

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Propuesta de un proceso de purga en inyección de plásticos
que minimice los residuos y tiempos de aplicación mediante el
análisis de reología

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

Jorge Luis Guerrero Lara

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico en primer lugar a Dios, es el ser que estuvo a mi lado en todo momento me dio la fuerza necesaria cuando no tenía ninguna, fue quien impulsó mi espíritu de competencia y me permitió seguir adelante pese a las adversidades que en mi camino se presentaron.

A mis padres, Jorge y Narcisa por su apoyo incondicional, su confianza inquebrantable, su motivación, sus valores y sabias enseñanzas que forjaron en mí el hombre que soy.

A mis hermanos, Mary, Jordan, Jerson que han sido un motivo para esforzarme y ser su ejemplo, en especial a Jerson por su sonrisa, su carisma y sus ocurrencias fueron la medicina a mis preocupaciones.

Jorge Guerrero

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos son a mis formadores, personas que aportaron con cada granito de sabiduría quienes se han esforzado para ayudarme a crecer y poder llegar hasta este punto en el que me encuentro.

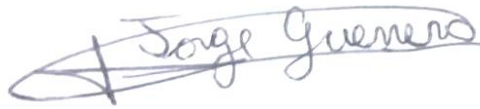
A mis amistades, que me brindaron su compañía en cada momento dentro y fuera de la vida universitaria.

A mi tutor, Ph. D Andrés Rigail por ayudarme en el desarrollo de este proyecto, por su amabilidad y confianza brindada.

A esas personas, que me levantaron los ánimos, me dieron un consejo, me extendieron su mano cuando lo necesite, me brindaron una sonrisa muchas gracias por todo los llevaré en mi corazón.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jorge Luis Guerrero Lara* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in blue ink that reads "Jorge Guerrero". The signature is written in a cursive style and is enclosed within a hand-drawn oval shape.

Jorge Luis Guerrero Lara

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**NADIA MAGALY
FLORES
MANRIQUE**

A handwritten signature in black ink, reading "Andrés Rigail", with a large flourish at the end.

MSc. Nadia Magaly Flores Manrique

PROFESOR DE LA MATERIA

Ph.D Andrés Francisco Rigail Cedeño

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Normalmente, la aplicación del proceso de purga consiste en retirar la boquilla de inyección de la placa fija, luego programar la maquinaria en el proceso de auto purga, ya que el material a utilizar es una purga química, que se descompone a ciertas temperaturas, generando gases como al igual que el CO₂, este gas expande la resina del interior de la barrica, arrastrando puntos negros y material que se haya utilizado previamente. Esta expansión generada hace que el material se derrame fuera de la boquilla, lo que aumenta los tiempos de carga.

Para este caso en particular, se propone realizar el proceso de purga por inyección continua, es decir, la boquilla junto a la placa fija, evitando así el derrame de material y reduciendo los tiempos de ejecución.

Además, mediante la caracterización térmica, utilizando el calorímetro diferencial de barrido, se pueden determinar los puntos de fusión y cristalización del polipropileno y el material de purga utilizado.

Por otro lado, el diseño comparativo consta de los perfiles de temperatura utilizados en la máquina de inyección, los tiempos de proceso para cada una de las pruebas, la elaboración de la tabla ANOVA de un factor, y el valor p calculado que indica que tiene un 95% confianza.

Finalmente, con un valor de \$228.30 corresponde al alquiler de maquinaria y la diferencia de costos refleja un ahorro del 30%.

Palabras clave: Inyección continua, Proceso de purga, Material de purga, Polipropileno.

ABSTRACT

Normally, the application of the purging process consists of removing the injection nozzle from the fixed plate, then programming the machinery in the self-purging process, as the material to be used is a chemical purge, which decomposes at certain temperatures, generating gases such as CO₂, this gas expands the resin inside the barrel, dragging black spots and material that has been previously used. This generated expansion causes the material to spill out of the nozzle thus increasing loading times.

