del producto final en un proceso de moldeo de plásticos por inyección para la fabricación de tapas, obteniendo con ello parámetros de control del proceso para mejorar así los índices de calidad del producto final.

Los datos experimentales que fueron utilizados son: la presión de inyección y las diferentes temperaturas de las zonas de calentamiento y moldeo, durante la obtención de estos datos se realizó una inspección de calidad para cada una de las corridas y se determinaron índices de calidad y defectos principales de las tapas. Luego se realizaron correlaciones y curvas (gráficos) de las variables ya mencionadas con los índices de calidad, obteniendo, así, datos de presión y temperaturas óptimas experimentales para moldear polipropileno.

Estos datos de la optimización produjeron los parámetros de control del proceso y relaciones entre la presión de inyección y las temperaturas, con los defectos del producto, para determinar la relación entre los defectos más comunes de las piezas y las variables claves del proceso.

OBJETIVOS

- **General:**

Optimizar la presión y las temperaturas en un proceso de moldeo por inyección, para utilizar estas variables como parámetros de control en cualquier tipo de proceso de moldeo en el que se utilice resina de polipropileno como materia prima, para mejorar los índices de calidad.

- **Específicos:**

1. Obtener datos experimentales, simultáneamente, entre la presión de inyección, temperaturas de las diferentes zonas de calentamiento e inyección y los defectos que afecten la calidad final del producto.
2. Relacionar la presión de inyección y las temperaturas con los defectos del producto, para tener parámetros de comparación entre los defectos y las variables del proceso.
3. Establecer curvas de temperatura y presión (gráficos) con respecto a los índices de calidad, obtenidos de defectos del producto, para determinar su interrelación.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la industria de plásticos se ha incrementado notablemente, sustituyendo gran número de productos de acero, latón, vidrio y madera, entre otros materiales. Técnicamente, los plásticos son sustancias de origen orgánico formadas por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno, principalmente. Se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas, de origen sintético o natural, y es posible moldearlos mediante procesos de transformación, aplicando calor y presión.

El moldeo de plástico tiene dos parámetros de control principales: la temperatura y la presión; ambos deben ser monitoreados durante todo el proceso, ya que estos dos parámetros influyen de manera directa en el manejo del material, moldeo de la pieza y en la calidad final de la misma. Por ello, es necesario determinar la presión y temperaturas óptimas de moldeo de material fundido, para poder tener parámetros de control ya establecidos, los cuales pueden utilizarse en cualquiera de los procesos de moldeo de plásticos más comunes; los cuales son: inyección, extrusión y soplado.

Con este proyecto se espera optimizar la presión y las temperaturas en un proceso de moldeo por inyección, para utilizar estas variables como parámetros de control en cualquier tipo de proceso de moldeo en el que se utilice resina de polipropileno como materia prima para mejorar los índices de calidad.

1. GENERALIDADES

1.1. Procedimientos de moldeo

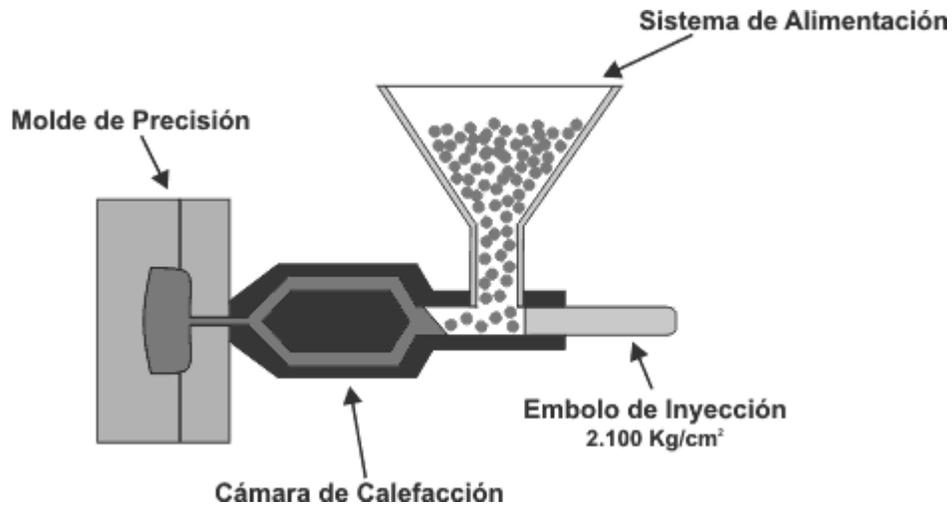
A partir de los polímeros y de acuerdo con el tipo de artículo que se desea confeccionar se emplean distintos procedimientos, siendo los principales:

- Moldeo por inyección
- Moldeo por extrusión
- Moldeo por soplado
- Moldeo por vacío
- Calandrado

1.1.1. Moldeo por inyección

Un émbolo o pistón de inyección se mueve rápidamente hacia adelante y hacia atrás para empujar el plástico ablandado por el calor a través del espacio existente entre las paredes del cilindro y una pieza recalentada y situada en el centro de aquél. Esta pieza central se emplea, dada la pequeña conductividad térmica de los plásticos, de forma que la superficie de calefacción del cilindro es grande y el espesor de la capa plástica calentada es pequeño. Bajo la acción combinada del calor y la presión ejercida por el pistón de inyección, el polímero es lo bastante fluido como para llegar al molde frío donde toma forma la pieza en cuestión. El polímero estará lo suficiente fluido como para llenar el molde frío. Pasado un tiempo breve dentro del molde cerrado, el plástico solidifica, el molde se abre y la pieza es removida. El ritmo de producción es muy rápido, de escasos segundos.

Figura 1. **Proceso de moldeo por inyección**

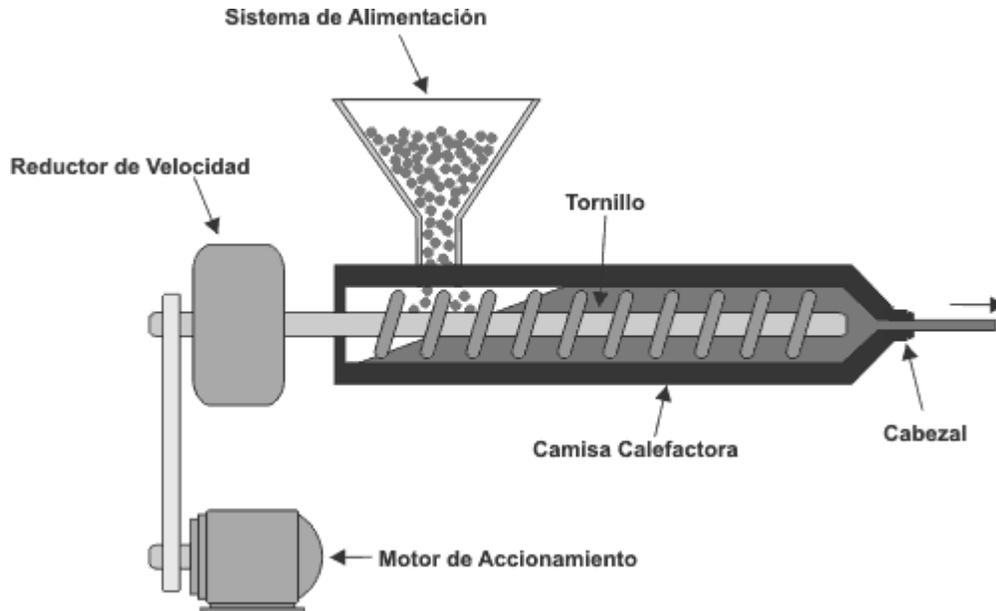


Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/moldeado>

1.1.2. Moldeo por extrusión

En el moldeo por extrusión se utiliza un transportador de tornillo helicoidal. El polímero es transportado desde la tolva, a través de la cámara de calentamiento, hasta la boca de descarga, en una corriente continua. A partir de gránulos sólidos, el polímero emerge de la matriz de extrusión en un estado blando. Como la abertura de la boca de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada.

Figura 2. **Proceso de moldeo por extrusión**



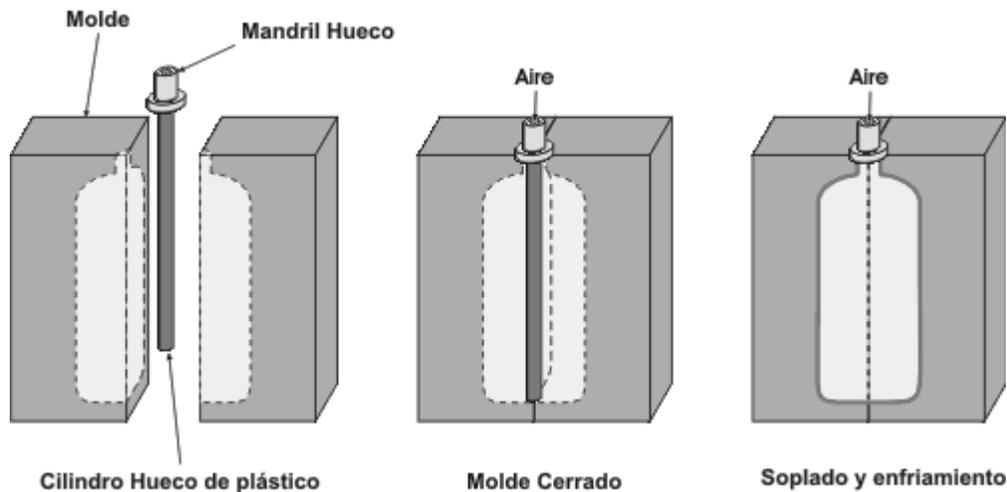
Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/moldeado>

En este proceso se funde polietileno de baja densidad. El fundido es extruído a través de una matriz anular. Se introduce aire inflando el tubo del polímero extruído para formar una burbuja del diámetro requerido, la que es enfriada por una corriente de aire. El film es arrastrado por un par de rodillos que aplastan la burbuja manteniendo así el aire empleado para inflar la burbuja dentro de ella.

1.1.3. Moldeo por soplado

Es un proceso usado para hacer formas huecas (botellas, recipientes). Un cilindro plástico de paredes delgadas es extruído y luego cortado en el largo que se desea. Luego el cilindro se coloca en un molde que se cierra sobre el polímero ablandado y le suprime su parte inferior cortándola. Una corriente de aire o vapor es insuflado por el otro extremo y expande el material hasta llenar la cavidad. El molde es enfriado para el fraguado.

Figura 3. **Proceso de moldeo por soplado**



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/moldeado>

1.1.4. Moldeo por vacío

Mediante este proceso se comprime una chapa de resina termoplástica ablandada por el calor contra un molde frío. La chapa toma y conserva la forma del molde. Este método se emplea para revestimientos interiores (puertas de heladeras, gabinetes, etc.)

1.1.5. Calandrado

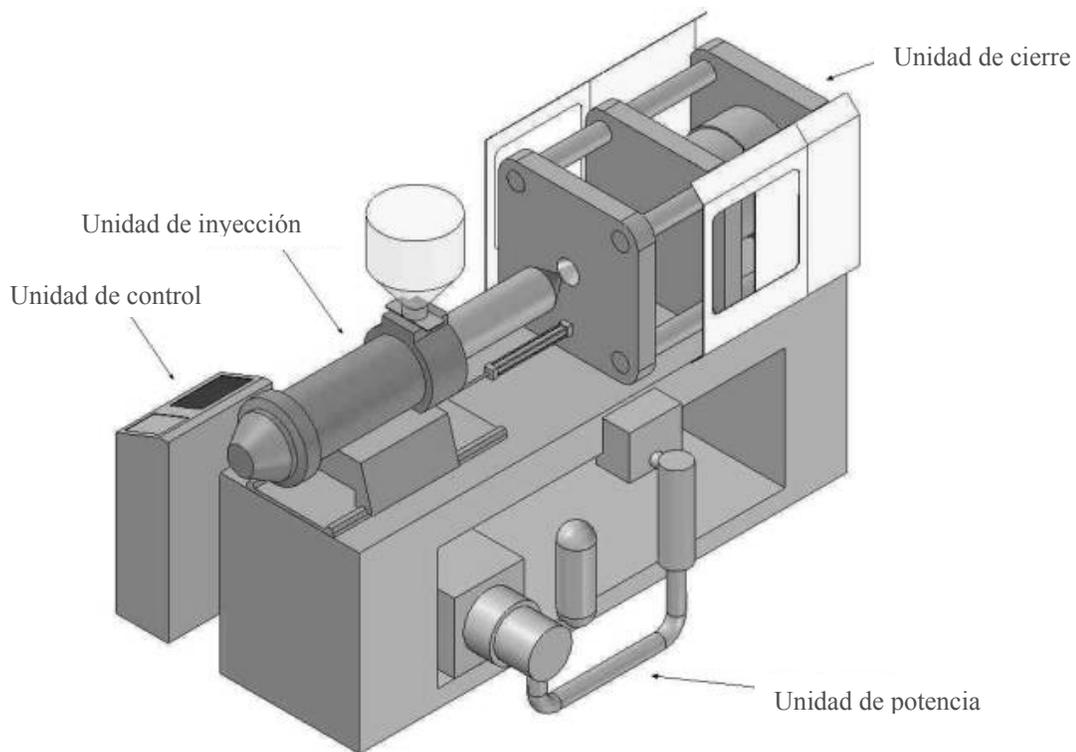
El proceso se emplea para la fabricación de chapas y películas plásticas. Consiste en pasar un polímero convertido en una masa blanda entre una serie de rodillos calentados. A medida que el polímero pasa a través de los rodillos se forma un producto uniforme. El último par de rodillos se ajustan para dar el espesor deseado. El sistema de rodillos de enfriamiento da a las chapas o películas su estructura molecular permanente.

1.2. Máquina de inyección para moldeo de plásticos

1.2.1. Descripción del equipo

Una máquina de inyección es un equipo capaz de plastificar material polimérico en forma de resina y bombearlo hacia un molde en donde llena una cavidad y adquiere la forma del producto deseado. Una inyectora se compone de cuatro unidades principales:

Figura 4. Máquina de inyección



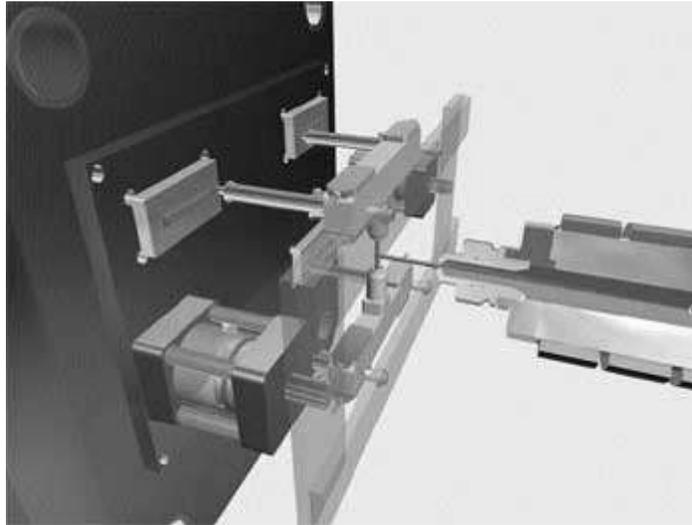
Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/maquina.html

1.2.1.1. Unidad de cierre

Consiste en una prensa conformada por dos placas porta-moldes, una móvil y otra fija. El sistema de accionamiento de la placa móvil puede ser un mecanismo de palancas acodadas, accionado hidráulicamente, un cilindro hidráulico o un sistema eléctrico de

tornillo sin fin accionado por un motor. El parámetro fundamental para dimensionar una unidad de cierre es su fuerza para mantener el molde cerrado.

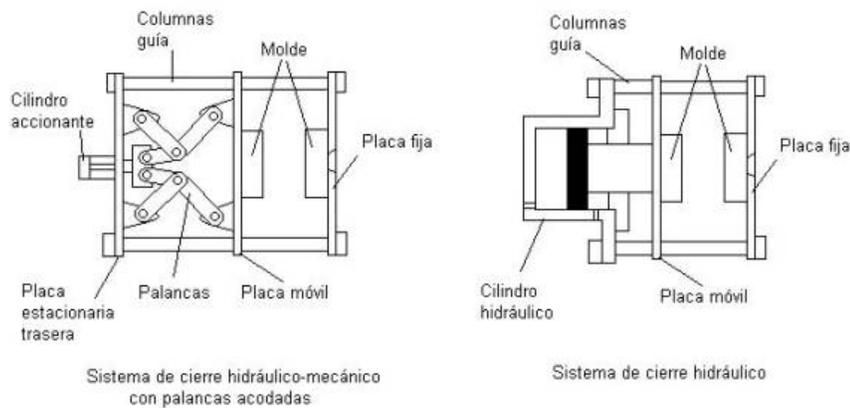
Figura 5. **Unidad de cierre de una inyectora**



Fuente: <http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=13308>

Usualmente se da este valor en toneladas (ton). Otros parámetros importantes en una unidad de cierre son: la distancia mínima entre placas, la distancia máxima de apertura, las dimensiones de las placas y la distancia entre columnas, la carrera del sistema de expulsión. Estos datos se utilizan para dimensionar los moldes.

Figura 6. **Mecanismos de unidad de cierre**

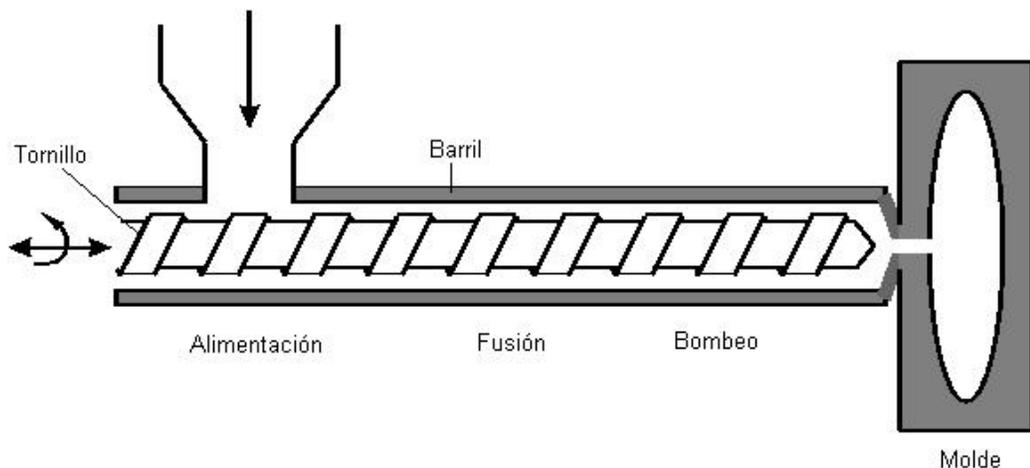


Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/maquina.html

1.2.1.2. Unidad de inyección

La unidad de inyección está conformada por el tornillo y el barril de inyección, la boquilla y las resistencias alrededor del barril. El material sólido ingresa por la tolva a la zona de alimentación del tornillo, en esta zona es transportado, por efecto de la rotación del tornillo dentro del barril, hacia la zona de fusión donde se plastifica; finalmente el material es bombeado hacia la parte delantera del tornillo en la zona de dosificación. Durante el proceso de plastificación del material el tornillo gira constantemente. Cuando se va a realizar la inyección hacia el molde, el tornillo deja de girar y actúa a manera de pistón, haciendo fluir el plástico fundido hacia el molde y llenando las cavidades.

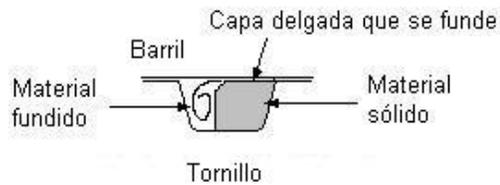
Figura 7. Esquema del proceso de inyección



Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/maquina.html

La conductividad térmica de los plásticos es muy inferior a la de los metales, por lo que su procesamiento debe hacerse en capas delgadas para que la transferencia de calor sea lo más rápida posible y sostenible económicamente. Esto se logra aprovechando el fenómeno de plastificación, que consiste en la fusión de la capa de material directamente en contacto con la superficie del barril, la cual transmite el calor, por convección forzada, al material sólido en las capas inferiores hasta que se plastifica completamente la masa de material.

Figura 8. Fenómeno de plastificación



Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/maquina.html

En las inyectoras comerciales aproximadamente un 50% del calor requerido para fundir el material lo aporta la fricción viscosa, generada por el giro del tornillo con respecto al barril, y el otro 50% lo aportan las resistencias eléctricas.

1.2.1.3. Unidad de potencia

Es el sistema que suministra la potencia necesaria para el funcionamiento de la unidad de inyección y de la unidad de cierre. Los principales tipos de sistemas de potencia se pueden clasificar como:

1.2.1.3.1. Sistema de potencia eléctrico: El sistema eléctrico se utiliza generalmente en máquinas relativamente pequeñas. Este sistema se emplea tanto para el giro del tornillo como para la apertura y cierre del molde. La máquina emplea dos sistemas mecánicos de engranajes y palancas acodadas, uno para el cierre del molde y otro para el tornillo. Cada uno accionado por un motor eléctrico independiente. El accionamiento del tornillo cuando realiza la inyección lo ejecuta un cilindro hidráulico. En los sistemas con motor eléctrico, la velocidad puede ajustarse sólo en un determinado número de valores, lo cual puede ocasionar problemas en la reproducción de parámetros de operación y dificultar la obtención de piezas con una calidad constante. Los motores eléctricos generan grandes torques de arranque, por lo que debe tenerse precaución al usar tornillos con diámetros pequeños para evitar que se rompan.

1.2.1.3.2. Sistema de potencia hidráulico: Los motores hidráulicos son los más comúnmente utilizados, su funcionamiento se basa en la transformación de la potencia hidráulica del fluido en potencia mecánica. A diferencia de los sistemas electromecánicos, donde la potencia es transmitida a través de engranajes y palancas, en un sistema con fluidos estos elementos se sustituyen, parcial o totalmente, por tuberías de conducción que llevan el fluido a presión a los pistones de inyección y de cierre del molde. El fluido que más se utiliza es el aceite, debido principalmente, a sus propiedades lubricantes en aplicaciones que involucran grandes cargas. En los sistemas hidráulicos es común utilizar presiones que varían entre los 70 y 140 kg/cm².

Las ventajas del motor hidráulico con respecto al eléctrico pueden resumirse principalmente en:

- Fácil variación de velocidades, regulando el volumen de fluido.
- La relación entre el torque y la velocidad es aproximadamente lineal. El límite de torque se determina por la presión limitante y el torque de arranque es aproximadamente igual al de funcionamiento.
- Permite arranques y paradas rápidos debido al pequeño momento de inercia.
- Permite relaciones bajas de peso potencia, lo que posibilita alcanzar altas velocidades de inyección del material.