For this particular case, it is proposed to carry out the purging process by continuous injection, that is, the nozzle next to the fixed plate, in this way avoiding material spillage and reducing implementation times.

In addition, using thermal characterization, using the differential scanning calorimeter, the melting and crystallization points of the polypropylene and the purge material used can be determined.

On the other hand, the comparative design consists of the temperature profiles used in the injection machine, the process times for each of the tests, the preparation of the one-factor ANOVA table, and the calculated p-value that indicates that has 95% confidence.

Finally, with a value of \$228.30, it corresponds to the rental of machinery and the difference in costs reflects a saving of 30%.

Keywords: Continuous injection, purging process, purge material, polypropylene.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Plásticos	4
1.4.2 Polipropileno	5
1.4.3 Definición del proceso por inyección	7
1.4.4 Caracterización.....	8
1.4.5 Purga de compuestos	12
1.4.6 Análisis económico.....	14
CAPÍTULO 2	15
2. Metodología	15

2.1	Materiales y Equipos	16
2.1.1	Materiales experimentales.....	16
2.1.2	Material de validación.....	17
2.2	Equipos utilizados	19
2.2.1	Máquina de inyección.....	19
2.2.2	Equipo calorimetría diferencial de barrido (DSC)	21
2.2.3	Equipo Reómetro de torque	22
2.3	Técnicas y procedimientos operativos.....	26
2.3.1	Proceso de purga.....	26
2.3.2	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	27
2.3.3	Determinación de la viscosidad con reómetro de torque	27
2.3.4	Diseño experimental comparativo del proceso de purga	28
2.3.5	Determinación de consumo durante la purga	31
2.4	Determinación del análisis económico	31
CAPÍTULO 3		33
3.	Resultados y Análisis	33
3.1	Caracterización de los materiales	33
3.1.1	Caracterización térmica (DSC)	33
3.1.2	Caracterización reológica (Brabender).....	36
3.2	Diseño de experimentos	41
3.3	Resultados de consumos durante la purga	45
3.3.1	Consumo de material de experimental.....	45
3.3.2	Consumo de material de validación	46
3.4	Resultados del análisis económico	47
CAPÍTULO 4		52
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	52

Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54
APÉNDICE.....	56

ABREVIATURAS

PICA	Plásticos Industriales CA
PP	Polipropileno
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
PE	Polietileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
PET	Tereftalato de Polietileno
RPM	Revoluciones Por Minuto
MCE	Media Cuadrática del Error
ANOVA	Análisis de la Varianza
MDS	Mínima Diferencia Significativa
DSC	Calorimetría de Barrido Diferencial

SIMBOLOGÍA

CO ₂	Dióxido de carbono
KJ	Kilojulios
J	Julios
m ²	Metros cuadrados
°C	Celsius
Cp	Capacidad calorífica
mm	Milímetros
N	Newtons
g	Gramos
s	Segundo
ton	Tonelada
KW	Kilovatio
HP	Caballos de fuerza
m	Metro
Kg	Kilogramo
mW	Milivatio
oz	Onza
cc	Centímetro cúbico
cm	Centímetro
μW	Microvatio
A	Amperio
mL	Mililitro
min	Minuto
%	Porcentaje
\$	Dólares

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura del polipropileno (Wikimedia, 2021)	5
Figura 2.1 Esquema del proceso metodológico aplicado	15
Figura 2.2 Máquina de Inyección, marca Lien Yu, modelo D 75	21
Figura 2.3 Analizador térmico DSC, marca TA Instruments, modelo Q2000	22
Figura 2.4 Reómetro de torque, marca Brabender, modelo Plastograph® EC	25
Figura 2.5 Esquema de máquina inyectora	28
Figura 2.6 RStudio, número de ensayos recomendados	29
Apéndice Figura 1. Secuencia de proceso de purga por sistema automático	56
Apéndice Figura 2. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 220°C	56
Apéndice Figura 3. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 240°C	57
Apéndice Figura 4. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 260°C	57

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1 Brabender Mixer versión 4.9.8.....	23
Gráfica 3.1 Análisis térmico DSC de polipropileno pigmentado	34
Gráfica 3.2 Análisis térmico DSC de material de purga	34
Gráfica 3.3 Análisis térmico DSC de polipropileno natural	35
Gráfica 3.4 Viscosidades & Velocidades de corte del Polipropileno	36
Gráfica 3.5 Viscosidades & Velocidades de corte del UltraPlast PO-E	37
Gráfica 3.6 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 220°C	38
Gráfica 3.7 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 240°C	39
Gráfica 3.8 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 260°C	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Grado de cristalinidad y temperaturas de fusión de algunos termoplásticos semicristalinos (Lerma, 2021).....	4
Tabla 1.2 Propiedades Mecánicas (Quimica.es, 2021).....	6
Tabla 1.3 Propiedades Térmicas (Quimica.es, 2021).....	6
Tabla 2.1 Propiedades de control (Braskem S. t., 2019).....	16
Tabla 2.2 Propiedades típicas (Braskem S. t., 2019).....	17
Tabla 2.3 Propiedades Físicas y Químicas (Kalay, 2016).....	18
Tabla 2.4 Estabilidad y Reactividad (Kalay, 2016).....	19
Tabla 2.5 Datos técnicos del Plastograph® EC((Brabender GmbH, 2008)).....	23
Tabla 2.6 Niveles y observaciones para un solo Factor (Zurita, 2010).....	29
Tabla 2.7 Análisis de Varianzas para un solo Factor (Zurita, Diseño robusto de un producto, 2010).....	30
Tabla 3.1 Diferencia porcentual de las viscosidades.....	41
Tabla 3.2 Ensayos del proceso por purga automática.....	41
Tabla 3.3 Perfil de Temperatura en la elaboración de ensayos.....	42
Tabla 3.4 Ensayos del proceso por inyección continua.....	42
Tabla 3.5 Análisis de Varianza de los ensayos realizados.....	43
Tabla 3.6 Determinación del valor-p (Zurita, Tabla D, Distribución F de Fisher, 2010).....	43
Tabla 3.7 Obtención y deducción de los tiempos totales.....	44
Tabla 3.8 Cantidad de materia necesaria en el barril.....	45
Tabla 3.9 Obtención y deducción de material de purga.....	46
Tabla 3.10 Obtención y deducción de material de transición.....	46
Tabla 3.11 Costo de implementación de maquinaria.....	47
Tabla 3.12 Costo de proceso empresarial Sin Mejora.....	48
Tabla 3.13 Costo de proceso experimental Sin Mejora.....	49
Tabla 3.14 Costo de proceso experimental Con Mejora.....	50
Tabla 3.15 Costo proceso empresarial Con Mejora.....	51
Tabla 3.16 Cantidad de beneficio porcentual.....	51

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En las industrias de plásticos la aplicación de una purga es una parte esencial de la limpieza, ya que es necesaria para una limpieza preventiva o mantenimiento, para realizar un cambio de material o color entre otras aplicaciones. En particular la industria de inyección de plásticos siempre se encuentra en la búsqueda de nuevos procesos o productos que permitan la eliminación de las resinas, carbón y colores que se producen dentro de las maquinas, previo a empezar un lote o producir determinado producto. La aplicación de este proceso garantiza que la producción no presentará contaminación en sus productos. (Ortega, 2021)

Actualmente se utiliza el aditivo UltraPlast PO-E como material de purga en el proceso de inyección de plásticos, sobre todo en los polímeros como polietileno y polipropileno su aplicación resulta muy costoso en la industria de inyección de plásticos. Presenta un tiempo muy prolongado para completar su limpieza, de esta manera genera mayor tiempo muerto.

1.2 Justificación del problema

En el presente proyecto la empresa escogida es Plásticos Industriales C.A, también conocida como PICA es una fábrica que se dedica a la producción artículos para el hogar, cuyas ventas se realizan en el mercado nacional e internacional, en esta planta industrial se realizan varios procesos entre ellos el moldeo de plásticos por inyección .