1.2.1.4. Unidad de control

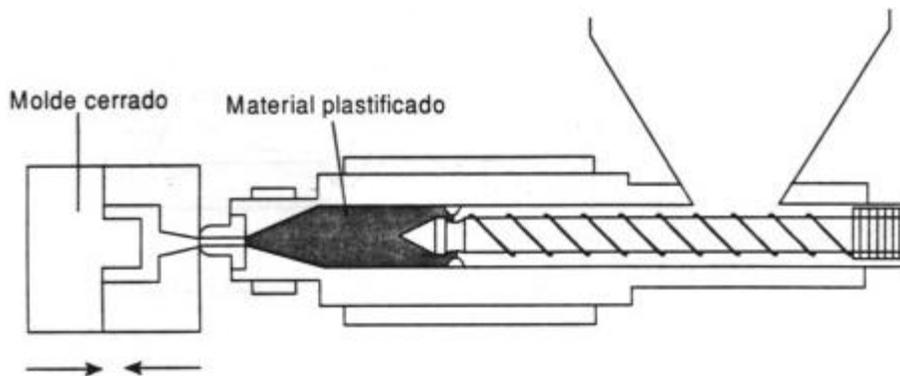
Este sistema básicamente contiene un controlador lógico programable (PLC) y controladores PID para las resistencias eléctricas del barril y de la boquilla. El PLC permite programar la secuencia del ciclo de inyección y recibe señales de alarma, por sobre-presión o finales de carrera, para detener el ciclo. Los controladores PID son los más adecuados para el control de temperatura debido a su elevada velocidad de respuesta para mantener la temperatura a los niveles requeridos.

1.2.2. Descripción del proceso

1.2.2.1. Primera etapa

Se cierra el molde vacío, mientras se tiene lista la cantidad de material fundido para inyectar dentro del barril. El molde se cierra en tres pasos: primero con alta velocidad y baja presión, luego se disminuye la velocidad y se mantiene la baja presión hasta que las dos partes del molde hacen contacto, finalmente se aplica la presión necesaria para alcanzar la fuerza de cierre requerida.

Figura 9. Cierre del molde e inicio de inyección

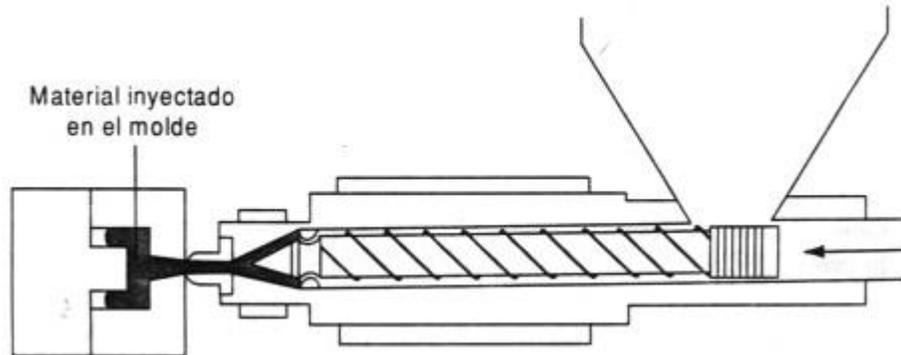


Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/ciclo.html

1.2.2.2. Segunda etapa

El tornillo inyecta el material, actuando como pistón, sin girar, forzando el material a pasar a través de la boquilla hacia las cavidades del molde con una determinada presión de inyección.

Figura 10. **Inyección del material**

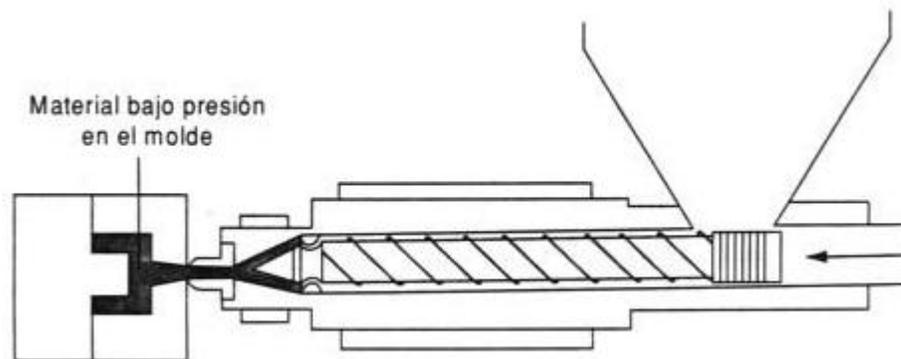


Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/ciclo.html

1.2.2.3. Tercera etapa

Al terminar de inyectar el material, se mantiene el tornillo adelante aplicando una presión de sostenimiento antes de que se solidifique, con el fin de contrarrestar la contracción de la pieza durante el enfriamiento. La presión de sostenimiento, usualmente, es menor que la de inyección y se mantiene hasta que la pieza comienza a solidificarse.

Figura 11. **Aplicación de la presión de sostenimiento**

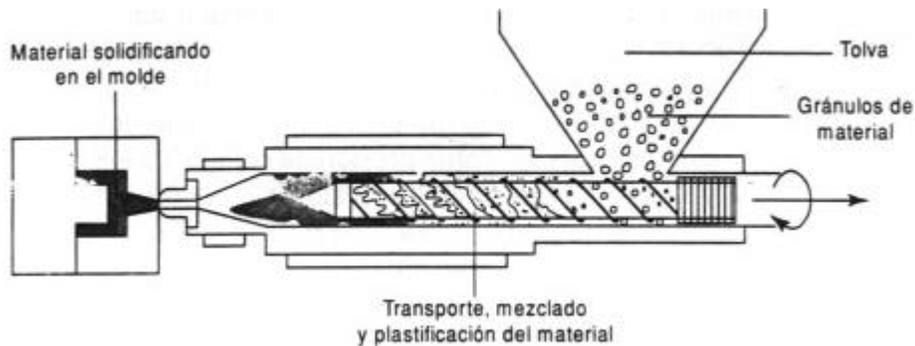


Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/ciclo.html

1.2.2.4. Cuarta etapa

El tornillo gira haciendo circular los gránulos de plástico desde la tolva y plastificándolos. El material fundido es suministrado hacia la parte delantera del tornillo, donde se desarrolla una presión contra la boquilla cerrada, obligando al tornillo a retroceder hasta que se acumula el material requerido para la inyección.

Figura 12. **Plastificación del material**

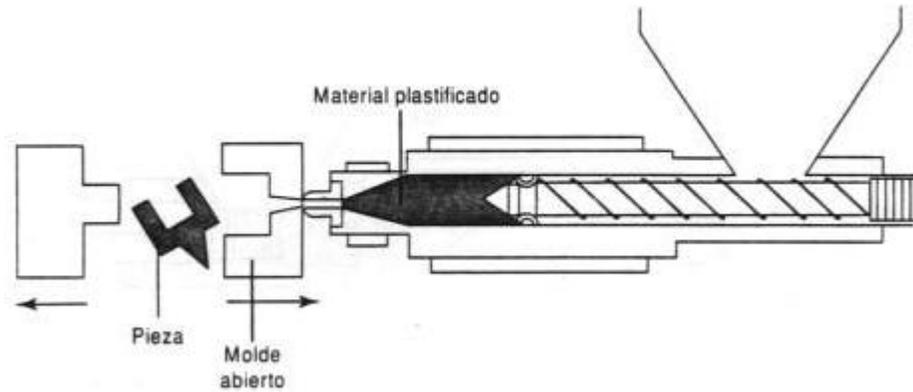


Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/ciclo.html

1.2.2.5. Quinta etapa

El material dentro del molde se continúa enfriando en donde el calor es disipado por el fluido refrigerante. Una vez terminado el tiempo de enfriamiento, la parte móvil del molde se abre y la pieza es extraída.

Figura 13. **Enfriamiento y extracción de la pieza**



Fuente: http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/ciclo.html

1.2.2.6. Sexta etapa

El molde cierra y se reinicia el ciclo.

1.2.3. Datos generales del equipo

Tabla I. **Datos generales de la inyectora**

Nombre	Máquina de moldeo por inyección de plástico
Fabricante	Engel S.A
Modelo #	ES 700/250
Capacidad	250 TONS
Volts	460 V
Hz	60 Hz
Amperaje	104 amps.

1.2.4. Servicios requeridos para el funcionamiento del equipo

1.2.4.1. Sistema eléctrico

El funcionamiento de toda la máquina depende completamente del sistema eléctrico de tipo trifásico y con un voltaje de 460 V.

1.2.4.2. Sistema de aire comprimido

Utilizado en la puerta de protección, el seguro de cierre mecánico, el molde de expulsión y el llenado automático.

1.2.4.3. Sistema de agua

El sistema de agua se utiliza en la placa porta moldes fija para mantener fríos los moldes metálicos y en el molde de inyección para el enfriamiento del objeto formado en el proceso.

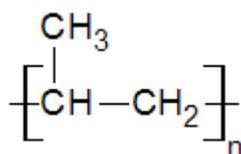
1.2.5. Documentos disponibles del equipo

Tabla II. **Documentos disponibles del equipo**

Código de Manual	Título
EC88/CC90-A02	Manual técnico Engel Molding Machine
EC88/CC90-A02	Manual de operación Engel Molding Machine
ES 700/ 250/ CC90-EL-PKG	Manual de mantenimiento Engel Molding Machine
ES 700/ 250/ CC90-EL-PKG	Manual de la máquina & piezas Engel Molding Machine

1.3. Resina de polipropileno

El polipropileno es un termoplástico semicristalino, que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estereo específico. El polipropileno tiene múltiples aplicaciones, por lo que es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor desarrollo en el futuro. Es un producto inerte, totalmente reciclable, su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental. Esta es una característica atractiva frente a materiales alternativos.



La polimerización catalítica del propileno fue descubierta por el italiano Giulio Natta en 1954 y marcó un notable hito tanto por su interés científico, como por sus importantes aplicaciones en el ámbito industrial. Empleando catalizadores selectivos, se obtuvo un polímero cristalino formado por la alineación ordenada de moléculas de propileno monómero. Los altos rendimientos de reacción permitieron su rápida explotación comercial. Aunque el polipropileno fue dado a conocer a través de patentes y publicaciones en 1954, su desarrollo comercial comenzó en 1957 y fue debido a la empresa italiana Montecatini. Pocos años más tarde, otras empresas, entre ellas I.C.I. y Shell fabricaban también dicha poliolefina.

Este descubrimiento impulsó la investigación de los sistemas catalíticos estereoespecíficos para la polimerización de olefinas y le otorgó a Natta, junto al alemán Karl Ziegler, el premio Nobel de química en 1963.

Hoy en día el polipropileno es uno de los termoplásticos más vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en los mercados.

La buena acogida que ha tenido ha estado directamente relacionada con su versatilidad, sus buenas propiedades físicas y la competitividad económica de sus procesos de producción. Varios puntos fuertes lo confirman como material idóneo para muchas aplicaciones:

- Baja densidad
- Alta dureza y resistente a la abrasión
- Alta rigidez
- Buena resistencia al calor
- Excelente resistencia química
- Excelente versatilidad

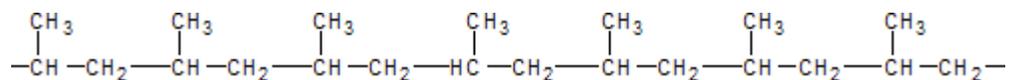
Por la excelente relación entre sus prestaciones y su precio, el polipropileno ha sustituido gradualmente a materiales como el vidrio, los metales o la madera, así como polímeros de amplio uso general (ABS y PVC).

Las principales compañías petroleras del mundo producen polipropileno, bien sea por participación directa, o por medio de filiales. En el transcurso de los últimos años el volumen de negocio del polipropileno ha ido creciendo de manera significativa, tanto en el mundo como dentro del grupo.

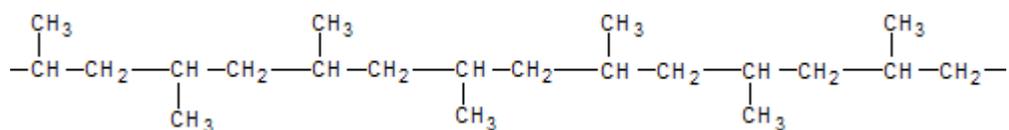
1.3.1. Estructura del polipropileno

Estructuralmente es un polímero vinílico, similar al polietileno, sólo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo.

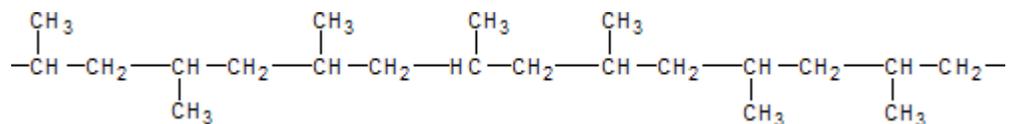
El polipropileno fabricado de manera industrial es un polímero lineal, cuya espina dorsal es una cadena de hidrocarburos saturados. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal, se encuentra ramificado un grupo metilo (CH_3). Esto permite distinguir tres formas isómeras del polipropileno:



Isotáctica



Sindiotáctica



Atáctica

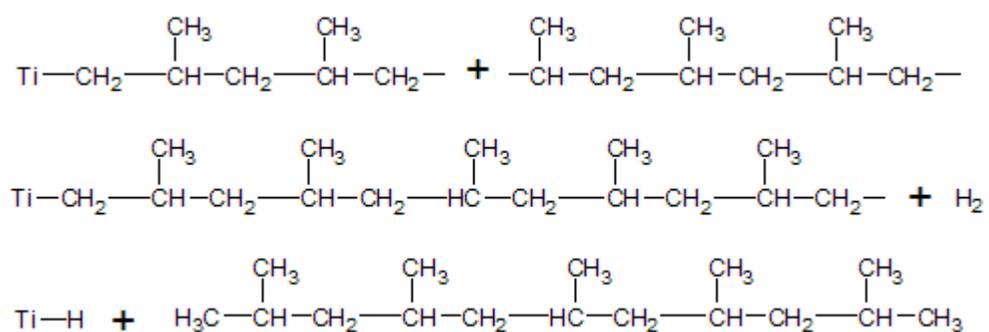
Estas se diferencian por la posición de los grupos metilo- CH_3 con respecto a la estructura espacial de la cadena del polímero.

Las formas isotácticas y sindiotácticas, dada su gran regularidad, tienden a adquirir en estado sólido una disposición espacial ordenada, semicristalina, que confiere al material unas propiedades físicas excepcionales. La forma atáctica, en cambio, no tiene ningún tipo de cristalinidad. Los procesos industriales más empleados están dirigidos hacia la fabricación de polipropileno isotáctico que es el que ha despertado mayor interés comercial.

1.3.1.1. Mecanismo de reacción

La polimerización del propileno es una reacción de adición que emplea catalizadores de coordinación. Estos son compuestos de metales de transición que, por medio de enlaces metal-carbono, permiten la inserción de unidades de monómero. Uno de los primeros sistemas desarrollados fue del tipo $TiCl_4/A_1R_3$. Aunque a partir de éste los sistemas catalíticos han evolucionado de manera significativa y sus rendimientos han aumentado de manera impresionante, el principio de funcionamiento de todos ellos es muy similar.

Los mecanismos de reacción del sistema catalítico son los que explican la estructura lineal de la molécula de polipropileno. Aunque todavía se debaten algunos detalles, la mayoría de investigadores admite que el inicio de la reacción viene dado por la activación del sistema catalítico según un modelo descrito detalladamente por Cossee y Arlman. Una vez creados los sitios activos, las cadenas de polímero crecen en etapas sucesivas sobre el catalizador, al formarse un complejo de coordinación entre la molécula de propileno monómero y una casilla de coordinación vacante. La reacción suele terminarse por transferencia, gracias a la acción de agentes como el hidrógeno. El empleo de estos agentes es bastante útil para controlar la longitud promedio de las cadenas de polímero formadas y, por ende, su peso molecular, su viscosidad en fundido, etc.



La reacción es altamente regio-selectiva, lo que significa que las cadenas de monómero se incorporan en la cadena principal formando configuraciones bien definidas (isotácticas, sindiotácticas o atácticas). La introducción de compuestos donadores de electrones suele crear grupos estéricamente voluminosos alrededor de los centros activos del catalizador, por lo que la formación de una de las configuraciones suele estar favorecida (generalmente la isotáctica).

Si durante la polimerización sólo se introduce propileno monómero, obtendremos un homopolímero. Si se introduce junto, al propileno un segundo monómero (o comonómero), se obtiene un copolímero. El comonómero más ampliamente utilizado es el etileno. Se distinguen dos tipos de copolímeros: Los copolímeros al azar (en donde monómero y comonómero se hacen reaccionar simultáneamente) y los copolímeros bloque, o heterogéneos (donde monómero y comonómero se introducen en dos etapas sucesivas).

En la actualidad se está viviendo una revolución en el mundo del polipropileno con el desarrollo industrial de una nueva generación de catalizadores: los metallocenos. Se trata de una nueva familia de compuestos organometálicos que controlan con mayor precisión la regularidad de la estructura del polímero formado y su distribución de pesos moleculares. Los productos así obtenidos tendrán propiedades diferenciadas que podrán complementar la gama actual.

1.3.1.2. Propiedades del Polipropileno

1.3.1.2.1. Dispersión de pesos moleculares: Como en la síntesis de otros polímeros, la longitud de las cadenas de polipropileno creadas en una misma partida no es uniforme. Se obtiene una dispersión de pesos moleculares más o menos amplia, que condiciona las propiedades mecánicas del grado producido. La distribución de pesos moleculares viene restringida por los procesos de

fabricación, por las condiciones de operación, y sobre todo por los sistemas catalíticos empleados. En sistemas Ziegler Natta es común encontrar distribuciones consideradas anchas, comparadas con aquellas de los polímeros fabricados con las nuevas generaciones de catalizadores metallocenos.

1.3.1.2.2. Viscosidad - Características reológicas: La viscosidad en fundido es, junto con la dispersión de pesos moleculares, una de las características más importantes a la hora de la caracterización de los grados de polipropileno, ya que influye directamente sobre las condiciones de procesado, y por ello sobre la economía de los procesos. Una manera de caracterizar la viscosidad de los productos es por medio de un ensayo normalizado llamado índice de fluidez. Cuanto mayor es el índice de fluidez, menor es la viscosidad. Está relacionado de manera inversa con el peso molecular del polímero.

1.3.1.2.3. Cristalinidad - Propiedades mecánicas: Al tratarse de moléculas altamente lineales, las moléculas de polipropileno tienden a tomar en estado sólido una estructura ordenada, semicristalina. Las moléculas forman cadenas largas y estables, con altos pesos moleculares. Esta es la que le confiere sus propiedades mecánicas excepcionales, en particular en lo que respecta a la dureza, la resistencia a la tracción y la rigidez.

1.3.1.3. Grados del Polímero:

1.3.1.3.1. Homopolímeros: Se fabrican introduciendo propileno en un único reactor. Tienen en general una buena serie de propiedades mecánicas y por ello se les suele emplear para fabricar objetos con densidad baja, alta rigidez, alto punto de fusión y por ello, temperaturas de servicio altas.

1.3.1.3.2. Copolímeros azar: Se fabrican introduciendo simultáneamente propileno y etileno en un mismo reactor (el contenido en etileno suele ser bajo). Este hecho hace que las cadenas de polímero estén formadas por mezclas al azar de unidades de etileno y de propileno. Tienen, como los homopolímeros, buenas propiedades en general, aunque destacan su mayor transparencia, su mejor resistencia al impacto y su menor punto de fusión. Estas propiedades condicionan las aplicaciones a las que están dirigidos, siendo una de las más conocidas los envases alimentarios.

1.3.1.3.3. Copolímeros bloque: Se fabrican en dos etapas, produciendo inicialmente homopolímero en un primer reactor, y sobre éste un copolímero al azar en un segundo reactor. De esta manera se obtiene un producto mezcla, donde se encuentran dos fases diferenciadas pero estrechamente unidas. Por sus buenas propiedades de resistencia al impacto se les denomina también copolímeros de impacto. Tienen una rigidez inferior a la del homopolímero y se les destina a aplicaciones como parachoques, maletas o contenedores.

1.3.1.3.4. Cauchos EPR- (Ethylene-propylene rubber): Los ya denominados cauchos etileno propileno son copolímeros con un alto contenido en etileno, que se caracteriza por su baja cristalinidad y por sus propiedades elastoméricas. Suelen emplearse como mejoradores de impacto en mezclas con otros polímeros.

1.3.1.3.5. Copolímeros especiales: Algunos procesos particulares permiten preparar copolímeros de propileno con comonomeros diferentes, como buteno, hexeno, octeno, norborneno, etc. Estos productos suelen ir dirigidos a mercados específicos, en donde se emplean como mejoradores de impacto o como compatibilizantes con otras resinas.

1.3.1.4. Compuestos y mezclas

Como otros termoplásticos, el polipropileno permite ser procesado y tratado fuera del reactor después del proceso de síntesis. Es común entonces verle empleado como material en mezclas con otros polímeros o con cargas minerales en altas proporciones (superiores al 10%) para formar materiales compuestos. Estos materiales tienen propiedades diferenciadas de aquellas del material de partida (mayor rigidez, o mejor resistencia al impacto, etc.).

Los diferentes grados de polipropileno suelen incorporar indistintamente diversos paquetes de aditivos (en proporciones inferiores al 1 %), cuya finalidad suele ser la mejora de la estabilidad termo-oxidativa de los productos, o de sus propiedades físicas (aumento de la transparencia, de la rigidez, o mejora del aspecto superficial). En este campo, los nuevos desarrollos son de gran importancia. El estudio de cargas y de fibras novedosas es otro factor de desarrollo importante que se potencia en la actualidad.

De acuerdo con esta clasificación, el polipropileno debe ser considerado como un grupo de polímeros, con propiedades físicas variadas, y no como un único producto. Es por ello que sus aplicaciones son tan variadas.

1.3.2. Procesos de fabricación de polipropileno

Aunque los procesos comerciales de obtención del polipropileno son variados, se les puede clasificar, dependiendo del medio de reacción y de la temperatura de operación, en tres tipos:

- Procesos en solución
- Procesos en suspensión
- Procesos en fase gas

En la actualidad muchas de las nuevas unidades de producción incorporan procesos híbridos, en los que se combina un reactor que opera en suspensión con otro que opera en fase gas.

Los procesos en solución, prácticamente en desuso, son aquellos en los que la polimerización tiene lugar en el seno de un disolvente hidrocarbonado a una temperatura de fusión superior a la del polímero. Entre sus ventajas han contado con la fácil transición entre grados, gracias a la pequeña dimensión de los reactores empleados.

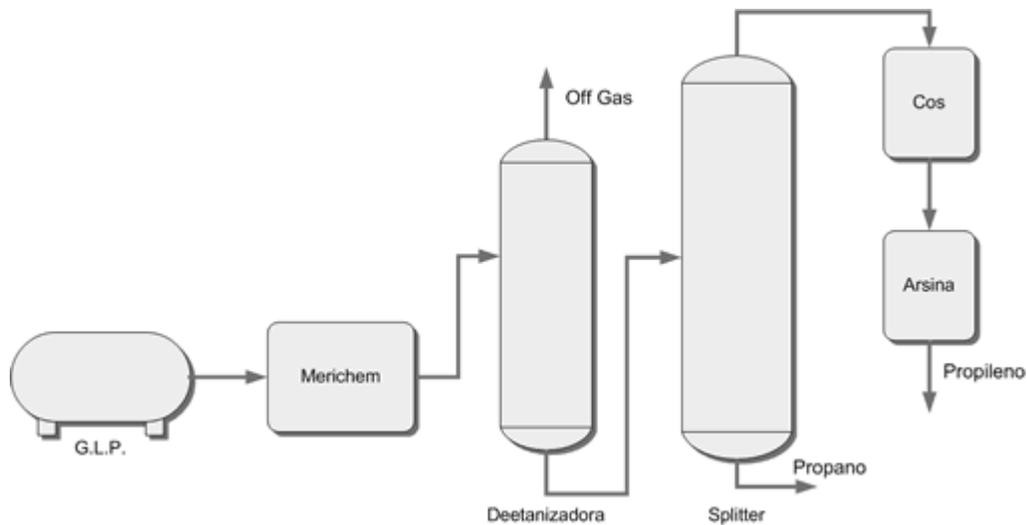
Los procesos en suspensión (slurry), están configurados para que la reacción tenga lugar en un hidrocarburo líquido, en el que el polipropileno es prácticamente insoluble, y a una temperatura inferior a la de fusión del polímero. Dentro de este tipo de procesos existen marcadas diferencias en la configuración de los reactores (de tipo bucle o autoclave) y en el tipo de diluyente utilizado, lo que afecta a las características de la operación y al rango de productos que se puede fabricar.

Los procesos en fase gas están caracterizados por la ausencia de disolvente en el reactor de polimerización. Tienen la ventaja de poderse emplear con facilidad en la producción de copolímeros con un alto contenido en etileno (en otros procesos se pueden presentar problemas al agregar altas concentraciones de etileno, puesto que se hace aumentar la solubilidad del polímero en el medio de reacción).

1.3.2.1. Destilación del propileno

Unos de los métodos más utilizados para obtener el Propileno es la destilación a partir de G.L.P. (Gas Licuado de Petróleo) con una proporción mayoritaria de componentes livianos (Propano, Propileno, etc).

Figura 14. Diagrama del proceso de destilación de polipropileno



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/fabricacion>

El proceso de destilación se compone de una serie de pasos que van eliminando los diferentes componentes no deseados hasta obtener propileno.

Primero, se “dulcifica” la mezcla en la Merichem en la cual se separan componentes tales como anhídrido carbónico o mercaptanos.

Luego, se separan los componentes livianos en una columna de destilación “De-etanizadora”, tales como metano, etano o nitrógeno.

Después de esto llega el paso más complejo, que es el de separar el propileno del propano, los cuales poseen un peso específico muy similar, por lo tanto se necesita una columna de destilación “*Splitter*” muy larga con gran cantidad de platos y con un sistema muy complejo de reflujo de condensado.

Para finalizar, se eliminan los últimos componentes residuales, como arsina, y se obtiene el propileno listo para polimerizar.

Tabla III. **Compuestos eliminados en el proceso de destilación**

Compuesto eliminado	Concentración	Proceso de separación
Nitrógeno	0,40%	Deetanizadora
Monóxido de carbono	5 ppm	
Oxígeno	20 ppm	
Metano	0,10%	
Etileno	0,14%	
Etano	0,85%	
Propano	37,06%	
Propileno	58,80%	Splitter
I-Butano	0,90%	
N-Butano	0,15%	
Butileno	1,51%	
1-3 Butadieno	0,8%	
Metil-Acetileno	0,12%	
Propileno	0,12%	
Anhídrido carbónico	50ppm	Merichem
Sulfhídrico	25 ppm	
Mercaptanos	25 ppm	
Sulfuro carbonilo	25 ppm	
Arsina	1 ppm	
Agua	50 ppm	

corrientes de alimentación. La evaporación de los líquidos en el lecho de polimerización asegura que el intercambio de calor será extremadamente eficiente.

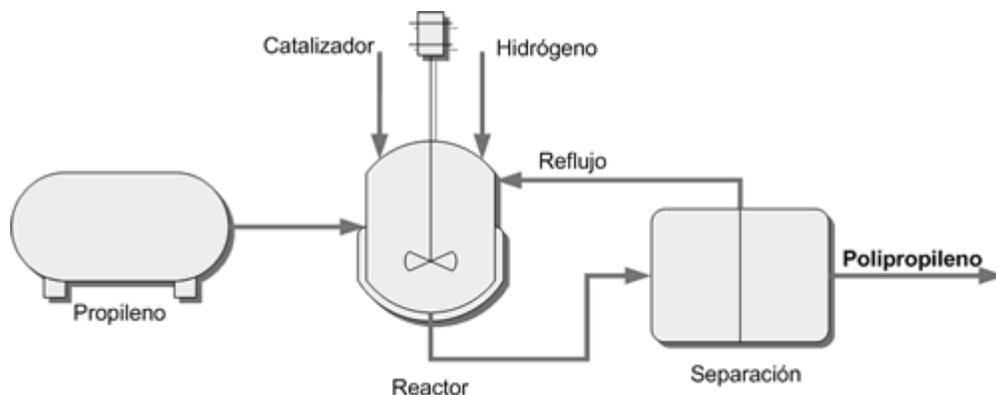
El polvo de polipropileno se descarga desde el reactor y se separa en un tanque de descarga a presión atmosférica. El co-monómero sin reaccionar se separa del polvo y se comprime, y finalmente se recicla o se retorna aguas arriba a la unidad de destilación para su recuperación.

El polímero se pone en contacto con nitrógeno en un tanque de purga para despojarlo del propileno residual. El gas de purga se recupera, el polvo se transporta a los silos de polvo, y posteriormente por extrusión se convierte en pellets, donde se incorpora una gama completa de aditivos bien dispersados.

1.3.2.3. Proceso LIPP

Es un proceso similar al Novolen. Es el adoptado por Petroken S.A. para la producción de homopolímeros.

Figura 16. Diagrama del Proceso LIPP



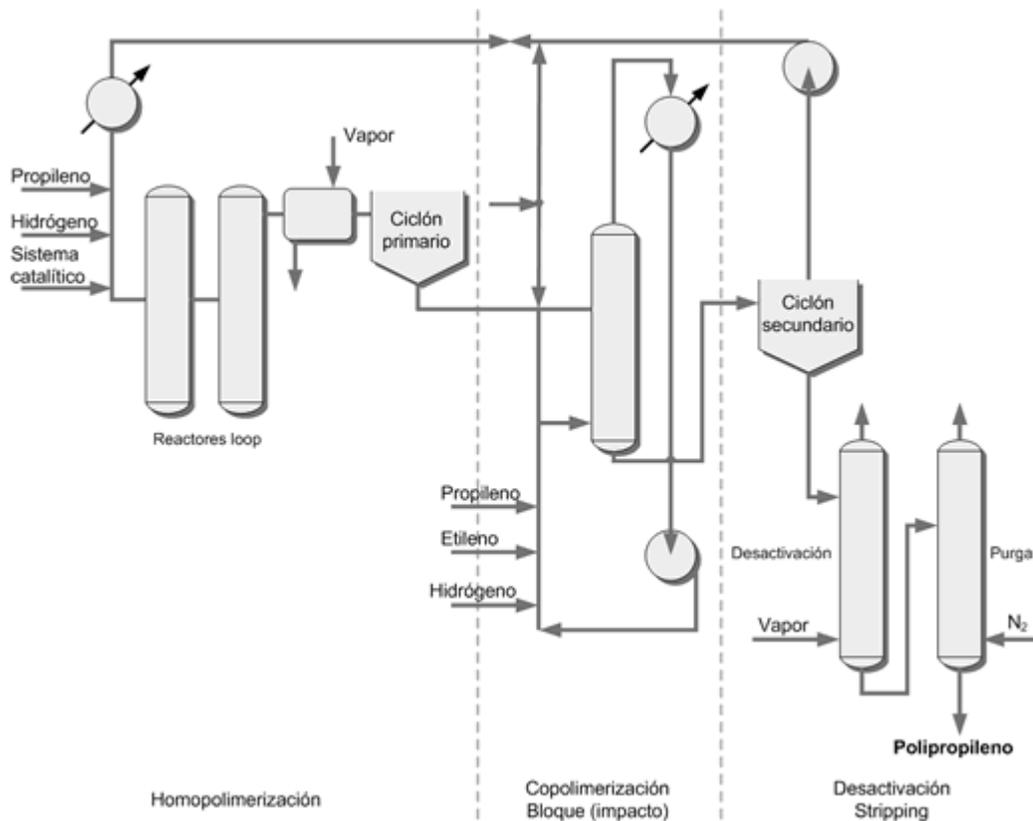
Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/fabricacion>

Consiste en hacer reaccionar el propileno junto con Hidrógeno y el catalizador en un reactor. Luego de terminado este paso, se separa el polipropileno de residuos de la reacción, como monómeros, catalizador, etc., los cuales son reflujados al reactor. Luego se suceden los mismos pasos de terminación que en el proceso Novelen.

1.3.2.4. Proceso *Spheripol*

Para describir con más detenimiento los procesos, hablaremos de uno de los más empleados en la actualidad: el proceso *Spheripol*. Diseñado como híbrido con dos reactores en serie, el primero para trabajar en suspensión y el segundo en fase gas, es un proceso versátil, que permite preparar diferentes tipos de productos con propiedades óptimas. El primer reactor es de tipo bucle (o loop), en el cual se hace circular catalizador y polímero a gran velocidad para que permanezcan en suspensión en el diluyente. El diluyente es en realidad el mismo propileno líquido que, dadas las condiciones de operación, facilita la evacuación del calor generado por la reacción al mismo tiempo que permite aumentar el rendimiento del sistema catalítico. En el segundo reactor de fase gas se incorpora ulteriormente el polímero producido en el reactor loop. En esta fase se preparan grados con características especiales añadiendo un comonomero además del monómero. Tras separar el polímero fabricado de las corrientes de propileno, y de desactivar el catalizador, el polvo de polipropileno obtenido se envía a la línea de acabado donde se añaden aditivos y se le da la forma de granza requerida para su distribución comercial.

Figura 17. Diagrama del proceso *Spheripol*



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/fabricacion>

En el campo de los procesos, los últimos desarrollos han ido dirigidos a la optimización con objeto de mejorar las propiedades de los polímeros, aumentar las capacidades de producción y reducir costes. La adecuación del proceso al sistema catalítico empleado es un parámetro fundamental con vistas a este objetivo.

1.3.3. Aplicaciones generales del polipropileno

A partir de los procesos industriales se pueden preparar un sin fin de productos de polipropileno diferentes, cuyas propiedades varían según la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), de su polidispersidad, de los comonomeros eventualmente

incorporados, etc. Estas características básicas definen las propiedades mecánicas del material y sus aplicaciones finales. Literalmente se habla de diferentes tipos o grados de polipropileno. Por todo esto, la gran diversidad de productos producidos con esta poliolefina le permite tener aplicaciones tan variadas como:

- Autopartes
- Baldes, recipientes, botellas
- Muebles
- Juguetes
- Películas para envases de alimentos
- Fibras y filamentos
- Bolsas y bolsones
- Fondo de alfombras
- Pañales, toallas higiénicas, ropa
- Envases de pared delgada

Una de las tendencias más firmes en la industria del moldeo por inyección actual es el diseño de piezas de espesores menores a los 0.8 mm, genéricamente conocidas como "de pared delgada". Trabajar en esos espesores aumenta la rentabilidad del proceso en dos direcciones perfectamente definidas. Por un lado disminuye el peso por pieza y por el otro, los tiempos de ciclo incrementando, de esta forma, la productividad. Las principales aplicaciones de polipropileno en este campo se encuentran en artículos tales como copas de postre, potes de margarina, baldes de helado, entre otros. A modo de ejemplo, en ciclos de hasta 3 segundos es posible obtener potes de margarina de 250 cm³, de sólo 10 gr. de peso y 0.4 mm de espesor.

Una variable muy importante es la relación entre la longitud total de flujo y el espesor de la pieza que, para el caso del polipropileno, no debe superar un valor de 330. Es decir que: una pieza de 1 mm de espesor puede tener una longitud de 330 mm. Si el espesor se disminuye a 0.8 mm, la longitud de flujo se debe disminuir en la misma

proporción; si no la relación anterior se elevaría a 412 y habría severas dificultades para llenar el molde.

Trabajar en espesores tan pequeños representa un desafío para el material, que debe conjugar un buen balance de propiedades mecánicas en estado sólido con buenas propiedades de flujo en estado fundido. El material, a su vez, debe asegurar una elevada rigidez y una buena resistencia al impacto. Por otro lado debe poseer una fluidez lo suficientemente elevada como para llenar un molde que le ofrece gran oposición al flujo.

1.3.3.1. Aplicaciones en la industria automotriz:

La industria del automóvil evoluciona rápidamente. En su afán de optimización, la búsqueda de materiales que reúnan el mayor número de requerimientos específicos se ha convertido en una de las metas de las grandes empresas internacionales. Esa búsqueda ha encontrado en el polipropileno uno de los aliados fundamentales dentro de la gran familia de los materiales plásticos. En él, diseño y propiedades (arte y técnica) se combinan para volcar al mercado productos cada vez más innovadores, competitivos, y confiables.

En un sector tan exigente, el polipropileno y sus compuestos han encontrado nuevos campos de aplicación aportando confort visual y al tacto en los interiores de los habitáculos, estabilidad dimensional en los compartimentos del motor, óptimo desempeño frente a los agentes climáticos en la periferia, y buena aptitud para recibir tratamientos decorativos de superficie (pinturas). Tan disímiles requerimientos primarios satisfechos por un solo material, han logrado posicionar al polipropileno como el plástico más importante de la ingeniería del automóvil en la actualidad.

1.3.4. Datos generales de la resina utilizada

Tabla IV. Datos generales de la resina

Nombre	Resina de polipropileno
Fabricante	Dow Chemical Company
Código	H 700-12
Tipo	Homopolímero
Fórmula	$(C_3H_6)_n$
Símbolo comercial	PP

1.3.5. Propiedades de la resina

Tabla V. Propiedades generales de la resina

Estado físico	Sólido (pellets)
Color	Blancuzco
Olor	Inodoro
Grado de inflamación	1 (debe precalentarse para arder)
Reactividad	0 (estable totalmente)
Peligrosidad	0 (material corriente)
Solubilidad	Insoluble
Grado de descomposición	No se descompone en condiciones normales
Rango explosivo	No es explosivo

Tabla VI. **Propiedades físicas de la resina**

Propiedades	Método de prueba	Valores (SI)
Caudal de derretimiento	ASTM D 1238	12.0 gr./10 min.
Densidad	ASTM D 792	0.9 gr./cc.
Punto de fusión	Método DOW*	324°F (162°C)

Tabla VII. **Propiedades físicas de las piezas moldeadas**

Propiedades	Método de prueba	Valores (SI)
Resistencia a la tensión	ASTM D 638	4800 psi (33 MPa)
Elongación	ASTM D 630	10%
Módulo de flexión	ASTM D 790	210,000 psi (1450 MPa)
Impacto de muesca a 23°C (74°F)	ASTM D 256A	0.8 pie-lb _f /pulg (43 J/m)
Temperatura de desviación bajo carga de 66 psi (0.45 MPa)	ASTM D 648	203°F (95°C)

1.3.6. Especificaciones del fabricante

1.3.6.1. Aplicaciones

Las aplicaciones industriales más comunes de este tipo de resina son:

- Packaging rígido
 - Contenedores de paredes delgadas
 - Tapas y cierres
 - Contenedores industriales
 - Manejo de materiales
- Bienes de consumo durables
 - Artículos para el hogar

- Automotores
 - Interiores
 - Exteriores

1.3.6.2. Procesos de fabricación

Los diferentes procesos de fabricación de piezas con este tipo de resina incluyen:

- Moldeo
 - Moldeo por inyección
 - Moldeo por soplado
- Extrusión
 - Extrusión de perfiles
 - Extrusión de film fundido
 - Extrusión de polipropileno bi-orientado
- Cinta y filamento mono-orientados
- Termofraguado
- Devanado de fibra

1.3.7. Características de la resina

1.3.7.1. Información toxicológica

- Efectos agudos por inhalación: la inhalación de polvo de polipropileno puede provocar inflamación pulmonar. la inhalación prolongada de productos de la degradación térmica del polipropileno puede provocar efectos neurológicos.
- Efectos agudos orales: no se observan efectos tóxicos aparentes.
- Toxicidad por dosis repetida: no se observan efectos tóxicos aparentes
- Efectos carcinógenos: no se tienen antecedentes anteriores.

1.3.7.2. Información ecológica

- Ecotoxicidad: se espera que la ecotoxicidad sea mínima dada la baja solubilidad de los polímeros en el agua. La ingestión de gránulos puede resultar dañina para aves y peces.
- Desarrollo ambiental: no se han encontrado datos en las referencias revisadas.
- Acumulación biológica: no se produce.

1.3.7.3. Identificación de peligros

- Riesgos para las salud
 - No causa riesgos a la salud.
 - Inhalación: no es respirable en su forma almacenada.
 - Piel: no causa quemaduras térmicas después de procesado.
 - Ojos: sólo puede causar irritación mecánica.
 - Ingestión: no se considera una vía probable de exposición.
 - El producto encendido puede producir gases irritantes y causar quemadura a la piel y ojos.
- Seguridad
 - Material combustible: puede incendiarse por fricción, calor, chispas o llamas.
 - La sustancia puede fluir o transportarse en estado fundido.
 - Puede volver a encenderse después que el incendio se ha extinguido. Su combustión genera humo.
- Medio ambiente
 - No biodegradable.
 - No reacciona en contacto directo con el suelo, agua y aire.

1.3.7.4. Medidas de primeros auxilios

- No requiere procedimientos especiales para emergencias. No requiere instrucciones especiales para primeros auxilios.
- Si existe exposición a humo generado del sobrecalentamiento o fuego, trasladar a una atmósfera con aire fresco. Si no se produce una rápida recuperación o si la víctima no respira, obtener atención médica.
- Lave la piel con jabón y abundante agua. Lave los ojos con agua. Consulte al médico si persiste alguna molestia.
- Si el material recién moldeado (caliente) entra en contacto con la piel, enfríe inmediatamente con agua fría. No intente remover el material de la piel. Obtenga atención médica si presenta quemadura térmica.

1.3.7.5. Medidas de lucha contra incendios

- Temperatura *flash* de ignición de 500°C (temperatura de auto ignición).
- No causa fuego inusual o riesgo a explosión en condiciones normales.
- Riesgo de exposición
 - Ligeramente combustible, puede formar mezclas explosivas debido a carga estática.
 - Emite humo tóxico en caso de fuego.
 - Falla en el control de temperatura en equipos de procesamiento puede crear riesgo a explosión.
- Productos de combustión peligrosos: monóxido y dióxido de carbono.
- Medio de extinción: agua, polvo químico seco, espuma, dióxido de carbono.

1.3.7.6. Manipulación, almacenamiento y eliminación

- Manipulación
 - Practique cuidado razonable durante su manejo.
 - Gránulos de material sobre el piso representa riesgo a resbalones y caídas.
 - Contacto con productos recién moldeados pueden causar quemaduras térmicas.
- Almacenamiento
 - Espacios ventilados alejados de fuentes de ignición.
 - Considere que se puede acumular carga estática en los productos almacenados.
- Eliminación de producto
 - Usar solamente transportistas e instalaciones autorizados para la eliminación de residuos.
 - Recicle, reutilice o recupere de ser posible.

2. VARIABLES DEL PROCESO

2.1. Metodología

2.1.1. Diseño experimental

2.1.1.1. Método: estadístico muestral.

- Población productos de polipropileno con un peso máximo de 500 gr. producidos por una máquina de inyección con una fuerza de cierre de 250 ton.
- Muestra tapa de polipropileno de 250 gr. promedio.
- Variables
 - Independientes temperaturas (8) y presión de Inyección
 - Dependiente índices de calidad
- Plan de muestreo por conglomerado (se estratifica el marco del muestreo y se seleccionan todos los elementos de algunos estratos, no de todos).
- Análisis descriptivo datos bivariados (interrelacionados)
- Estimación correlación

2.1.2. Recursos

Uno de los recursos empleados para la obtención de datos fue el muestreo de datos de temperaturas de las diferentes zonas de la máquina inyectora, la presión de inyección y muestreo de productos para realizar inspecciones de calidad; cabe aclarar que estos tres datos se tomaron de manera simultánea para obtener una buena correlación de los datos. Otro de los recursos empleados con el método estadístico es el de empleo de gráficos, mediante curvas que relacionen la presión y temperaturas con los índices de calidad, para obtener los parámetros óptimos experimentales para moldeo de piezas de polipropileno.

2.1.3. Muestreo

Se realizó estratificando los tiempos de muestreo en 3 partes, cada una de 8 horas, tomando en cuenta el estrato de tiempo de 9:00 AM a 5:00 PM y realizando muestreo general de todas las variables cada media hora durante dos días de producción continua de la tapa evaluada, obteniendo 22 series de datos de temperaturas para cada una de las zonas de calentamiento (8) y para la presión de inyección. Paralelo a lo anterior se obtuvo una muestra de la tapa y se identificó el número de muestra para la revisión de calidad.

Tabla VIII. Obtención de muestras

DIA 1	No. DE MUESTRA	DIA 2	No. DE MUESTRA
9:00	1	9:00	12
9:30	2	9:30	13
10:00	3	10:00	14
10:30	4	10:30	15
11:00	5	11:00	16
11:30	6	11:30	17
12:00	Receso	12:00	Receso
12:30		12:30	
13:00		13:00	
13:30		13:30	
14:00		14:00	
14:30	Estabilización de máquina	14:30	Estabilización de máquina
15:00	7	15:00	18
15:30	8	15:30	19
16:00	9	16:00	20
16:30	10	16:30	21
17:00	11	17:00	22

2.1.4. Procedimiento

1. Se obtuvo información general acerca de la máquina de inyección mediante observación e investigación de los manuales, producidos por el fabricante y con ello se investigó la descripción del proceso, características del equipo, capacidades, etc.
2. Se obtuvo información de la resina por medio del fabricante, para determinar las especificaciones, características y propiedades de la misma.