Actualmente existe inconformidad especialmente cuando se realiza cambios de color en la producción de productos mediante el moldeo por inyección, debido a que la implementación del proceso que se realiza no es satisfactoria. Los costos que genera su aplicación están vinculados en varias actividades que se realizan en este proceso, la empresa desea alcanzar resultados favorables tales como:

1. Reducción del costo en la cantidad de materia prima que se desperdicia.
2. Incrementar los niveles de producción.
3. Reducir el costo de mano de obra durante el tiempo de su aplicación.
4. Reducir el costo material de purga utilizado.

Normalmente la aplicación del proceso de purga consiste en retirar la boquilla de inyección del plato fijo, luego programar la maquinaria en proceso de auto purga, como el material a utilizar es una purga química, que se descompone a ciertas temperaturas, generando gases como CO₂, este gas expande la resina dentro del barril arrastrando puntos negros y material que se haya utilizado previamente. Esa expansión generada hace que se derrame material por la boquilla de esta manera incrementando los tiempos de carga.

Para este caso particular se propone realizar el proceso de purga mediante inyección continua es decir la boquilla junto a la placa fija, de esta manera evitar el derrame de material y la reducción de los tiempos de implementación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Seleccionar la condición de temperatura óptima durante el proceso de purga basado en un diseño experimental tipo comparativo con un nivel de confianza significativo para la reducción de tiempo total del proceso y sus materiales de implementación.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar los valores de los parámetros que presenta el material de purga y materia prima mediante búsqueda bibliográfica.

Diseñar experimentos que permitan el estudio de las características, físicas, reológicas del material de purga y materia prima.

Analizar los resultados obtenidos para la selección de la condición de temperatura óptima para la implementación de un proceso más adecuado de acuerdo a su materia prima, dando lugar al incremento del beneficio económico.

1.4 Marco teórico

La fabricación de piezas en plástico se realiza de varias maneras, por ejemplo; extrusión, inyección, soplado, termoformado, rotomoldeo e inmersión, la fabricación de productos de alta estabilidad dimensional y buenas propiedades mecánicas. Se realizan a través del proceso por inyección, utilizando una máquina inyectora, moldes y materia prima.

En la actualidad el moldeo por inyección, es una técnica muy común en el procesamiento de plásticos, la cual consiste en la fundición de un polímero y hacer que este fluya bajo una cierta presión y temperatura de

operación en un molde, en el que la pieza se enfría permitiendo la solidificación de su estructura. (Prada Ospina & Acosta Prado, 2017)

1.4.1 Plásticos

Los plásticos son un conjunto de componentes orgánicos que están constituidos principalmente por carbono combinado con otros elementos como el nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Durante su elaboración debe ser suave para que pueda ser moldeado en diferentes formas requeridas a través de procesos que usan calor y presión, pero en su estado final es sólido y duro (Cornish, 1997).

Tabla 1.1 Grado de cristalinidad y temperaturas de fusión de algunos termoplásticos semicristalinos (Lerma, 2021)

Material	% Cristalino	Intervalo de fusión (°C)
PELD	40-55	105-115
PEHD	60-80	125-140
PP	60-70	158-168
PIB	50	120-130
PA's	<60	
PA6	-	215-225
PA66	-	250-265
PA610	-	210-225
PA11	-	180-190
PA12	-	175-185
PA46	-	295
POM (h)	75	175
POM ©	70	165-168
PET	30-40	255-258
PBT	40-50	220-225
PPS	40	280-288
PEEK	40	334
PTFE	53-70	327

1.4.2 Polipropileno

1.4.2.1 ¿Qué es el polipropileno?