3. Se determinaron las variables del proceso: como variable independiente el índice de calidad y dependientes las temperaturas y presión de inyección.
4. Se definieron las variables del proceso: temperatura de boquilla 1, 2 y 3; temperatura de barril 4, 5, 6, 7, y 8; presión de inyección.
5. Se realizaron los muestreos de presión, temperaturas y producto final, para realizar el análisis.
6. Se producen curvas que representen la interacción entre las variables.
7. Se relacionan e interpretan los datos obtenidos por medio de los gráficos para determinar los parámetros óptimos del proceso de moldeo por inyección.
8. Se realiza un manual de calidad relacionando los defectos encontrados en las muestras con las diferentes temperaturas y presión.
9. Se obtienen las conclusiones del estudio.
10. Se realizan las recomendaciones del proceso, en base a las observaciones y análisis numéricos realizados.

2.2. Definición de variables

Las variables a analizarse en este estudio se determinaron debido a su importancia en el proceso de moldeo por inyección de plásticos, las cuales se describirán a continuación:

2.2.1. Temperaturas

La importancia del control de las temperaturas de barril y de boquilla, radica en que estas temperaturas están dadas por el tipo de material a trabajar, que en este caso es polipropileno; estas temperaturas se ajustan de acuerdo a la temperatura de la masa fundida y ésta a su vez determina las propiedades estructurales de las piezas moldeadas, por lo que estas temperaturas deben ser constantes y uniformes ya que controlan la densidad y contracción de la pieza. El proceso de plastificación de una resina de plástico como el polipropileno es muy estrecho y requiere mucha energía.

2.2.1.1. Temperatura de boquilla (1-3)

Las boquillas son los orificios por donde el tornillo inyecta la resina previamente plastificada en el barril hacia los moldes, por ello es necesario tener en cuenta la temperatura a la cual se encuentra el material en el momento de pasar al proceso de moldeo, ya que las propiedades del material influyen de manera muy significativa en la calidad de la pieza moldeada.

Uno de los problemas principales que produce una variabilidad marcada en la temperatura de la boquilla es el acabado superficial que tiene la pieza, ya que muchos defectos son consecuencia de temperaturas muy bajas o muy altas en el proceso dosificación de material antes del moldeo. El número de boquillas que tenga una inyectora depende del número de piezas que ésta pueda producir en un solo ciclo de inyección.

2.2.1.2. De barril (4-8)

El barril es el cilindro dentro del cual se encuentra el tornillo gíatorio y las resistencias eléctricas que van produciendo, mediante transferencia de calor, que la

resina se plastifique hasta el punto en el que ésta sea maleable para moldearla. Las temperaturas de barril se miden por zonas, que van desde la zona No. 4, que es la zona en la cual la resina entra para su plastificación, hasta la temperatura No. 8, que es la última zona, que se encuentra antes de la dosificación en las boquillas de alimentación.

Es importante controlar estos parámetros, ya que la rebaba en una pieza producida por el método de inyección es uno de los defectos más comunes encontrados en la piezas, debido a un mal control en las temperaturas de barril, las cuales hacen que el material se dosifique en exceso y provoque un exceso de material en el cierre del molde.

2.2.2. Presión de inyección

La presión de inyección es la presión requerida para vencer las resistencias que el material fundido produce a lo largo de su trayectoria, desde el cilindro de plastificación hasta el molde. Esta presión corresponde a la fase de llenado del molde, con ésta pretendemos llenar la cavidad en un 90 ó 95%, para después terminar de llenar la pieza con la presión de sostenimiento y las velocidades.

En el proceso de moldeo, otro defecto muy común, y mucho más serio, es el de las piezas incompletas, las cuales se producen principalmente por baja presión de inyección, produciendo una dosificación ineficiente y costos en desperdicio de material y energía.

2.2.3. Índices de calidad

Es necesario, cuando se evalúa la calidad de un producto o servicio, tener parámetros comparativos de control con los cuales determinar que tipo de defectos se producen en una pieza y en que porcentaje estos defectos pueden ser aceptados durante el proceso, sin que éstos afecten de manera considerable la presentación del producto o su buen funcionamiento en el momento de su uso. Por ello, es de suma importancia

establecer los tipos de defectos más comunes que se dan en el proceso, su nivel de aceptabilidad y la influencia directa de estos defectos en el funcionamiento de la pieza moldeada.

2.2.3.1. Defectos de calidad

Los defectos de calidad son no-conformidades producidas en la pieza moldeada durante todo el proceso de formación de la misma. Los principales defectos que afectan una pieza de plástico fabricada por inyección son: pieza incompleta, pieza con rebaba y pieza rayada. Estos tres defectos principales se suman a otros que, no de manera frecuente, aparecen durante el proceso de fabricación de la pieza.

2.2.3.2. Cálculo de índices de calidad

Como se mencionó anteriormente, el índice de calidad es un porcentaje que se obtiene como parámetro de control para determinar en que grado un defecto afecta la calidad final de la pieza, el funcionamiento de la misma y el nivel de aceptación que el consumidor tenga de la pieza o producto final. Los índices de calidad se calculan como porcentajes, teniendo un porcentaje mínimo del 95% para considerar como aceptable una pieza que pueda ser utilizada sin riesgos de ningún tipo.

Los defectos se clasifican en tres niveles: ligeros, moderados y críticos; utilizando criterios de aceptabilidad para cada uno de estos niveles. Los defectos ligeros son los que no afectan la calidad del producto y son ligeramente visibles, asumiendo con ello que este defecto no afectará la preferencia del consumidor hacia el producto. Los defectos moderados tampoco afectan de manera seria la calidad del producto o su funcionamiento, pero pueden afectar visualmente al consumidor, produciendo cierta desconfianza de éste hacia el producto. Finalmente, los defectos críticos son los que si

afectan la calidad y/o funcionamiento del producto y debido a los mismos, este producto no debe ser liberado para su venta o uso.

Otra clasificación de defectos es el tipo del mismo, siendo los más comunes los que producen problemas causados por la temperatura, la presión, ambos involucrados en el proceso de inyección, y los problemas derivados del proceso de moldeo. Los defectos producidos en el proceso de moldeo son muy difíciles de catalogar, debido a que son problemas de centrado de molde, posición etc. y estos problemas deben ser solucionados manualmente, por ello no pueden ser optimizados como en el caso de las temperaturas y la presión de inyección.

En el proceso de moldeo se producen problemas que van desde piezas incompletas o mal moldeadas hasta problemas como marcas en la pieza debido a las líneas de flujo o de soldadura en las uniones del molde; las cuales le dan un aspecto no uniforme a la pieza y una disminución de vistosidad a la pieza.

3. RESULTADOS

3.1. Optimización de temperaturas y presión de inyección por medio de los índices de calidad

Tabla IX. Datos de optimización de temperaturas y presión de inyección

Parámetro	Índice de calidad máximo	optimización
Temperatura de boquilla 1	99.690	440.080
Temperatura de boquilla 2	99.689	425.098
Temperatura de boquilla 3	99.633	430.140
Temperatura de barril 4	99.343	449.999
Temperatura de barril 5	99.633	449.995
Temperatura de barril 6	99.645	450.097
Temperatura de barril 7	99.689	449.999
Temperatura de barril 8	99.622	449.993
Presión de inyección	99.712	1133.20

3.2. Cálculos estadísticos obtenidos mediante datos experimentales de los parámetros de control

Tabla X. Cálculos estadísticos de los parámetros de control

Parámetro	Media aritmética	Desviación estándar
Temperatura de Boquilla 1	437.2	± 6.4830
Temperatura de Boquilla 2	424.9	± 1.3770
Temperatura de Boquilla 3	430.0	± 1.9500
Temperatura de Barril 4	450.0	± 0.1574
Temperatura de Barril 5	449.8	± 0.4697
Temperatura de Barril 6	450.0	± 0.3630
Temperatura de Barril 7	449.9	± 0.5027
Temperatura de Barril 8	449.8	± 0.9579
Índice de Calidad	98.66	± 1.3290
Presión de Inyección	1193	± 159.30

3.3. Relación entre la presión de inyección y las temperaturas con los defectos del producto

Tabla XI. Defectos principales en las piezas moldeadas, causas y soluciones

Defecto	Causas posibles	Probables soluciones
Líneas de flujo	Mala dispersión del concentrado de color o del pigmento. Temperatura demasiado baja.	Cargar el material más lentamente. Incrementar la temperatura del barril. Modificar el perfil de temperaturas.
Piel de naranja	Incompatibilidad del material.	Disminuir la temperatura de proceso.
Parte incompleta	Insuficiente material en la cavidad. Falta de material en la tolva. Temperatura demasiado baja. Obstrucción de la tolva o de la boquilla. Velocidad de inyección demasiado baja.	Inyectar más material. Incrementar la temperatura del barril. Incrementar la velocidad de inyección.
Parte con rebabas	Dosificación excesiva. Temperatura de inyección muy alta. Presión de inyección muy alta. Tiempo de inyección muy largo. Temperatura de molde muy alta.	Dosificar menos material. Disminuir la temperatura de inyección. Disminuir la presión. Disminuir el tiempo de inyección. Disminuir la temperatura del molde.
Rechupados y huecos	Presión de inyección demasiado baja. Tiempo de sostenimiento de presión muy corto. Velocidad de inyección baja. Material sobrecalentado.	Incrementar la presión. Incrementar el tiempo de sostenimiento de presión. Disminuir la temperatura del barril. Incrementar la velocidad de inyección.
Líneas de unión	Temperatura muy baja en el molde. Temperatura del fundido no uniforme. Presión de inyección muy baja. Velocidad de inyección muy baja. Insuficiente respiración en la zona de unión de los flujos encontrados. Velocidad	Incrementar la temperatura. Incrementar la presión. Incrementar la velocidad de inyección. Modificar la respiración del material en el molde.

	de llenado no uniforme. Flujo inadecuado del material por los canales o la cavidad.	
Delaminación de capas	Temperatura demasiado baja. Velocidad de inyección demasiado baja. Temperatura del molde muy baja.	Incrementar la temperatura. Incrementar la velocidad de inyección.
Fracturas o grietas en la superficie	Temperatura del molde demasiado baja. Presión de sostenimiento muy alta.	Incrementar la temperatura. Disminuir la presión de sostenimiento.
El concentrado de color no se mezcla	Perfil incorrecto de temperaturas.	Probar un perfil inverso de temperaturas. Bajar la temperatura de las primeras dos zonas de la unidad de inyección. Usar un perfil de temperaturas más agresivo.
El color es más oscuro	La temperatura es demasiado alta.	Disminuir la temperatura.