El polipropileno (PP) pertenece al grupo de las poliolefinas es un termoplástico que se constituye por la polimerización del propileno, la formación de este se da lugar en la refinación del petróleo siendo un subproducto gaseoso. Mediante un catalizador con ciertas condiciones de presión y temperatura que permitan su elaboración. (PETROQUIM, 2021)

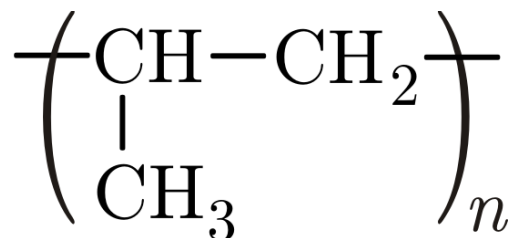


Figura 1.1 Estructura del polipropileno (Wikimedia, 2021)

1.4.2.2 Tipos de polímeros

PP homopolímero

Se denomina a la polimerización de polipropileno puro, se distinguen en los siguientes:

- PP atáctico
- PP isotáctico
- PP sindiotáctico

PP copolímero

Se denomina a la polimerización que contiene entre un 5 y un 30 % de etileno, este posee mayor resistencia al impacto entre los cuales tenemos:

- Copolímero estadístico

➤ Copolímero en bloques

1.4.2.3 Propiedades

Existen propiedades semejantes entre el PP isotáctico comercial y el polietileno, con las siguientes excepciones:

- ❖ Menor densidad el PP tiene un peso específico entre 0,9 g/cm³ y 0,91 g/cm³.
- ❖ Temperatura de reblandecimiento más alta.
- ❖ Gran resistencia al stress cracking
- ❖ Mayor tendencia a la oxidación

Tabla 1.2 Propiedades Mecánicas (Quimica.es, 2021)

	PP homopolímero	PP copolímero
Módulo elástico en tracción (GPa)	1,1 a 1,6	0,7 a 1,4
Alargamiento de rotura en tracción (%)	100 a 600	450 a 900
Carga de rotura en tracción (MPa)	31 a 42	28 a 38
Módulo de reflexión (GPa)	1,19 a 1,75	0,42 a 1,40
Resistencia al impacto Charpy (kJ/m ²)	4 a 20	9 a 40
Dureza Shore D	72 a 74	67 a 73

Tabla 1.3 Propiedades Térmicas (Quimica.es, 2021)

	PP homopolímero	PP copolímero
Temperatura de fusión (°C)	160 a 170	130 a 168
Temperatura máxima de uso continuo (°C)	100	100
Temperatura de transición vítrea (°C)	-10	-20

Propiedades ópticas

El PP homopolímero tiene un índice de refracción cerca de 1.5, esto indica que su apariencia es transparente en la fabricación de productos desechables.

1.4.2.4 Aplicaciones

El consumo de polipropileno continúa creciendo más que otros termoplásticos (PE, PS, PVC, PET). Durante el año 2005 en la Unión Europea, la producción y consumo fueron de 9 y 8 millones de toneladas aproximadamente.

Entre los procesos de transformación que se pueden realizar al PP están los siguientes:

- Moldeo por inyección
- Moldeo por soplado
- Termoformado
- Producción de fibras
- Extrusión
- Producción de película

Existe una pequeña parte en que el PP es usado en el área médica y farmacia, ya que el contacto con alimentos puede ser aceptable.

1.4.3 Definición del proceso por inyección

Es un proceso semicontinuo que consiste en la inyección de un determinado polímero, metal o material en su estado de fusión a una presión y temperatura de operación dentro de un molde. Este material al enfriarse se solidifica obteniendo una pieza de cierta forma y dimensión deseada de acuerdo a su molde.

La fabricación de piezas plásticas mediante el moldeo por inyección, hoy por hoy se estima que corresponde al 33% de las

piezas plásticas, siendo este un proceso con varias ventajas en relación a otros procesos con: (Prada Ospina & Acosta Prado, 2017)

- Altos volúmenes de producción
- Costos bajos de operación
- Automatización del proceso
- Las piezas no requieren acabados o muy pocos
- Elaboración de piezas de geometría compleja, no sería posible por otros métodos
- Obtención de diferentes colores
- Buena tolerancia dimensional

Unidad de inyección

La unidad de inyección se origina en la máquina de extrusión, esta tiene en cuenta varios sensores para tener una temperatura programada constante a lo largo del barril, cuya principal función es fundir, mezclar e inyectar el polímero. En el proceso de inyección de polímeros se debe considerar tres condiciones termodinámicas: (Quimica.es, 2021)

- Temperatura de procesamiento del polímero.
- Capacidad calorífica del polímero C_p [cal/g °C].
- Calor latente de fusión, además la semicristalización del polímero.