3.4. Curvas de temperatura y presión con respecto a los índices de calidad

Figura 18. Histograma de la temperatura de boquilla 1

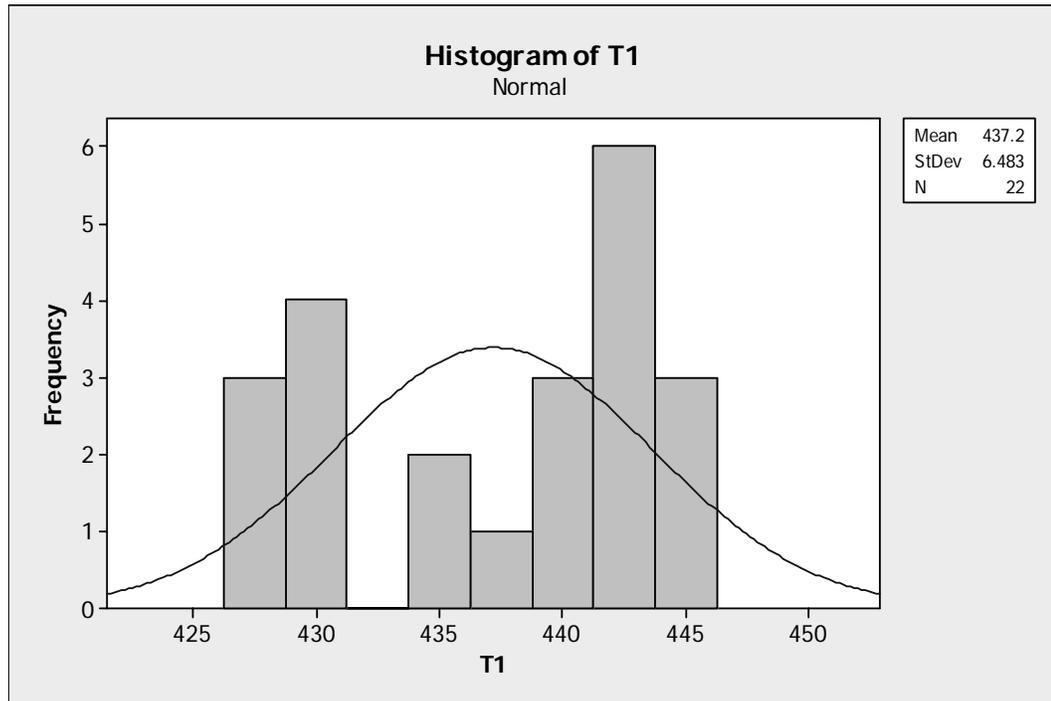


Figura 19. **Histograma de la temperatura de boquilla 2**

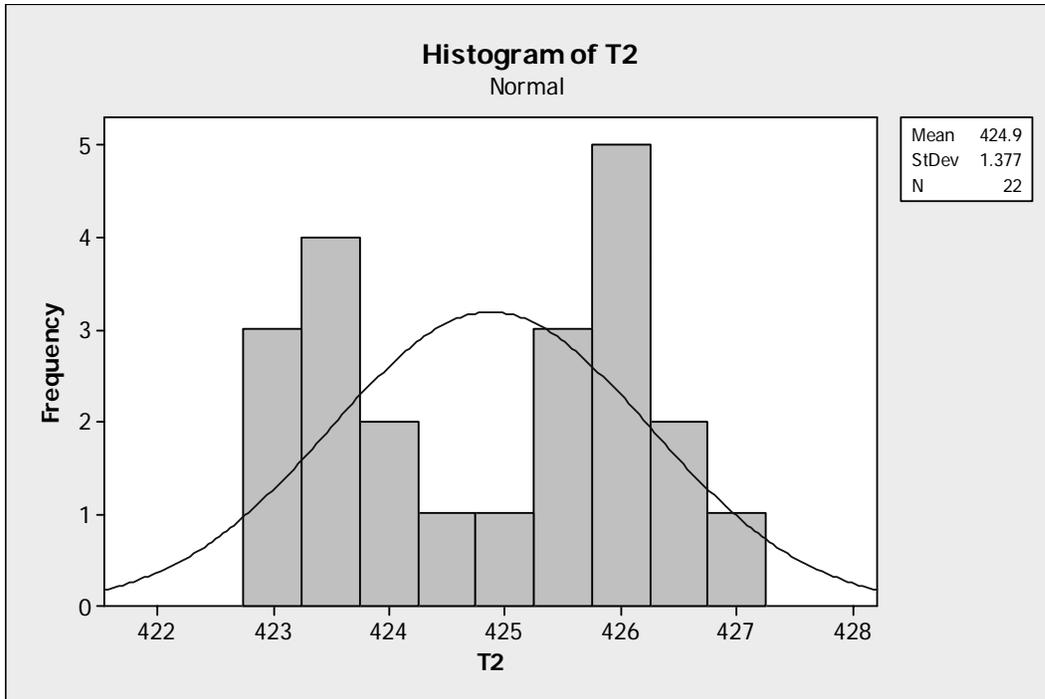


Figura 20. **Histograma de la temperatura de boquilla 3**

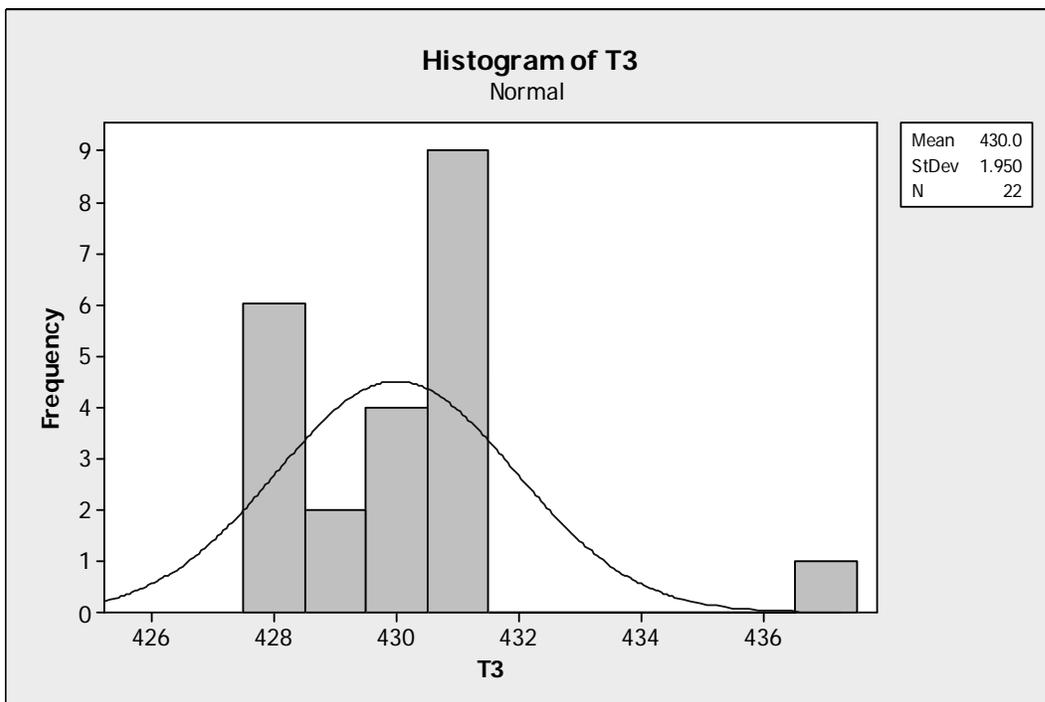


Figura 21. Histograma de la temperatura de barril 4

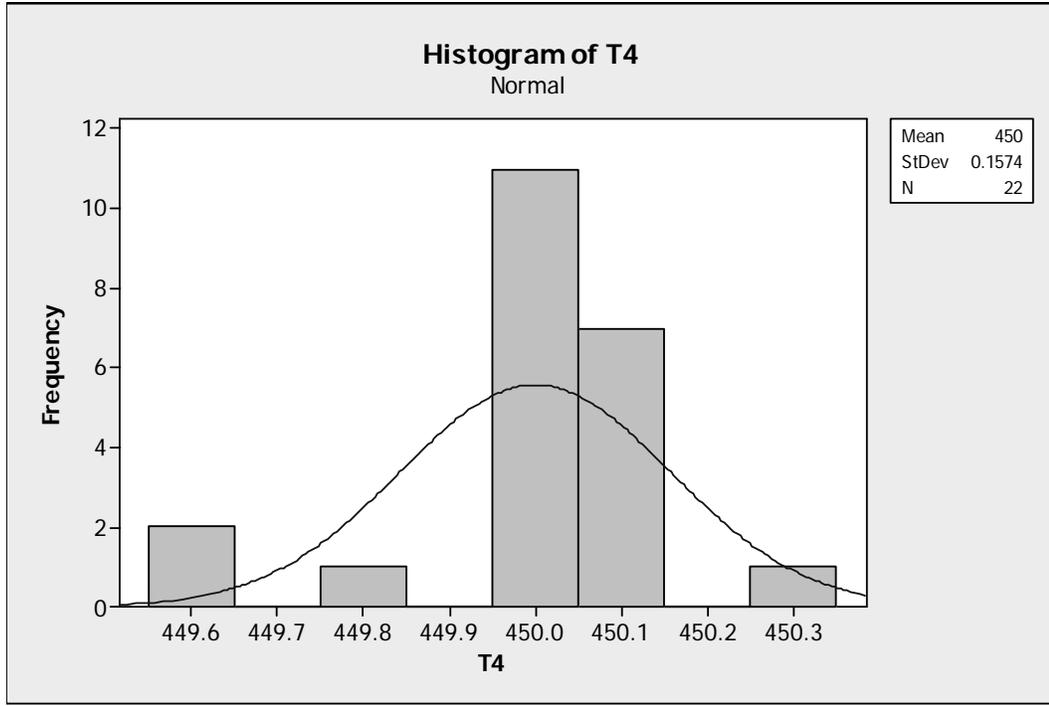


Figura 22. Histograma de la temperatura de barril 5

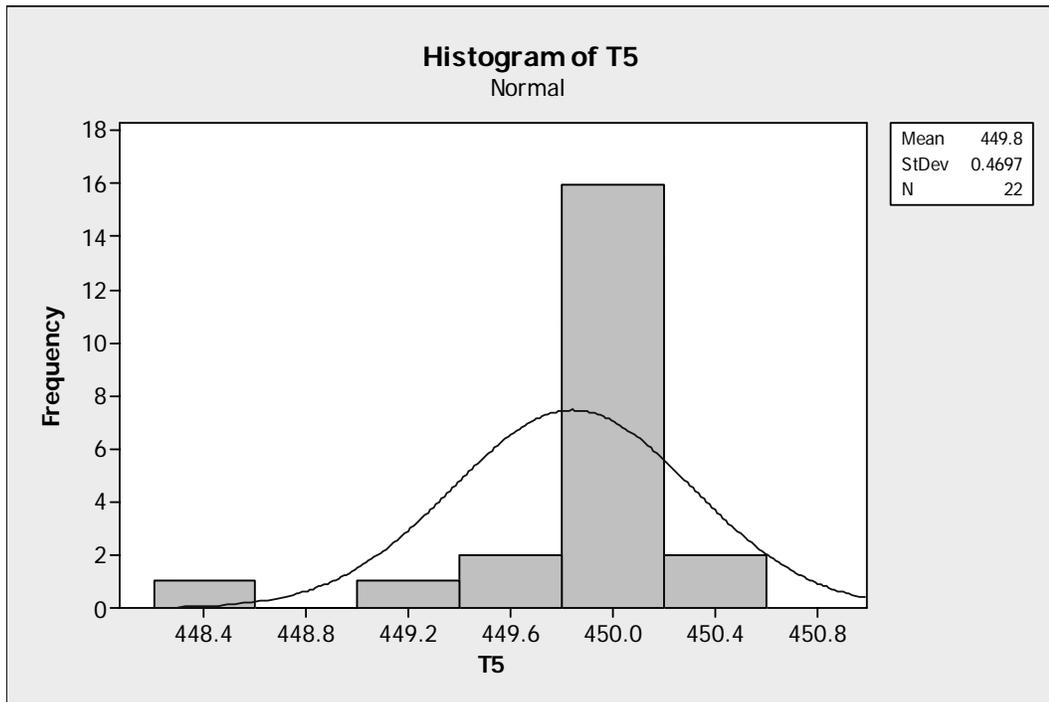


Figura 23. Histograma de la temperatura de barril 6

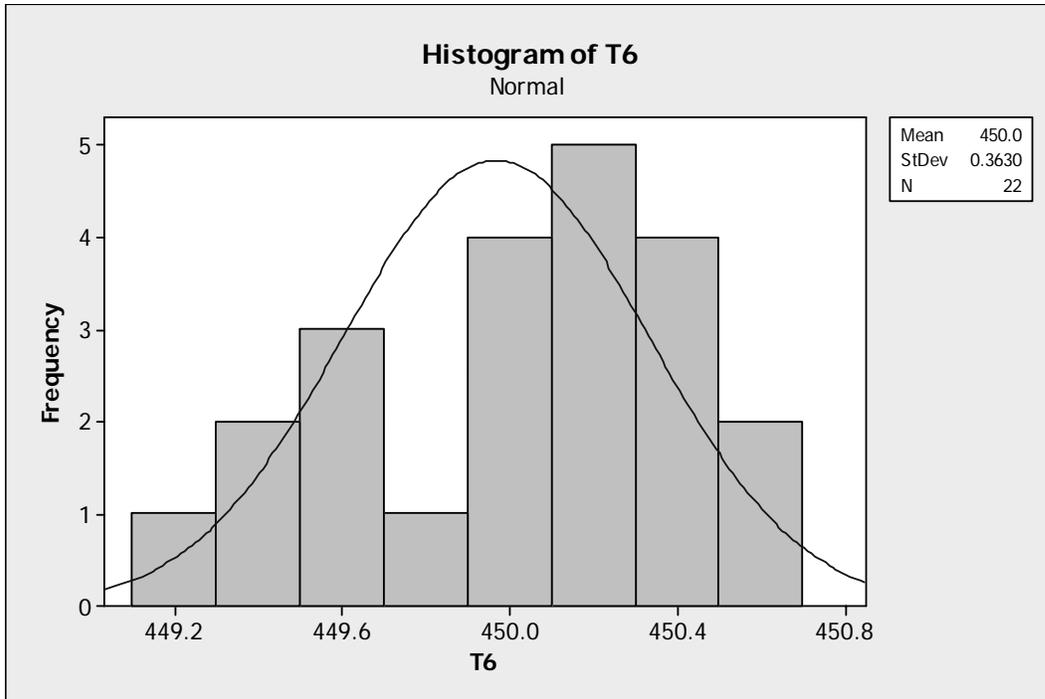


Figura 24. Histograma de la temperatura de barril 7

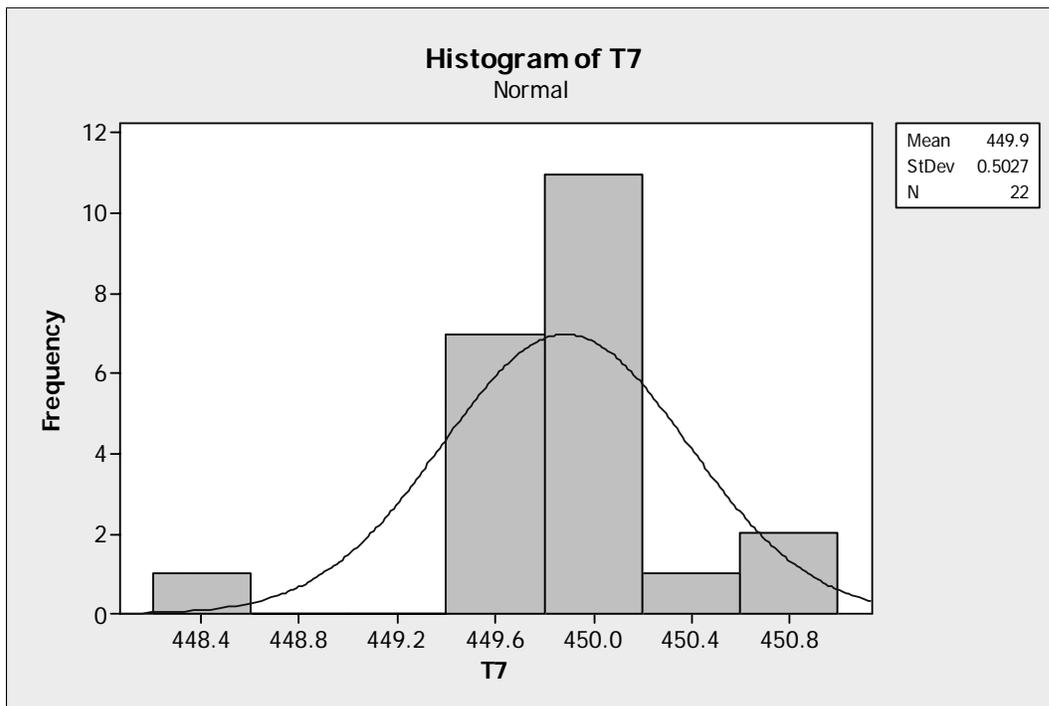


Figura 25. Histograma de la temperatura de barril 8

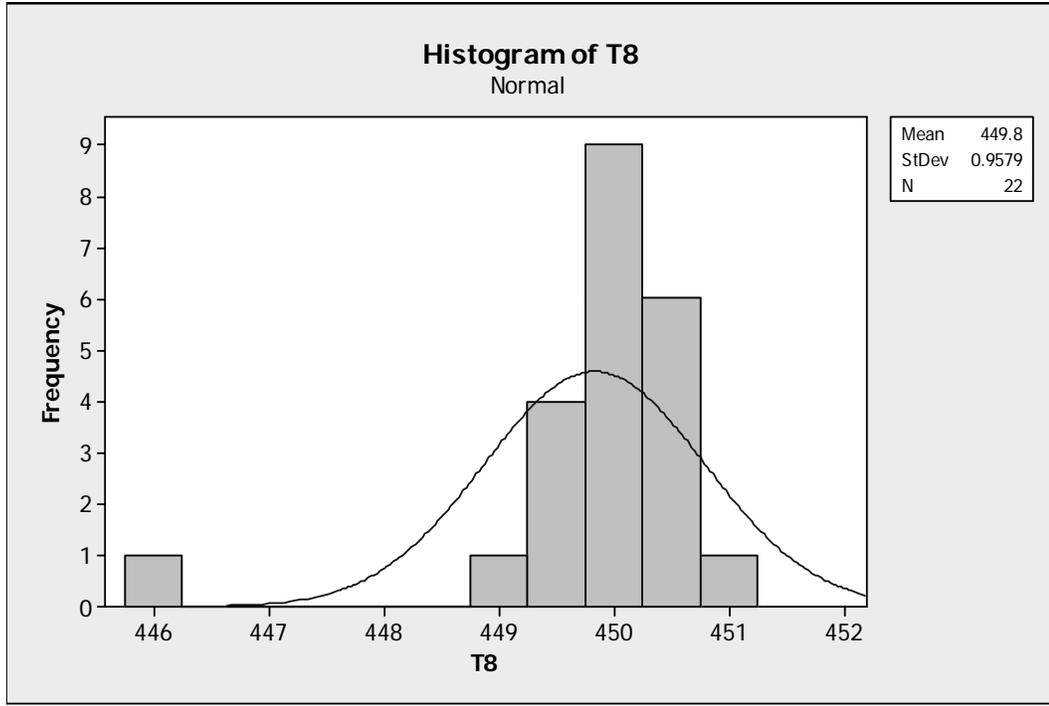


Figura 26. Histograma de la presión de inyección

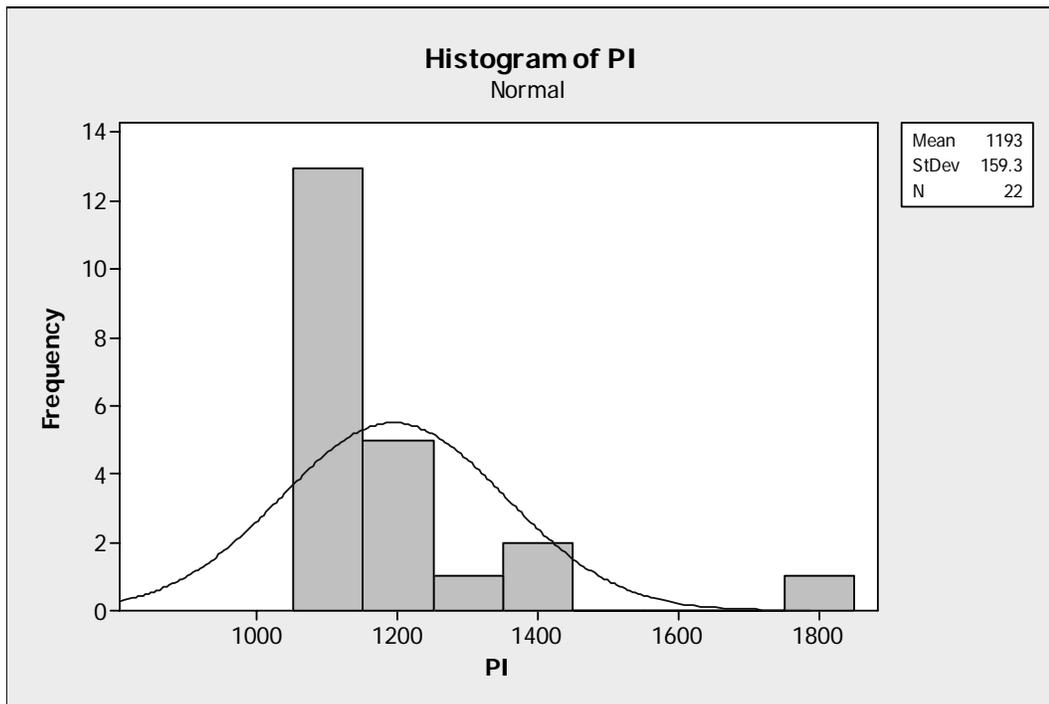


Figura 27. Histograma de los índices de calidad

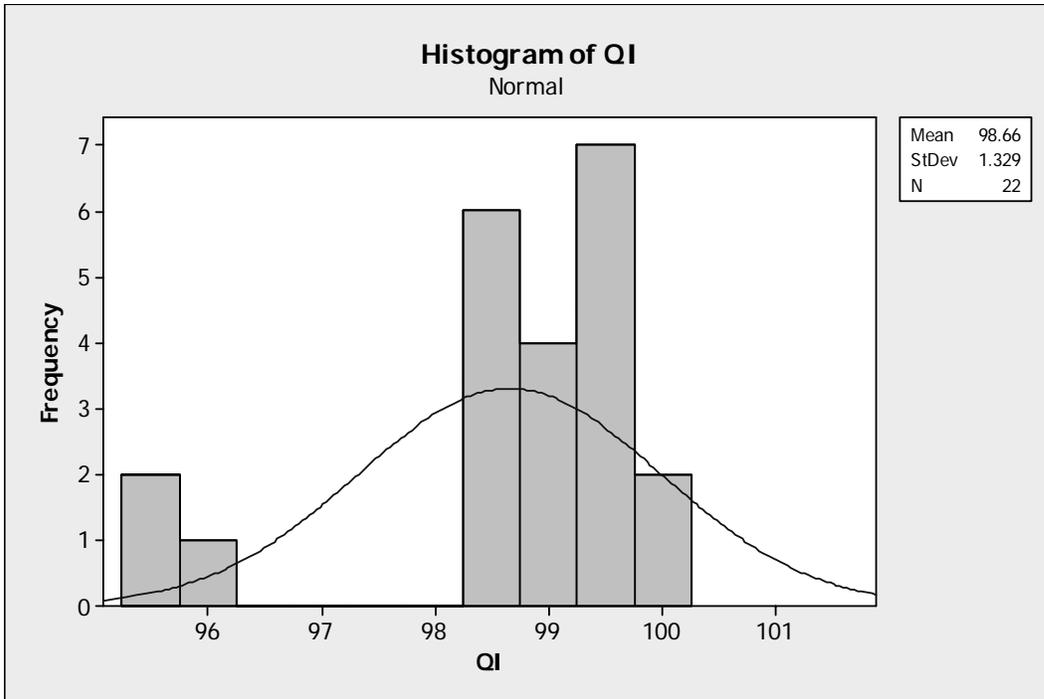


Figura 28. Optimización de la temperatura de boquilla 1

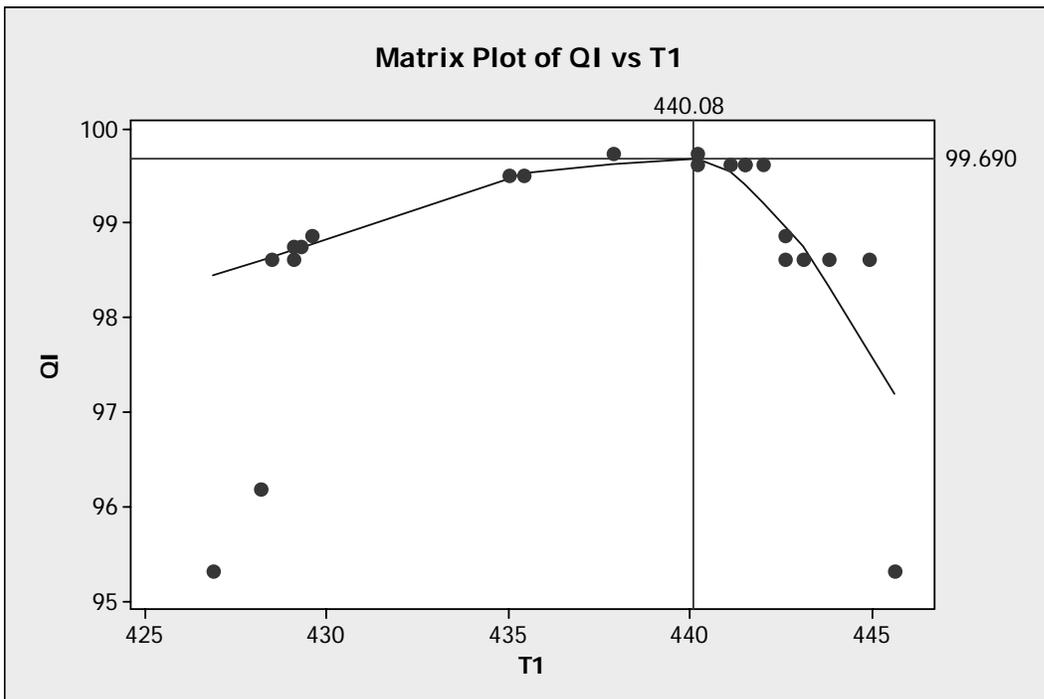


Figura 29. Optimización de la temperatura de boquilla 2

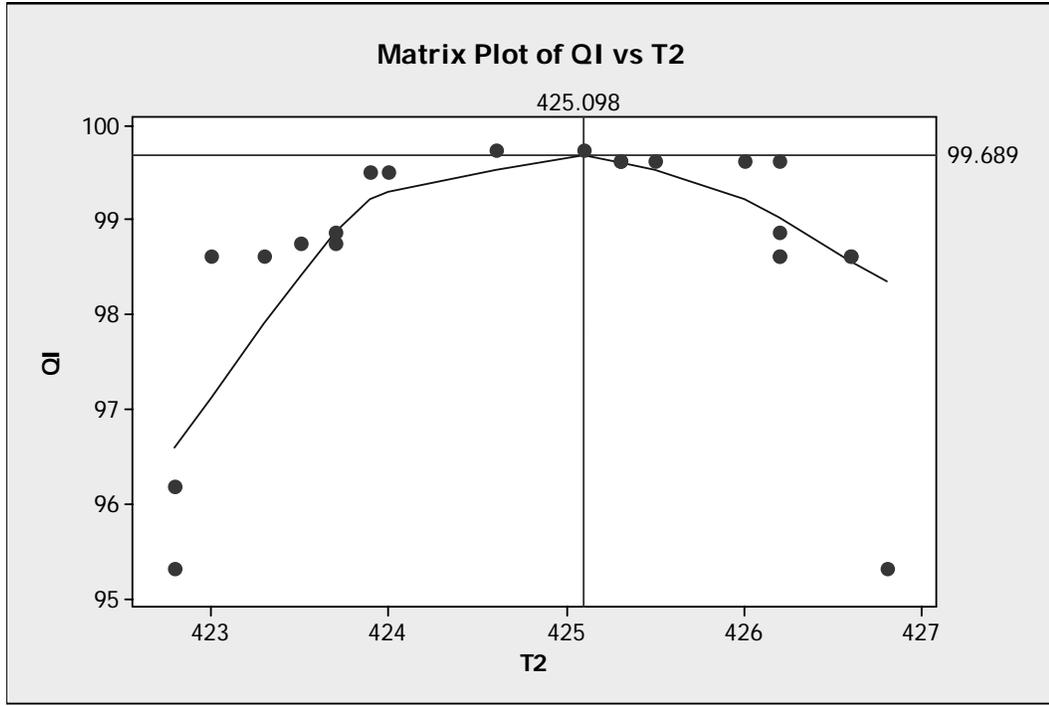


Figura 30. Optimización de la temperatura de boquilla 3

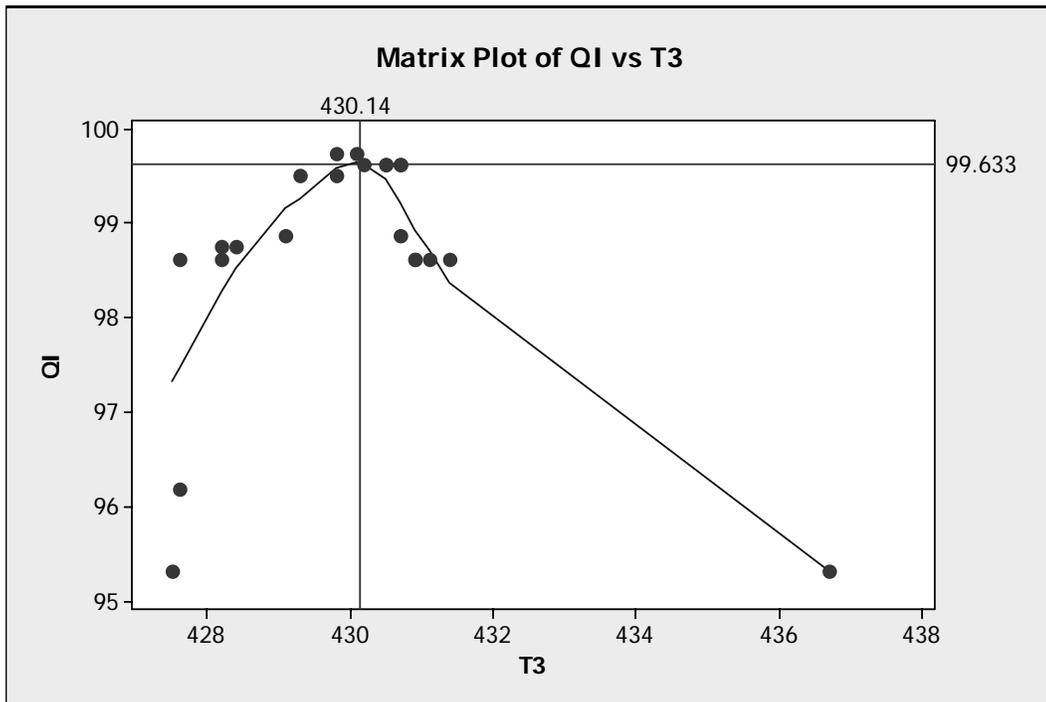


Figura 31. Optimización de la temperatura de barril 4

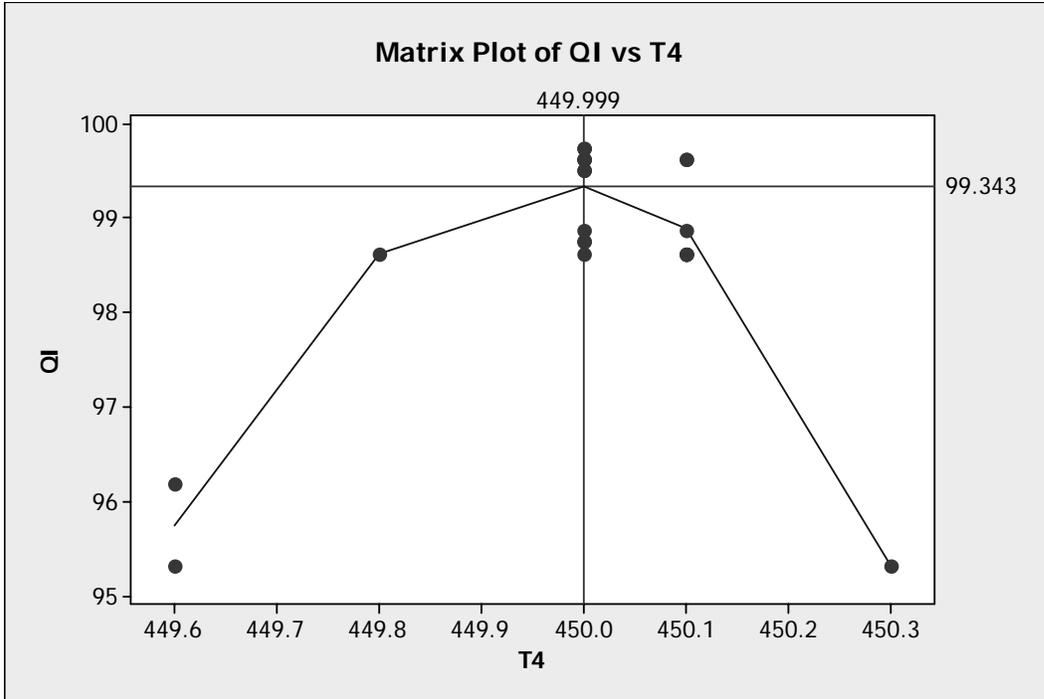


Figura 32. Optimización de la temperatura de barril 5

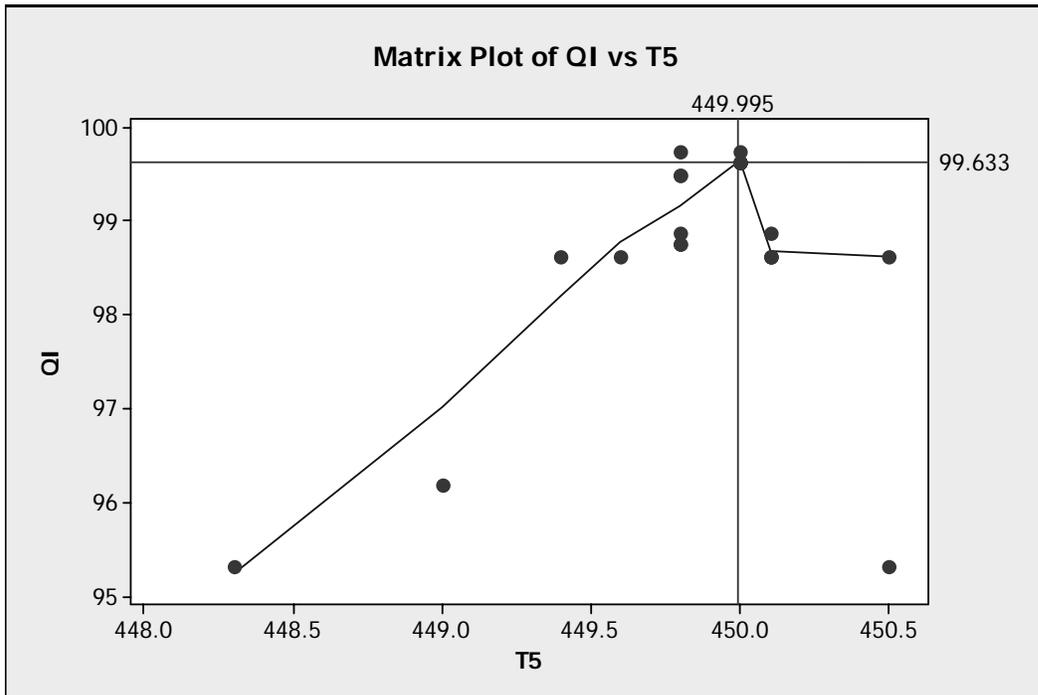


Figura 33. Optimización de la temperatura de barril 6

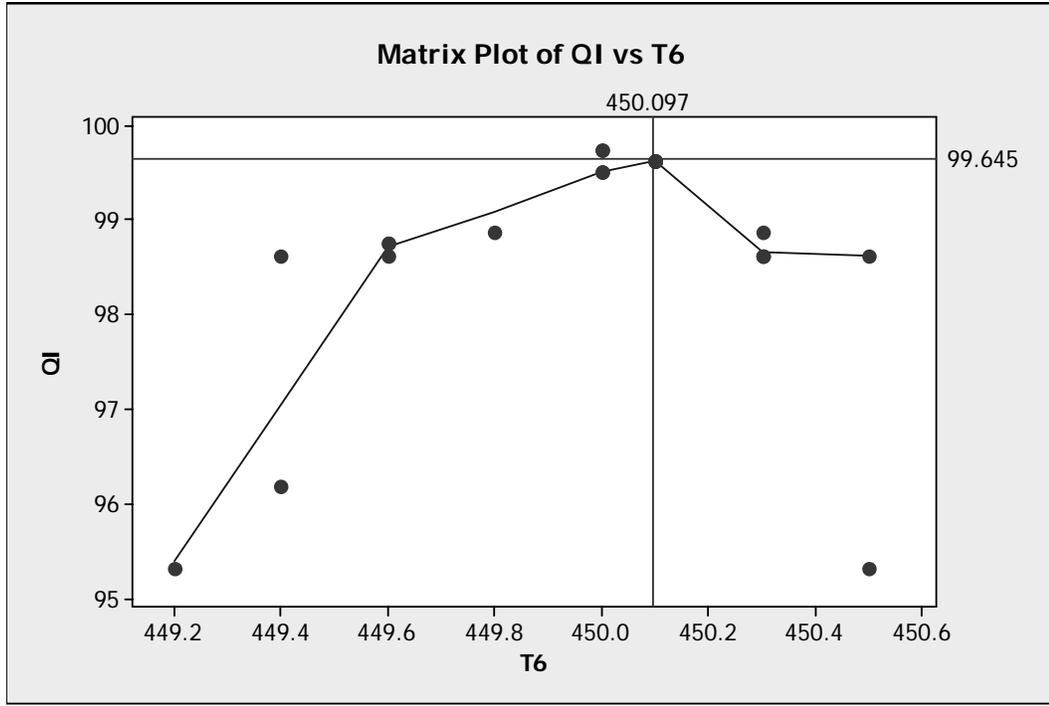


Figura 34. Optimización de la temperatura de barril 7

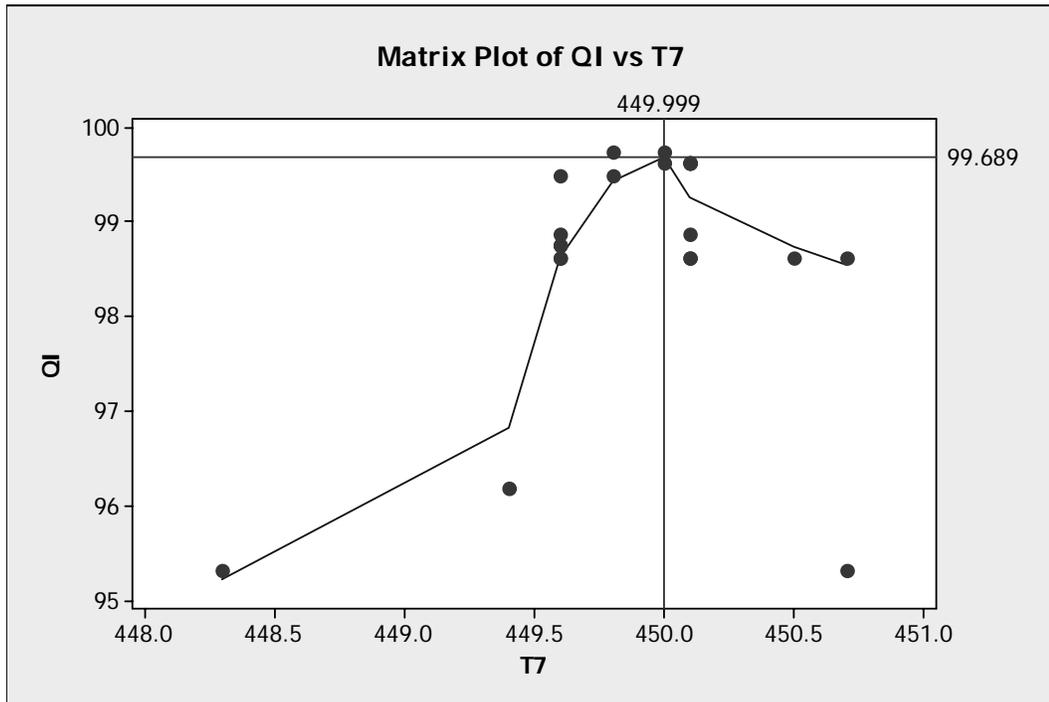


Figura 35. Optimización de la temperatura de barril 8

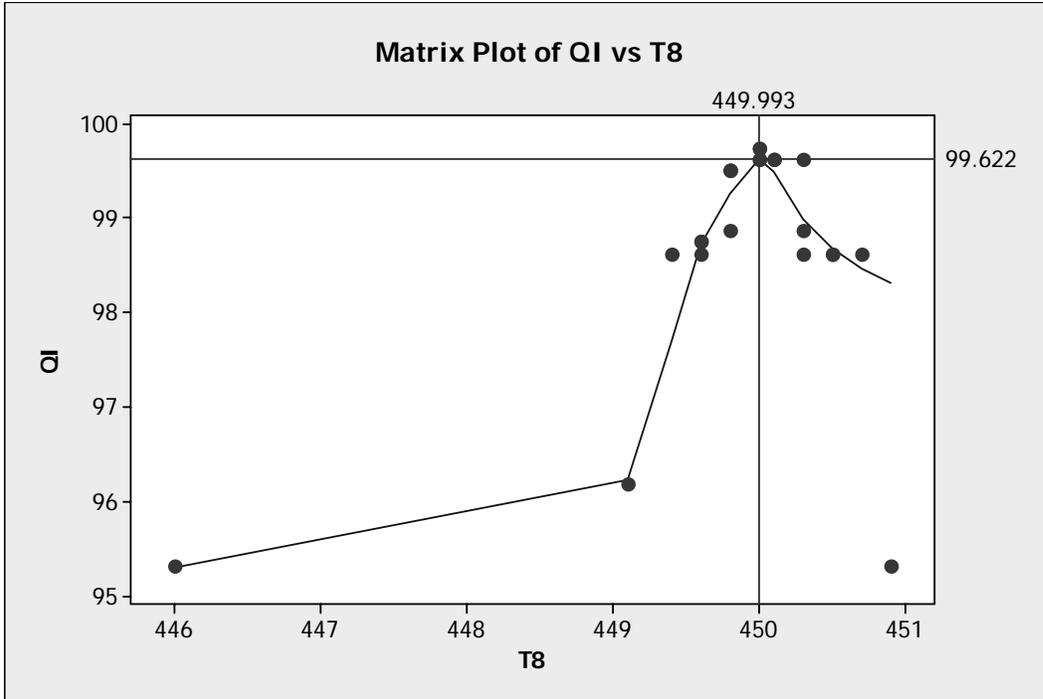
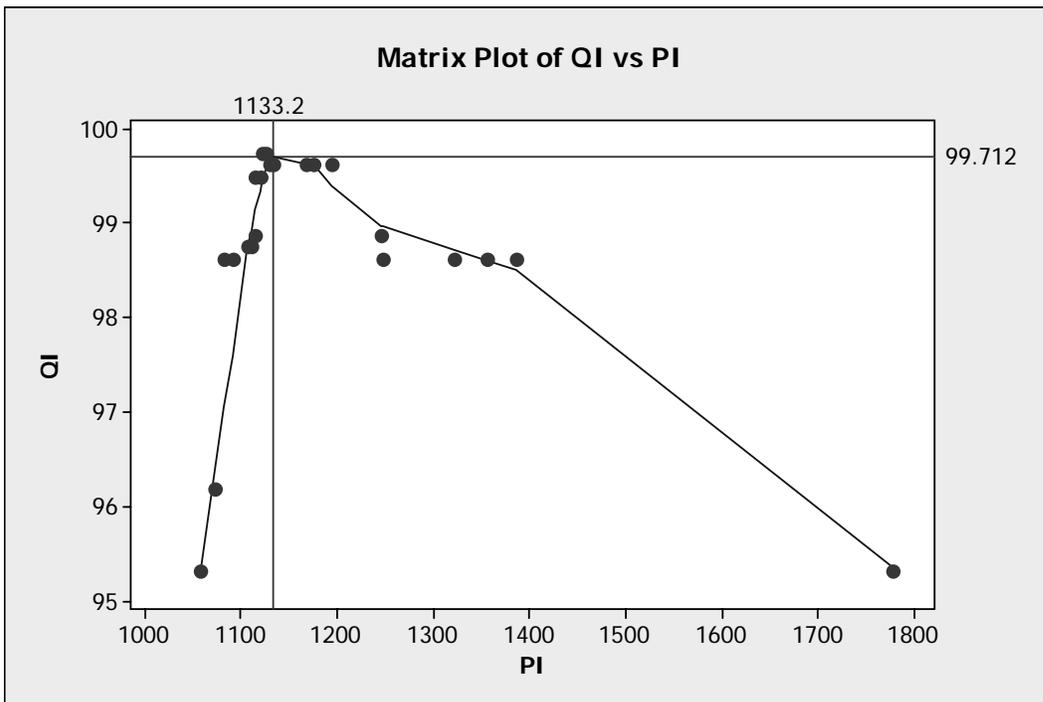


Figura 36. Optimización de la presión de inyección



4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo principal optimizar la presión y las temperaturas en un proceso de moldeo por inyección, para utilizar estas variables como parámetros de control en cualquier tipo de proceso de moldeo en el que se utilice resina de polipropileno como materia prima, esto para mejorar los índices de calidad. Para ello se obtuvieron datos experimentales, simultáneamente, entre la presión de inyección, temperaturas de las diferentes zonas de calentamiento e inyección, y los defectos que afectan la calidad final del producto para establecer curvas de temperatura y presión (gráficos) con respecto a los índices de calidad, obtenidos de defectos del producto, y determinar su interrelación; así como también relacionar la presión de inyección y las temperaturas con los defectos del producto, obteniendo parámetros de comparación entre los defectos y las variables críticas del proceso.

En la actualidad se realizan muchos productos de polipropileno, tales como: películas para alimentos, snacks, cigarrillos, chicles, golosinas; bolsas de rafia tejidas para papas y cereales; envases industriales; hilos, cabos; tapas en general; envases, cajones para bebidas; baldes para pintura, helados, etc. (ver sección de anexos, figura 20). La importancia de este trabajo de graduación radica en el hecho que una gran parte de los plásticos producidos mundialmente son utilizados para envase y embalaje (ver sección de anexos, figuras No. 18, 19 y 20), esto conlleva a que las empresas manufactureras empiecen a ver los beneficios de tener máquinas que moldeen sus propias botellas y tapas, ahorrando a largo plazo costos de empaque de sus productos, tiempos de producción, retrasos por falta de materia (envases y tapas), manejo de proveedores, etc.

Es importante optimizar algunas variables del proceso de moldeo de plásticos ya que la calidad del producto final depende en gran medida del monitoreo y estabilización de ciertas variables, que al no ser controladas debidamente, producen defectos en las piezas, las cuales deben ser rechazadas debido a su mal aspecto visual. Por ello es necesario tomar en cuenta los parámetros a controlar en un proceso de inyección de resina, como lo son las temperaturas de las diferentes zonas y la presión de inyección; ya que de las temperaturas depende la viscosidad del plástico y su fácil manejo para ser inyectado y moldeado, y de la presión de inyección depende la fuerza con la que saldrá el flujo de plástico para el moldeo. Estos parámetros se relacionan directamente con la calidad del producto e influyen de manera directa en los costos por pérdidas de producto terminado que presentan estos procesos, debido a problemas de calidad derivados de los cambios no controlados de temperatura y/o presión; los cuales afectan, de manera importante, la presentación del producto final al consumidor.

Los datos fueron obtenidos en una inyectora debido a que los parámetros que se pretenden utilizar, son aquellos que están involucrados en el proceso de calentamiento y manejo del polipropileno para su posterior moldeo; proceso que se utiliza en los tres principales moldeos de plásticos: inyección, extrusión y soplado, con el único inconveniente que en el proceso de soplado se utilizan, por el momento, solamente preformas con PET (polietileno tereftalato), pero se espera poder encontrar un método para aclarar el polipropileno y poder utilizar éste también en las máquinas de soplado (ver sección de anexos, artículo 1). No obstante, en la actualidad, los datos obtenidos podrán ser utilizados como parámetros de control para las inyectoras y las máquinas de extrusión, ya que en ambos equipos se utiliza como producto principal la resina de polipropileno.

El estudio se realizó con resina de polipropileno, no solo porque es el plástico mayormente utilizado para moldeo (ver sección de anexos, figura 22), sino también por su reciclaje en el proceso; ya que por medio de un molino, se muelen los artículos

rechazados por defectos que no tengan que ver con problemas de calidad de la resina sino con el mal control del proceso, y esta resina molida se mezcla con la resina nueva y se reutiliza ésta para la producción; situación que no se puede realizar con las preformas de PET.

La toma de datos experimentales se realizó en una inyectora con capacidad o fuerza de cierre de 250 ton., ya que este tipo de máquinas son las más empleadas en la industria en general; y mayoritariamente para la producción de envases y embalajes (ver sección de anexos, figura 23). Este muestreo se realizó estratificando los tiempos de muestreo en 3 partes, cada una de 8 horas, tomando en cuenta el estrato de tiempo de 9:00 AM a 5:00 PM y realizando el muestreo general de todas las variables cada media hora durante dos días de producción continua, obteniendo 22 series de datos de temperaturas para cada una de las 8 zonas de calentamiento y para la presión de inyección. Paralelo a esta recopilación de datos, se obtuvieron las muestras de tapa y se identificó el número de muestra para la revisión de calidad, mediante la cual se determinaron los índices de calidad y defectos principales de las tapas.

El muestreo se hizo de esa manera debido a diferentes razones; una de ellas es que se realizó la recopilación de datos en producción continua del mismo producto para que el estudio tuviera una mejor precisión, ya que al momento que se realiza un cambio de producto en la máquina, ésta se desconfigura y se desestabiliza. Además, se tomaron muestras de la pieza moldeada de manera paralela a la recopilación de datos para determinar la influencia de los cambios de temperaturas y presión de inyección en la máquina; con ello poder relacionar los diferentes defectos con respecto a las variaciones de estos parámetros.

Para la optimización del proceso era necesario determinar la calidad del producto con respecto a los parámetros de control, la calidad se entiende como la totalidad de los rasgos y características de un producto o servicio que se sustenta en su habilidad para

satisfacer las necesidades establecidas implícitas (ref. 3). Debido a que la calidad es una característica cualitativa, se utilizan cálculos por medio de muestreo y análisis de defectos en las piezas para determinar un valor cuantitativo de calidad llamado en este proyecto el índice de calidad. Este índice se calcula dividiendo en tres grupos los defectos: leves, moderados y severos.

Los defectos de calidad se clasificaron mediante criterios de apariencia y uso. Un defecto se clasificó como leve cuando la pieza tiene problemas leves de apariencia (poco visibles), los cuales no sesgan la decisión del consumidor y sus características para poder ser utilizado no se ven afectadas. Se consideró un defecto como moderado cuando la pieza tiene problemas serios de apariencia, los cuales pueden sesgar la decisión del consumidor hasta llevarlo considerar no comprar el producto debido a su apariencia (desconfianza de la calidad del producto debido a su apariencia), sin embargo sus características para poder ser utilizado no se ven afectadas. Un defecto severo es aquel que afecta a la pieza en apariencia e influye en sus características de uso, por ejemplo, agujeros en la pieza.

Después de obtener los datos experimentales, éstos fueron analizados estadísticamente mediante dos tipos de gráficas: mediante histogramas, para determinar el comportamiento en general de los parámetros de control, obteniendo datos como la media aritmética o promedio, la desviación estándar, etc. El otro tipo de gráficas utilizadas fueron las de dispersión de pares (X-Y), relacionando los parámetros de control (temperaturas y presión de inyección) en el eje X y los índices de calidad obtenidos después de analizar las muestras en el eje Y, estas gráficas determinan la optimización de las variables mediante máximos. Estos máximos indican los índices de calidad más altos alcanzados durante el proceso y la temperatura a la cual se llegó a obtener este índice de calidad.

Mediante las gráficas de distribución (histogramas) se determinó la media aritmética, la cual indica el centro de gravedad de una distribución, aunque éste no sea necesariamente la mitad; con estos datos se analiza la tendencia general que tiene el parámetro evaluado, para poder compararlo posteriormente con los datos de optimización. Otro parámetro estadístico utilizado fue la desviación, que es una medida (cuadrática) de lo que se apartan los datos de su media, la desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre, ya que la desviación estándar de un grupo repetido de medidas indica la precisión de éstas. Estos dos parámetros estadísticos se obtuvieron para determinar la exactitud (media aritmética) con respecto a la optimización y la precisión (desviación estándar) del proceso.

Analizando los datos estadísticos obtenidos se observa que las medias aritméticas de las cinco temperaturas de barril son muy precisas, oscilan entre 449.8 a 450.0°F; esto se debió varias razones: una de ellas es que el sensor que mide la temperatura está en una de las partes sólidas del barril (específicamente en el tornillo sin fin), esto se relaciona a la precisión de los datos debido a que un plástico es clasificado como un fluido no newtoniano (con viscosidad variable) y la velocidad con la que se mueve el material plastificado es lenta, produciendo un flujo laminar; entonces el sensor de temperatura mide la capa laminar de masa plastificada que está en contacto con el sólido (sistema de transferencia de calor de tipo conducción-convección).

En este punto se podría argumentar que producto de una transferencia de calor por convección forzada (debido al movimiento continuo del material dentro del barril por medio del tornillo sin fin) la masa plastificada debería mezclarse, pero esto no sucede ya que el movimiento es relativamente lento, y la capa en contacto con la parte sólida no se mezcla tan homogénea como el resto del material, manteniendo así un perfil de temperatura constante; además en el proceso se homogeniza directamente la masa del material, no la temperatura. La velocidad moderada del movimiento giratorio se debe a que es necesario evitar desarrollar un flujo turbulento en el proceso, ya que esto haría

que el material plastificado se volviera más líquido y el proceso de moldeo sería imposible.

Aún con esto, el movimiento dentro del barril es imprescindible para homogeneizar lo más que se pueda la masa, esto para llevar los sólidos (pellets) a un estado de fluidez en el que se pueda manejar el material para ser moldeado. Este proceso podría llevarse a cabo mediante la temperatura, pero esto sería exageradamente caro, considerando las elevadas temperaturas que serían necesarias para la plastificación del material (ya que éste es un mal conductor de calor). En cuestión de costos, resulta, a largo plazo, más barato producir un esfuerzo mecánico mediante un motor, que llevar y mantener las temperaturas necesarias para la plastificación en las resistencias de la máquina.

Los esfuerzos mecánicos producidos en este proceso son dos: el primero es el movimiento giratorio del tornillo sin fin, utilizado para homogeneizar la masa de material; además, debido a que el material es un considerado como fluido no newtoniano (debido a su peso molecular), su viscosidad se relaciona al esfuerzo cortante (creado por el movimiento), ayudando con esto a que el fluido disminuya su viscosidad un poco y sea más fácilmente maleable en el proceso de moldeo. El segundo es la presión que ejerce el tornillo sin fin al momento de inyectar el material; la presión disminuye la viscosidad debido a que la presión también ejerce una tensión cortante hacia el fluido.

Con respecto a los datos de optimización de las temperaturas de barril, éstas van desde la temperatura de barril 4 (la inicial) y la temperatura de barril 8 (temperatura final). Los datos de la optimización de las cinco temperaturas de barril son muy precisas entre sí, ya que las temperaturas dentro del barril deben ser constantes en todos los puntos para tener una plastificación uniforme. Dentro del barril se miden temperaturas en varios puntos precisamente para controlar de una mejor manera el que las temperaturas sean constantes. Este proceso de plastificación debe ser lo más constante

ya que la viscosidad va a terminar de reducirse de manera más controlada mediante la presión producida en el momento de la inyección.

Es necesario tener como parámetro final de control del proceso la presión, ya que si las temperaturas fueran demasiado altas y el material perdiera su viscosidad hasta un punto en el que no pudiera moldearse, sería más complicado manipular esta variable de control en la máquina (bajar temperaturas y esperar el enfriamiento del material) que controlar la presión y disminuir con esto la tensión cortante sobre el fluido.

Con respecto a las temperaturas de boquilla, éstas oscilan entre los 425 a 440°F, teniendo diferencias de 15°F; estas temperaturas son menos precisas entre sí, comparadas con la precisión de las temperaturas de barril; esto se debe a varios factores: uno de ellos es la variación de temperatura entre capas de fluido, discutida anteriormente, debido a su naturaleza laminar. El movimiento giratorio ayuda a la homogenización de los gradientes de temperatura (transferencia de calor por convección entre capas) de una manera indirecta, y por ende no muy precisa; esta imprecisión hace evidente ese hecho.

Otra situación expuesta mediante estos resultados es que las mediciones de temperatura de barril son precisas entre sí (debido a lo discutido con respecto a la capa en contacto con el fluido) pero no exactas, ya que al disminuir el área transversal por donde fluye el material plastificado (reducción desde el barril hasta la boquilla) las mediciones de temperatura son más representativas de las diferentes capas del flujo. Por ello son más exactas las mediciones de las temperaturas de barril, pero menos precisas entre sí debido a la naturaleza de flujo laminar del plástico.