1.4.4 Caracterización

Calorimetría de barrido diferencial (DSC)

Es una de las técnicas de laboratorio más empleada para el análisis térmico, se la utiliza para sistemas moleculares en la que sus estructuras se encuentran estabilizadas por bastantes fuerzas débiles y por ello son capaces de experimentar cambios de fase si se varía la temperatura. Con esta técnica se puede medir, bajo un programa de temperatura controlado, la diferencia en la cantidad de calor entre una sustancia y el patrón de referencia en función de

la temperatura de dicha sustancia (Wilches Zúñiga, Ruiz Monsalve, & Hernández Valdivieso, 2007).

Dado que cuando sucede un cambio químico o físico en la muestra que produce una absorción o emisión de calor (también denominado transición térmica), se añade energía térmica ya sea a la sustancia o al patrón de referencia con el objetivo de que ambas se encuentren en la misma temperatura. Puesto que la energía que se transfiere es igual en cantidad a la energía térmica absorbida o emitida, un balance de energía en el sistema permitirá conocer una medición de parámetros termodinámicos como la capacidad calorífica, la entropía, la entalpía y la energía libre de Gibbs (Wilches Zúñiga, Ruiz Monsalve, & Hernández Valdivieso, 2007).

Propiedades reológicas

El comportamiento de un polímero depende de la temperatura. A baja temperatura un polímero amorfo actúa como un vidrio y si la deformación es pequeña cumple con la ley de Hooke. A altas temperaturas actúa como un líquido viscoso y su comportamiento es líquido elástico o viscoso. En cambio, a una temperatura intermedia (que sea mayor que la de la transición vítrea) se comporta como un sólido gomoso-elástico y tiene propiedades mecánicas intermedias respectivas a los rangos de la temperatura elevada y baja (viscoso y elástico), lo cual se denomina viscoelasticidad.

Los comportamientos mencionados anteriormente se reflejan cuando se realizan deformaciones al polímero. En el comportamiento elástico la deformación sucede totalmente cuando se aplica el esfuerzo y cuando este termina el polímero recupera su forma original. En cambio, para el comportamiento viscoso, la deformación no sucede instantáneamente cuando se administra el esfuerzo, sino que depende del tiempo y cuando el esfuerzo se

elimina el polímero no necesariamente vuelve a recuperar su forma original. Por otra parte, cuando el comportamiento es viscoelástico y se suministra un esfuerzo, sucede una deformación instantánea y después ocurre una deformación viscosa la cual se recupera con el tiempo (Callister, 2007).

Reómetro de torque (Brabender)

El reómetro de torque es un instrumento de gran utilidad que permite la caracterización y análisis de materiales termoplásticos.

La función básica de un reómetro de torque consiste en ser un mezclador que aporta información muy valiosa con respecto a la capacidad de procesar los materiales. (Alva, 2014)

Interpretación de datos

La relación de este proceso hace uso de la ecuación del reómetro de torque de Haake: (Halimatuddahlina, 2005)

$$M = C_o S^b \quad (1)$$

Donde:

- ❖ C_o : Constante geométrica de maquinaria
- ❖ S : Velocidad angular del rotor
- ❖ b : Constante del polímero fundido
- ❖ M : Es el torque

La ley de la potencia relaciona el torque, velocidad de rotor, esto asemeja el esfuerzo cortante y la velocidad de corte: (Halimatuddahlina, 2005)

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Donde:

- ❖ τ : Esfuerzo cortante
- ❖ $\dot{\gamma}$: Velocidad de corte
- ❖ n : Índice de la ley de potencia
- ❖ K : Constante de maquinaria