En cuanto a los datos de presión de inyección, estos tienen poca precisión entre sí, debido a que en el proceso de plastificación, es el parámetro de control que puede variarse obteniendo una respuesta inmediata por parte de la máquina. Este tipo de

reacción rápida produce menos desperdicios y menos no-conformidades de calidad. Sin embargo, al analizar los datos de la optimización, se observa que el índice de calidad máximo se obtuvo con la presión de inyección; esto sucedió debido a que es más fácil encontrar la presión óptima de inyección que las temperaturas óptimas dada su naturaleza de fuerza.

Con el tema de la energía, se ocupa menos energía eléctrica en reducir un esfuerzo cortante puntual, que una transferencia de calor continua, por ello es más rentable dejar como parámetro de primera variación la presión de inyección. Esto significa que cuando se tienen problemas con la plastificación del material, el primer parámetro de control a manipular es la presión de inyección; si aún variando este parámetro no se obtiene mejoría, entonces se recurre a bajar intensidad a las resistencias que plastifican el material en el barril y/o la velocidad de giro del tornillo sin fin.

Finalmente, los índices de calidad tienen una buena precisión, esto indica que las tapas producidas por la máquina de inyección tienen un alto grado de calidad, y este grado de calidad es constante durante todo el proceso de producción. Esto también indica que hay un buen control de parámetros que pueden afectar la calidad del producto. En un proceso de producción es prácticamente imposible que el 100% de un lote salga sin problemas, pero un índice de calidad alto refleja un buen control del proceso y una buena elección de los parámetros de control críticos. Otro aspecto importante que reflejan los índices de calidad es el tipo de defectos encontrados, ya que al obtener índices altos se determina que las no-conformidades encontradas son de tipo leve (ya que el índice de calidad no se ve afectado de una manera muy marcada con la aparición de estos defectos) y si en caso se encuentran defectos de calidad severos, estos pueden ser aislados del proceso ya que su incidencia en el proceso de producción es casi nula.

CONCLUSIONES

1. La optimización de los parámetros de temperatura y presión de inyección permite mejorar los índices de calidad, eliminar defectos en el producto final, reducir tiempos muertos de producción, mantener constante la calidad durante todo el proceso y maximizar el uso de los recursos en general.
2. La obtención y análisis de datos experimentales en un proceso de inyección es de vital importancia para definir cuáles serán los parámetros críticos de control del proceso y estandarizarlos hacia un dato objetivo que conlleve una minimización de defectos de calidad.
3. La presión de inyección y las diferentes temperaturas del proceso de inyección deben ser monitoreadas para definir qué tipo de defectos pueden provocar, en el futuro, conocer como evitar los defectos a través del manejo de los parámetros antes mencionados.
4. Los índices de calidad están altamente ligados con el control de los parámetros del proceso, por ello es necesario el uso de gráficos descriptivos con los cuales se pueda determinar esta relación y maximizar con ello todo el proceso.

RECOMENDACIONES

1. La importancia del proceso experimental de optimización radica en la mejora total del proceso de inyección, mediante la obtención de índices de calidad máximos, determinando los parámetros de temperaturas y presión de inyección hacia los cuales deben estar dirigidos los controles principales del proceso.
2. La presión de inyección es el parámetro más aconsejable de variar en un proceso de inyección cuando se encuentran problemas leves de plastificación, debido a que su manejo consume menos energía en general y es menos complejo que las temperaturas.
3. Las temperaturas de barril son parámetros de control con los cuales se logra que el proceso de calentamiento sea constante, mientras que las temperaturas de boquilla son parámetros de control del proceso de plastificación que proporcionan una mayor exactitud, en cuanto a la transferencia de calor, en comparación con las temperaturas de barril.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Smith, William F. **Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales**. 2ª edición. España: editorial McGraw-Hill Interamericana, 1993. 936pp.
2. Wingrove, Allan. **Química orgánica**. 1era edición en español. México: editorial Harla. 1984. 1569pp.
3. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería **Diseño de moldes de inyección de termoplásticos**. http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/proceso_inyeccion.html. Fecha de Consulta: 05 de Marzo de 2006.
4. **Textos científicos**. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno>. Fecha de consulta: 04 de Marzo de 2006.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jonson, Robert. **Estadística elemental**. 1ª edición en español. México: editorial Grupo Iberoamericana S.A. de C.V., 1993. 592pp.
2. PlastUnivers. Plásticos Universales-83-Marzo 2003-Informe. <http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=2893>. Fecha de Consulta: 07 de Marzo de 2006.
3. Centro Español de Plásticos. **Estudio del sector**. <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>. Fecha de Consulta: 07 de Marzo de 2006.

APÉNDICE

A. Muestra de cálculo

Los índices de calidad fueron obtenidos del análisis cualitativo de los defectos de las piezas moldeadas mediante ecuaciones empíricas determinadas para el tipo de máquina de inyección analizada:

- Defectos leves:
$$D_1 = \frac{0.5*d_1}{N}$$
 ecuación 1

- Defectos moderados:
$$D_2 = \frac{3.5*d_2}{N}$$
 ecuación 2

- Defectos severos:
$$D_3 = \frac{13.25*d_3}{N}$$
 ecuación 3

Donde: D = porcentaje en que afectan los defectos (según tipo)

d = número de defectos en una corrida (según tipo)

N = número de muestras analizadas en una corrida

Los porcentajes en que afectan los defectos según tipo (D), se suman para obtener el total y éste se resta del 100%; determinando así el índice de calidad para cada corrida:

- Índice de calidad:
$$I = 100 - \Sigma(D_1, D_2, D_3)$$
 ecuación 3

B. Otros datos experimentales

Figura 37. Histograma del tiempo de inyección

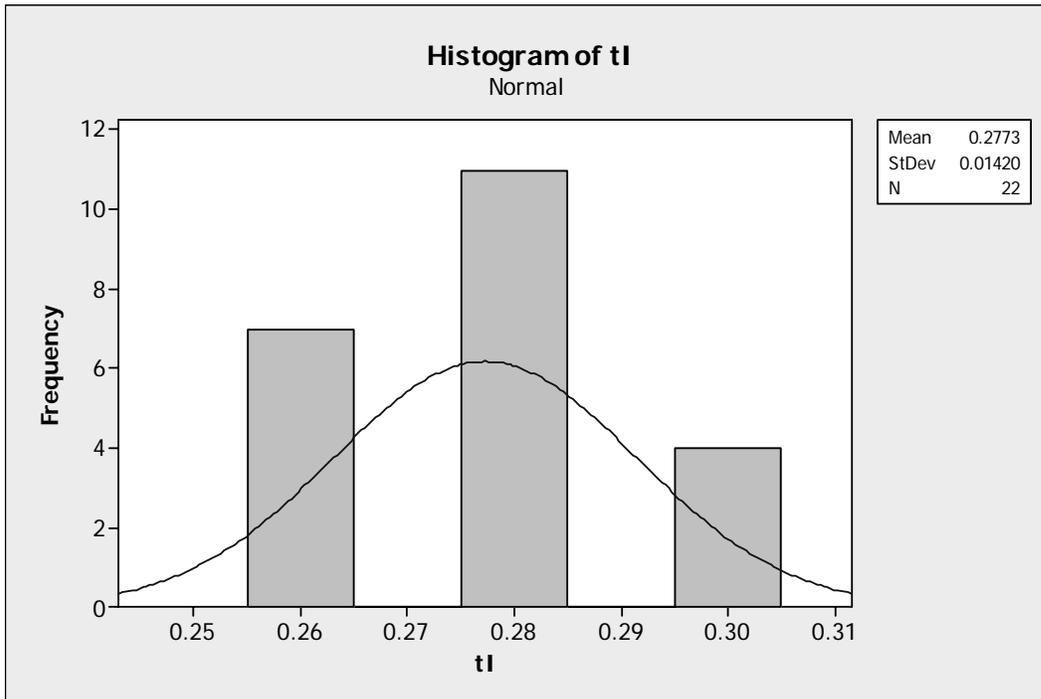


Figura 38. Histograma de la velocidad de inyección

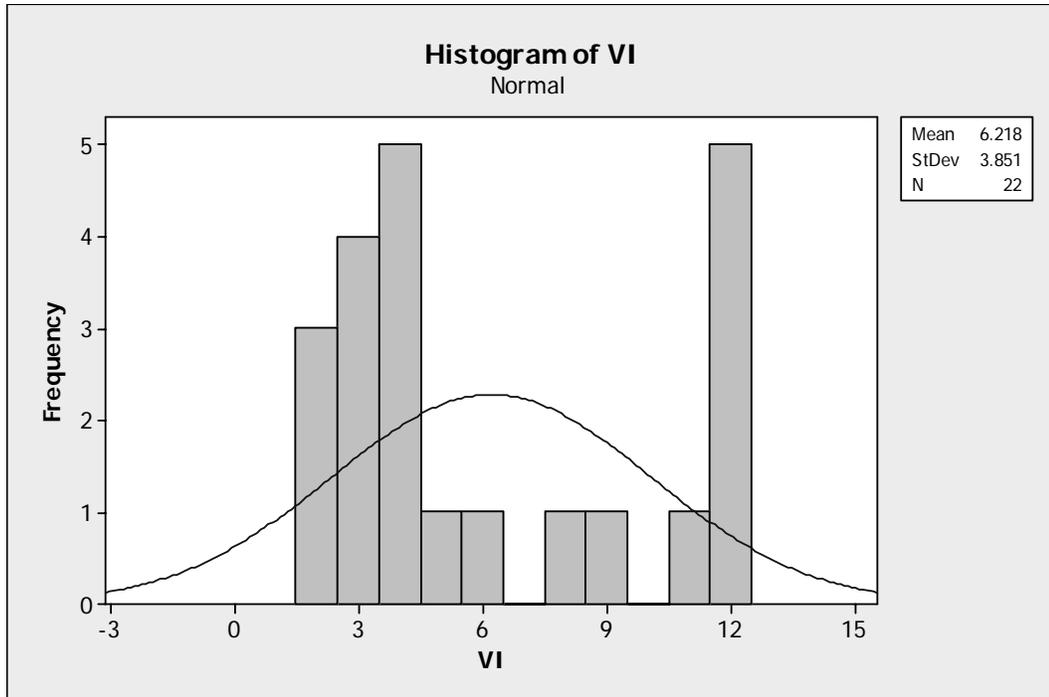


Figura 39. Histograma del peso de las tapas del molde 1

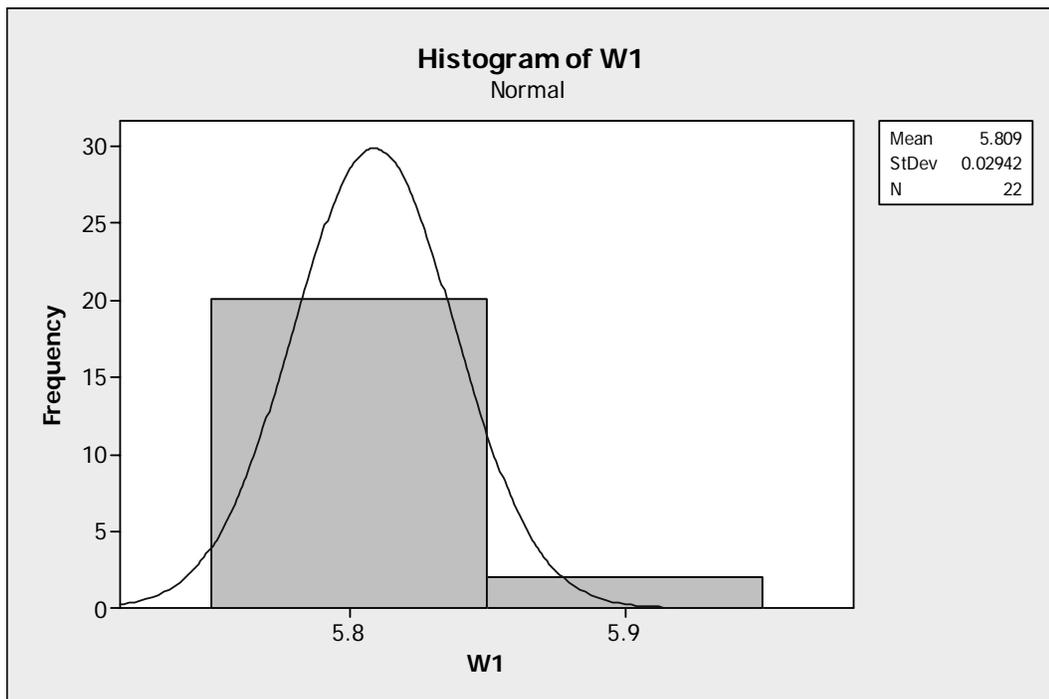


Figura 40. Histograma del peso de las tapas del molde 2

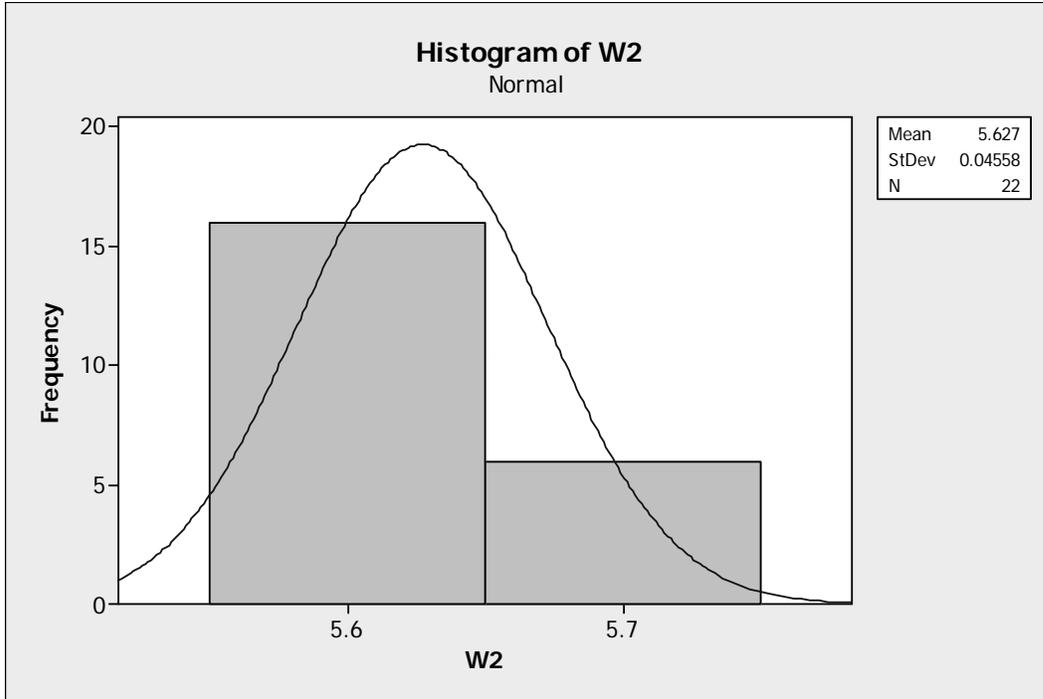


Figura 41. Histograma del peso de las tapas del molde 3

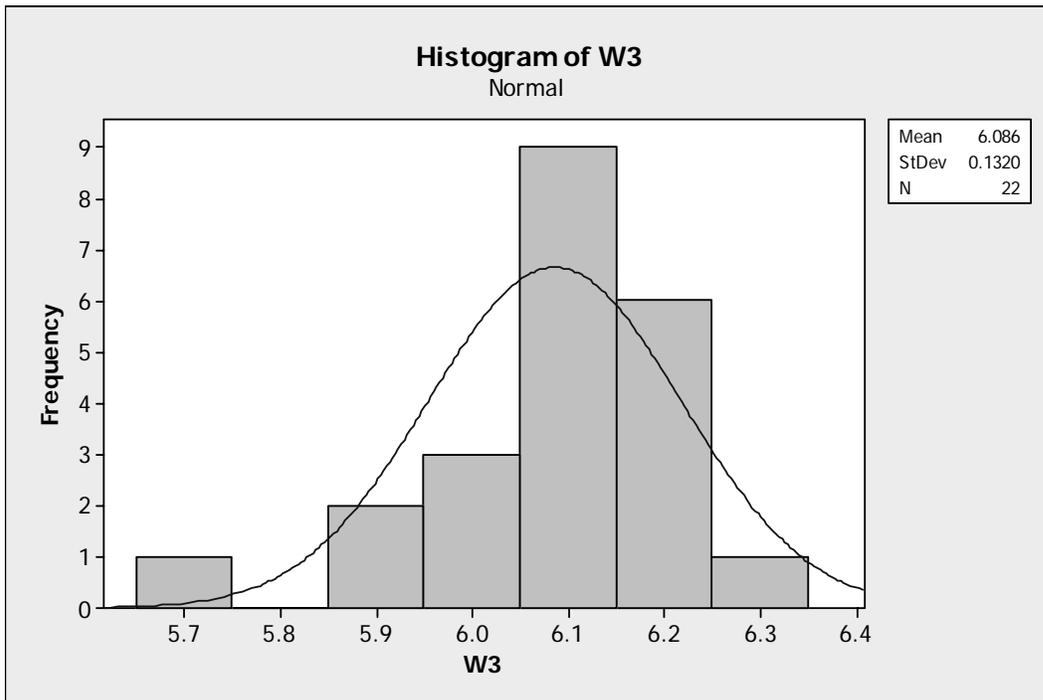


Figura 42. Histograma del peso de las tapas del molde 4

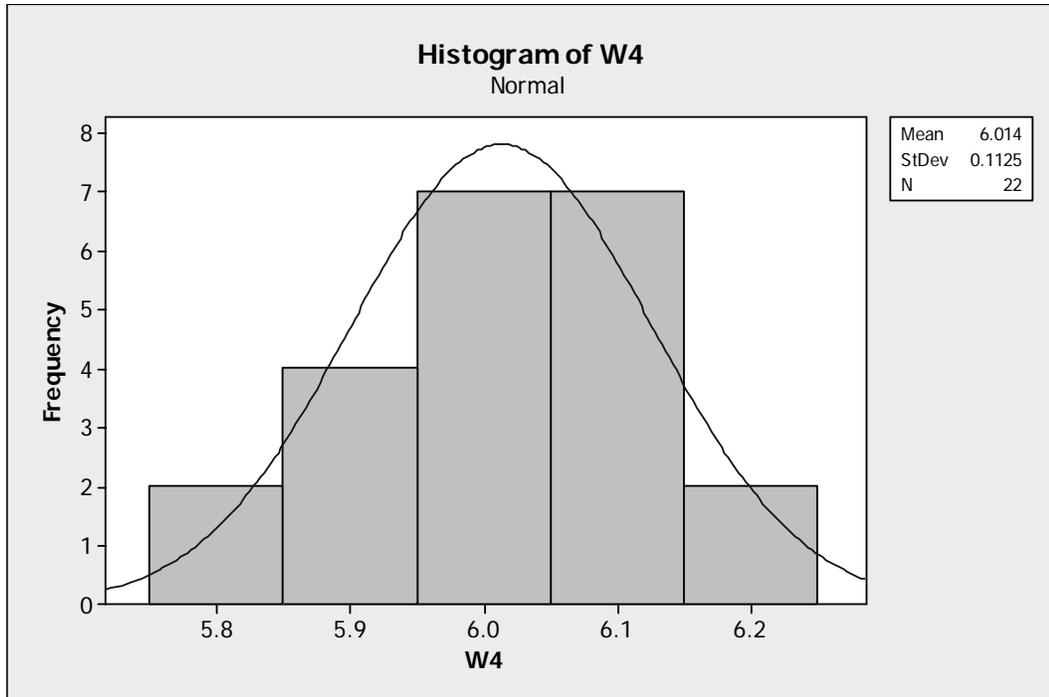


Figura 43. Histograma del tiempo de enfriamiento

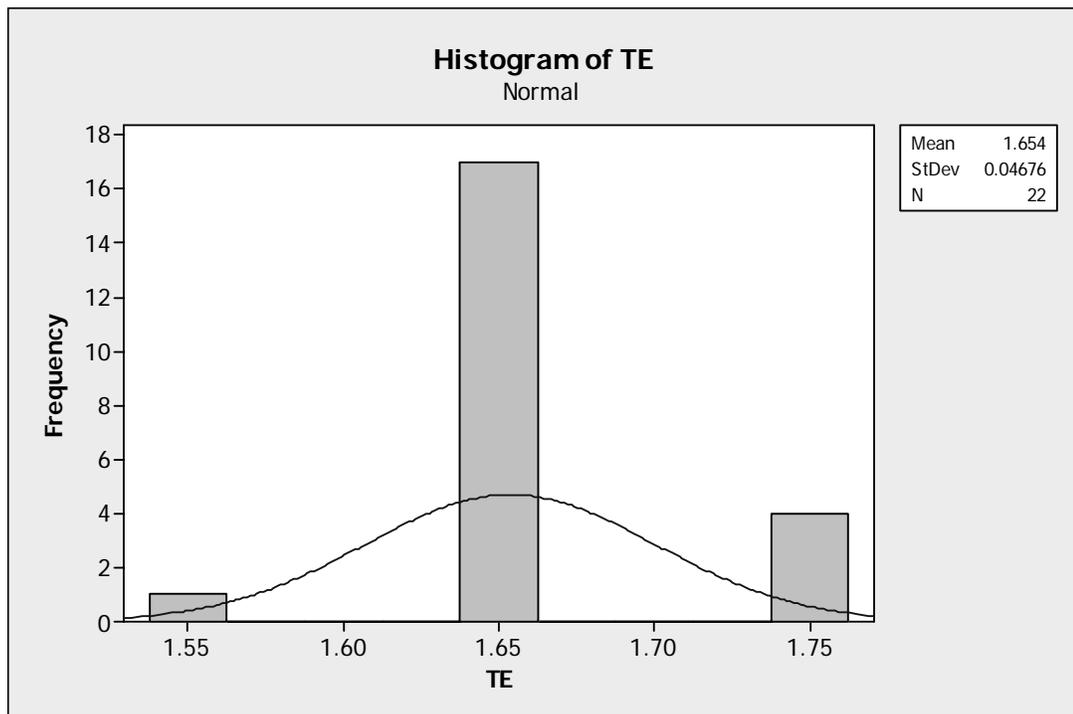


Figura 44. Histograma del tiempo de sostenimiento

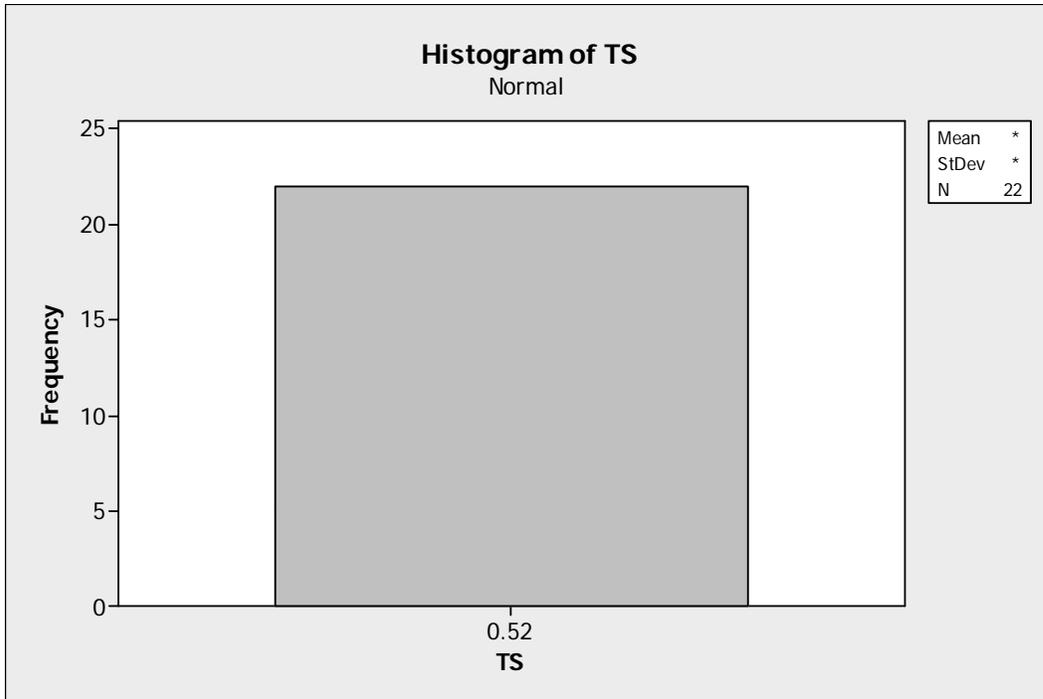


Figura 45. Histograma de la presión de sostenimiento

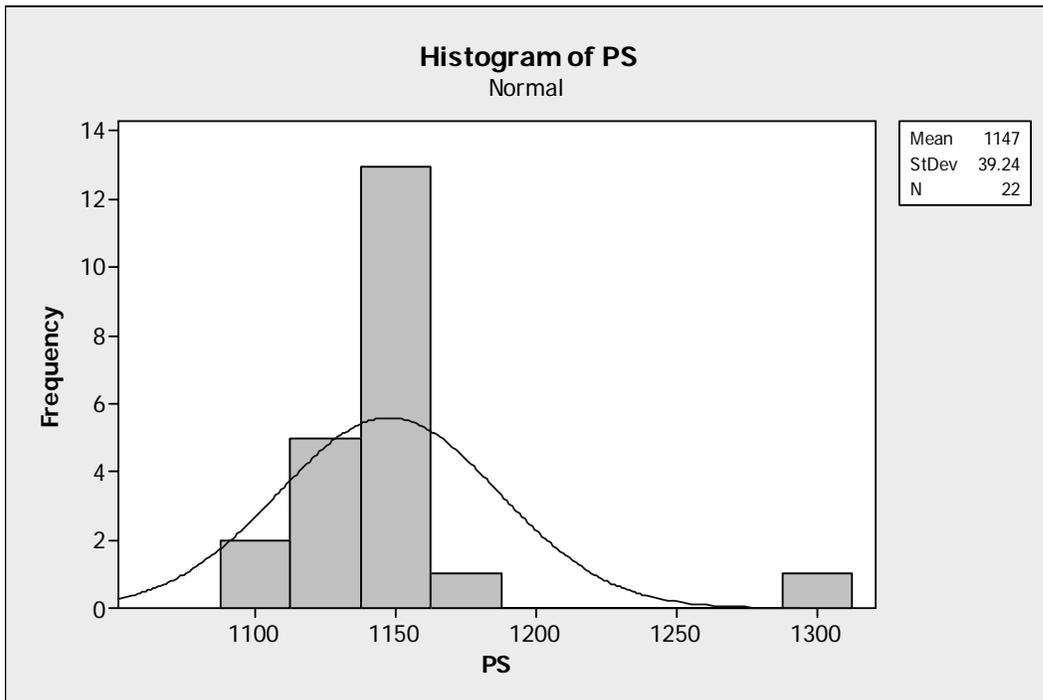
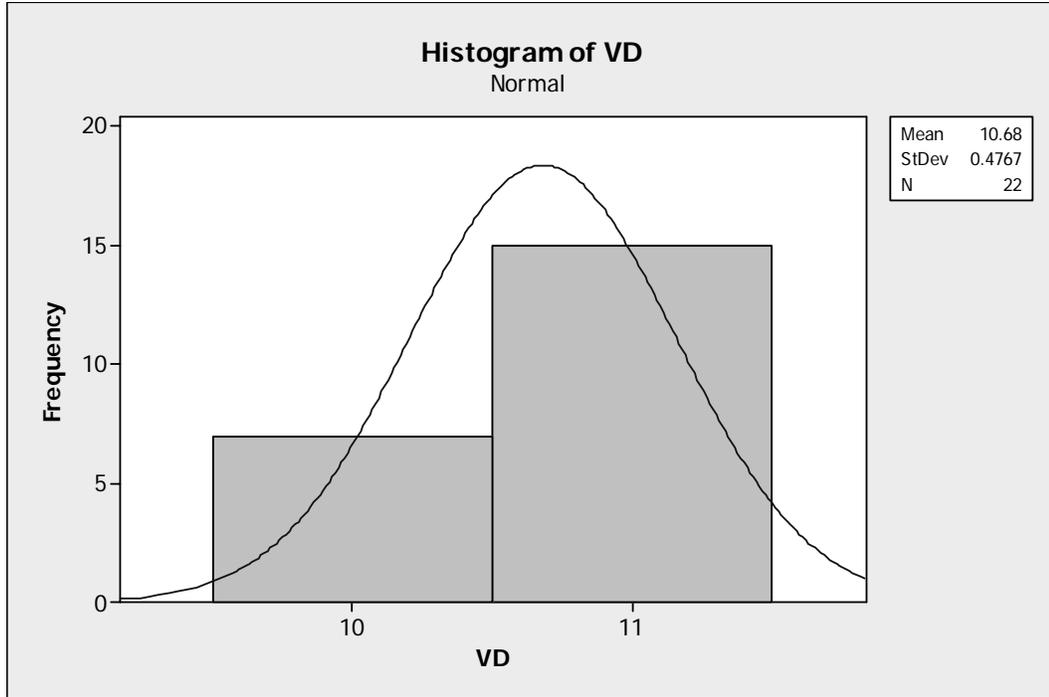


Figura 46. Histograma de la velocidad de dosificación



C. Datos originales

Tabla XII. Datos originales utilizados para la optimización

No.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	PI
1	429.6	423	427.6	450.1	448.3	449.2	449.4	446	1778
2	441.5	426.2	430.7	449.6	449.8	449.4	448.3	450.1	1108
3	442	426.8	431.1	450	450	450	450.1	450	1167
4	442.6	422.8	430.9	450.1	449.8	450.3	449.8	450.3	1123
5	441.1	426.2	429.1	450	449.8	450.3	449.6	450.5	1246
6	445.6	425.3	428.2	450.1	449.8	450.3	449.6	450	1115
7	435.4	426.2	436.7	450	449	450	449.6	449.6	1130
8	428.5	423.7	427.5	450.3	450.5	450.1	450.7	450.9	1091
9	435	425.3	428.4	450.1	449.8	450.3	450	449.8	1386
10	443.8	425.1	430.7	450	450	449.4	450.7	449.6	1195
11	440.2	426	428.2	450	449.8	450	450.1	449.4	1355
12	437.9	426.2	430.5	450.1	450	450.1	450.1	450	1120
13	443.1	424.6	427.6	450	450	450	450	450.7	1115
14	429.1	423.7	430.5	450	450	449.8	449.8	449.6	1134
15	442.6	426.6	431.4	450	450.1	450.1	450.1	450.3	1073
16	429.3	424	430.9	450.1	449.6	449.6	449.6	450.5	1057
17	429.1	423.5	430.2	449.6	449.4	449.6	449.6	449.1	1083
18	428.2	423.9	430.1	450	450.1	450.1	450.1	450	1175
19	441.5	426.6	430.7	450	450.5	450.5	450.1	449.8	1247
20	444.9	425.5	429.8	450	450.1	449.6	449.6	450.1	1322
21	426.9	422.8	429.8	450.1	450	450.1	450.1	449.8	1126
22	440.2	423.3	429.3	449.8	450.1	450.5	450.5	450.3	1110

Tabla XIII. Datos originales de otros datos experimentales

No.	tl	VI	W1	W2	W3	W4	TE	TS	PS	VD
1	0.26	3.4	5.8	5.6	6.2	5.9	1.64	0.52	1153	10
2	0.28	4.2	5.8	5.6	5.7	6	1.74	0.52	1095	10
3	0.26	2.8	5.8	5.6	6	6	1.74	0.52	1144	11
4	0.3	2.4	5.9	5.7	6	6.1	1.74	0.52	1307	11
5	0.28	3.6	5.9	5.7	6.2	6.1	1.54	0.52	1153	11
6	0.26	11.3	5.8	5.6	6	6	1.74	0.52	1143	11
7	0.28	3.6	5.8	5.6	6.1	6.1	1.64	0.52	1141	11
8	0.26	11.5	5.8	5.6	6.2	5.9	1.64	0.52	1154	11
9	0.28	2.9	5.8	5.7	6.3	6.1	1.64	0.52	1134	10
10	0.28	8.7	5.8	5.6	6.1	6.1	1.64	0.52	1165	11
11	0.28	5.4	5.8	5.6	6.1	5.9	1.64	0.52	1143	11
12	0.26	11.9	5.8	5.6	5.9	5.9	1.64	0.52	1146	10
13	0.28	4.2	5.8	5.6	6.1	6.1	1.64	0.52	1133	11
14	0.28	11.9	5.8	5.7	6.2	6.2	1.64	0.52	1147	11
15	0.26	11.9	5.8	5.6	6.2	6.2	1.64	0.52	1134	10
16	0.28	11.8	5.8	5.6	5.9	6	1.64	0.52	1143	11
17	0.26	2.4	5.8	5.7	6.1	6	1.64	0.52	1114	11
18	0.3	4.1	5.8	5.6	6.1	5.8	1.64	0.52	1125	11
19	0.28	8.3	5.8	5.6	6.1	5.8	1.64	0.52	1112	10
20	0.3	1.9	5.8	5.7	6.2	6.1	1.64	0.52	1146	10
21	0.28	6.1	5.8	5.6	6.1	6	1.64	0.52	1156	11
22	0.3	2.5	5.8	5.6	6.1	6	1.64	0.52	1156	11

D. Datos calculados

Tabla XIV. Datos calculados para la optimización

No.	D1	D2	D3	QI
1	4			99.5
2	2	1		98.88
3	4	1		98.63
4	3			99.63
5	4	1	1	95.31
6	2	1		98.88
7	3			99.63
8	3			99.63
9	4	1		98.63
10	3	1		98.75
11	4		1	96.19
12	2			99.75
13	4	1	1	95.31
14	4	1		98.63
15	3	1		98.75
16	2			99.75
17	4	1		98.63
18	4	1		98.63
19	3			99.63
20	4	1		98.63
21	3			99.63
22	4			99.5

ANEXOS

Artículo 1: El polipropileno quiere ser una alternativa para el PET

**Plásticos Universales - 83 - Marzo 2003
- Informe**

Preformas de polipropileno producidas con un sistema Husky GL300 de 48 cavidades

El polipropileno quiere ser una alternativa al PET

ENVASES Y EMBALAJES

Se está considerando al polipropileno como una alternativa al PET para ciertas aplicaciones de embotellado. Su coste relativamente poco elevado y los recientes descubrimientos y las mejoras en claridad han atraído la atención de los productores de la industria del envasado. Sin embargo, antes de realizar la selección de un material para un nuevo proyecto de envasado, es necesario realizar un estudio profundo de las ventajas clave e inconvenientes que presenta.

Redacción PU



Aunque los ciclos de su moldeo por inyección sean más largos, la inversión de capital en las líneas de producción de preformas de PP puede ser menor que su equivalente para el PET. Se pueden realizar considerables ahorros mediante la utilización de sistemas de canal caliente con boquilla térmica, pues son menos costosos y requieren menos mantenimiento que los obturadores, y la eliminación de los costes relacionados con secadores de resinas y equipos de cristalización del cuello para llenado en caliente.

Más adelante en la línea de producción de la botella, el proceso de recalentamiento-estirado-soplado de los envases de PP requiere un control más cuidadoso. Las botellas de PP tienen un estrecho margen de temperaturas de funcionamiento, que oscila entre los 3-5°C, comparados con los 10-15°C para el PET.

Comparación entre PP y PET

Hay algunos factores que deben ser reconsiderados cuando se contempla la utilización del PP para una aplicación de embotellado.

Por un lado, la estabilidad térmica del PP es mucho mayor que la que ofrece el PET, lo cual representa una ventaja considerable para las aplicaciones de llenado en caliente. Esto debería permitir la eliminación de la necesidad de procesos de cristalización del cuello u otros procesos especiales implicados en el llenado en caliente para PET.

Por otra parte, la elevada permeabilidad del O₂ y del CO₂ conlleva que, en ciertos casos, los envases de PP requerirán la presencia de una capa barrera, mientras que para el PET no será necesaria ninguna.

Además, los ratios de estiramiento del PP harán que las secciones de pared de las preformas sean más cortas y más gruesas que las de PET. Este incremento de grosor de pared, junto con una conductividad térmica más baja para el PP, darán como resultado un ciclo de moldeo más largo.

Por último, para aproximarse a los valores de resistencia y claridad del cristal del PET, las resinas para botellas de PP deberán incluir un agente clarificador, que puede llegar a incrementar el coste del PP en hasta un 6 por ciento. Hoy en día Husky ya ha producido sistemas de preformas PP que están comercializadas

	PP	PET
Densidad	0,85-0,94 g/cm ³	1,34-1,39g/cm ³
Permeabilidad del CO ₂	31x	1
Permeabilidad del O ₂	23 x	1
Permeabilidad del agua	0,2x	1
Resistencia al calor	100 °C	70 °C
Resistencia química	Excelente	Buena
Resistencia al olor	Poco elevada	Buena

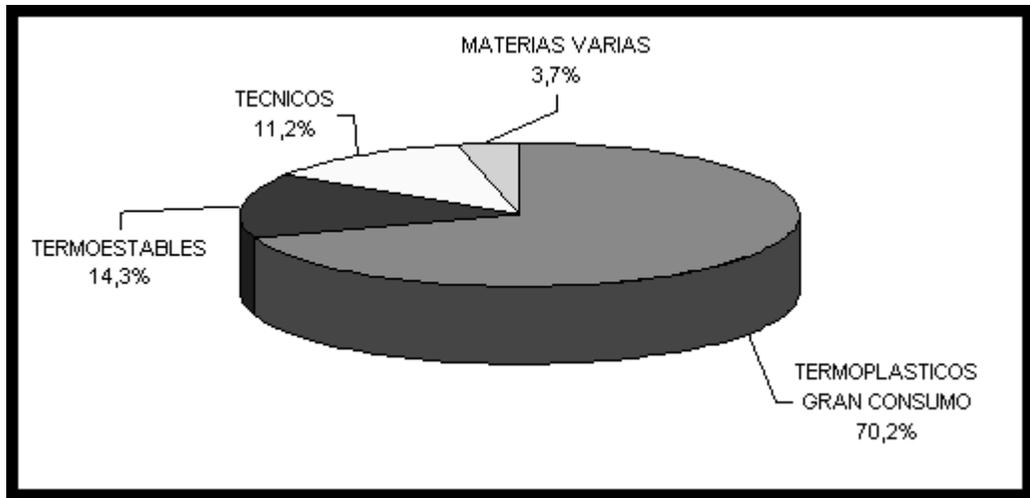
Propiedades características de las resinas utilizadas para el embotellado

	PP	PET
Peso de la botella	17 g	16,2 g
Grosor de la pared de la botella	1,2 mm	0,8 mm
Grosor de la pared de la preforma	4,0 mm	2,2 mm
Valor de estiramiento axial	2,5	2
Tiempo de ciclo en GL300	17 s	9 s
Resistencia química	Excelente	Buena
Resistencia al olor	Poco elevada	Buena

Estudio realizado en una botella de 500 ml

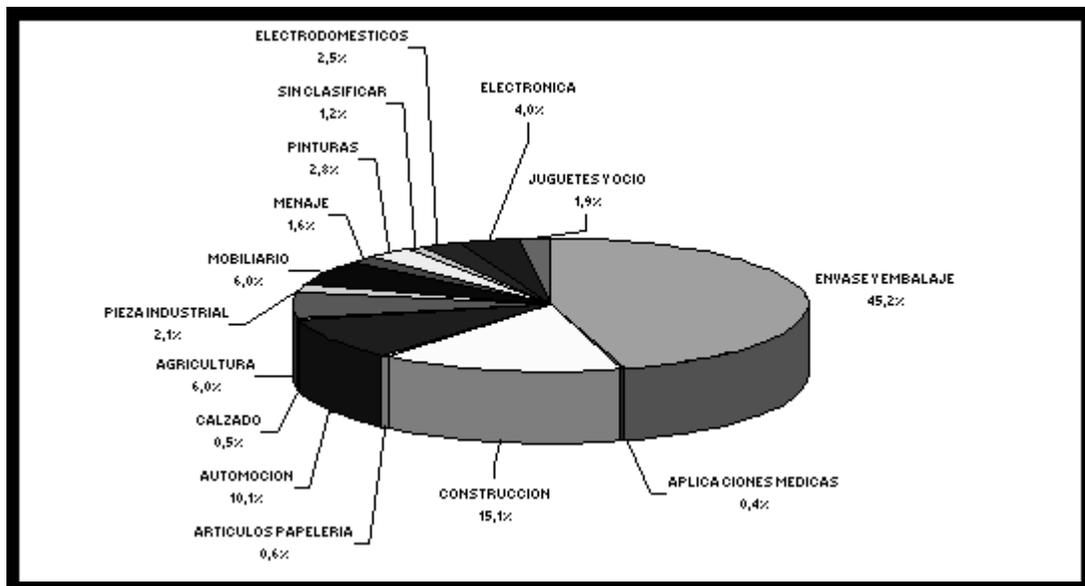
Fuente: <http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=2893>

Figura 47. Participación de los mercados en el consumo estimado (año 2004) I



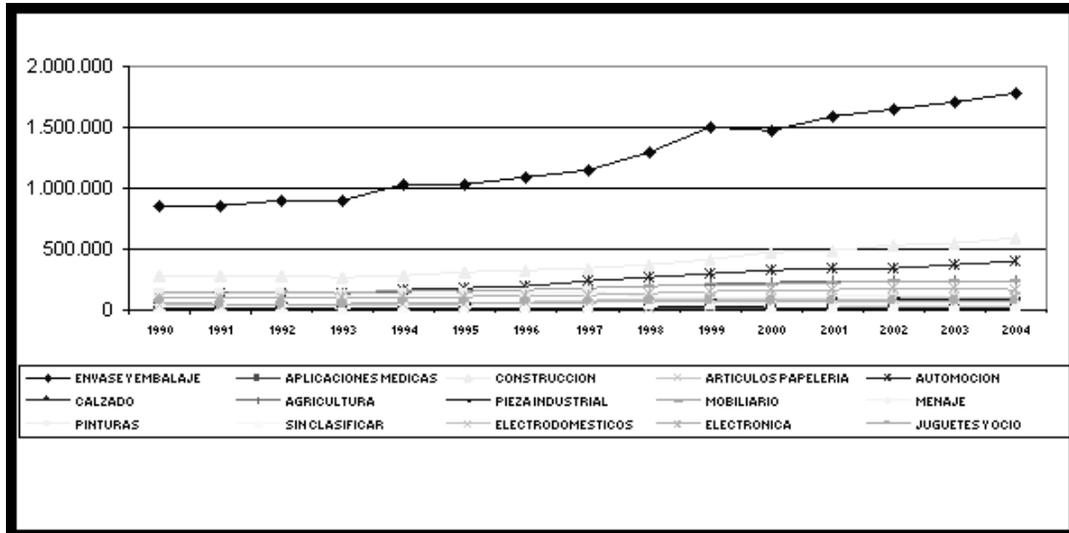
Fuente: <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>

Figura 48. Participación de los mercados en el consumo estimado (año 2004) II



Fuente: <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>

Figura 49. Participación de los mercados en el consumo estimado (año 2004) III



Fuente: <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>

Figura 50. Participación de los mercados en el consumo estimado (año 2004) IV



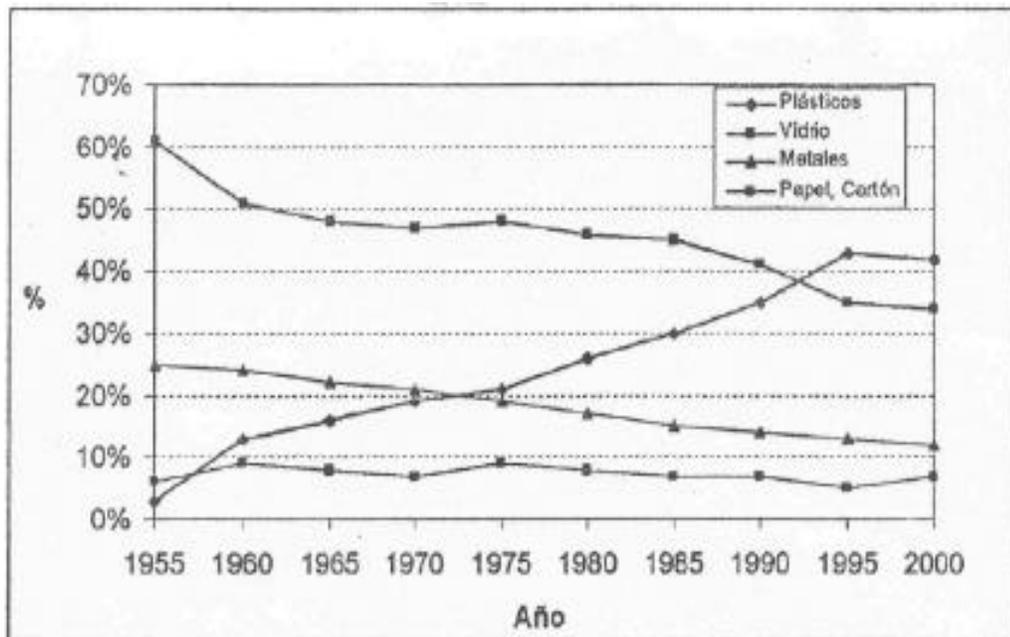
Fuente: <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>

Figura 51. Participación de los mercados en el consumo estimado (año 2004) V



Fuente: <http://www.cep-inform.es/esp/publicaciones/estudiosector.asp>

Figura 52. Distribución por materiales del total de embalajes



Fuente: http://www.propilven.com/biblio_conceptos.asp