La relación que permite la constante geométrica de la maquinaria con la constante K , y tomando la equivalencia de la constante b con la constante n es la siguiente: (Halimatuddahlia, 2005)

$$\tau = K_1 M \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = K_2 S \quad S = \left(\frac{2\pi}{60}\right) \times R \quad (4)$$

Donde:

- ❖ M : Es el torque
- ❖ R : Velocidad del rotor
- ❖ S : Velocidad angular del rotor
- ❖ K_1 y K_2 : Son constantes que dependen de las dimensiones del viscosímetro
- ❖ R_i : Radio interno [cm]
- ❖ R_e : Radio externo [cm]
- ❖ R_m : Radio promedio [cm]
- ❖ h : Longitud de cilindro [cm]

$$K_1 = \frac{1}{2\pi R_m^2 h} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{2}{n R_m^{\frac{2}{n}} \left(R_i^{\frac{-2}{n}} - R_e^{\frac{-2}{n}} \right)} \quad (6)$$

1.4.5 Purga de compuestos

En la limpieza de tornillos y cilindros de una extrusora o máquina de inyección, se pueden realizar de muchas maneras, ya sea, antes, durante o después de una jornada de producción. Generalmente la maquinaria se vacía por completo, luego se procede a utilizar el material destinado para purgar de manera que permita retirar los residuos que se encuentren dentro de la extrusora. También, existe la opción de abrir la extrusora y realizar limpieza de forma manual cada pieza de la maquinaria.

Este proceso opcional presenta la mayor desventaja posible, dado que requiere de mucho tiempo para llevar a cabo una limpieza de residuos, el tiempo empleado en esta operación es el factor clave para aumentar o disminuir la producción un producto cualquiera. La razón por la que se utiliza material de purga para estos procesos, es que permite reanudar el proceso de producción en menor tiempo con respecto a la limpieza manual.

El método para una correcta selección de una determinada purga tiene relación directa con el material que se desea desplazar y la temperatura de procesos. Las resinas más comunes recomendadas en ingeniería, son normalmente el grado U a un rango de temperatura de 180°C y 340°C. Si existe mucha contaminación de carbón o de color, se recomienda usar el grado EX para la realización de una limpieza más efectiva. (García, 2021)

1.4.5.1 Tipos de purga

Durante varios años las primeras maneras de limpieza se realizaba mediante los métodos tradicionales a través de resina molida, polipropileno virgen o de alguna otra resina que se producía con agua. (Tecnología del plástico, 2021) Hoy en la actualidad los compuestos de purga comercial se clasifican de dos maneras, las cuales son:

- Purgas Físicas
- Purgas Químicas

Purgas físicas

Son aquellos compuestos que poseen alta viscosidad, la cual permite arrastrar los residuos o material contaminante dentro del cilindro. Su efectividad no es muy alta puesto que su volumen no cambia, esto es una desventaja dado a que la capacidad para arrastrar el material contaminante pegado a las paredes o puntos negros se encuentra muy limitado. (Sánchez, 2021)

Purgas Químicas

Son aquellos compuestos que reaccionan con los residuos de resina a determinadas temperaturas, generando gases de combustión como el CO₂. Este gas da lugar a la expansión de la resina dentro de la máquina de manera que facilita el arrastre de residuos de resina pegados en las paredes eliminando la contaminación y puntos negros. (Sánchez, 2021)

1.4.5.2 Aplicaciones de purga

La purga se puede aplicar para diferentes fines en la industria del plástico entre las cuales tenemos:

- Cambios de color y material
- Contaminación de puntos negros y geles
- Piezas transparentes
- Desperdicio debido al arranque
- Limpieza de coladas y dados
- Extracción de tornillos

1.4.6 Análisis económico

Este análisis permitirá medir la rentabilidad del proyecto, haciendo uso de una estimación considerando una relación de las capacidades de cierre y su gramaje de las maquinarias, debido a que en la parte experimental se trabajará con un maquina inyectora de 75 toneladas y por la parte empresarial una máquina de inyección de 600 toneladas de capacidad de cierre. La relación de estos valores dará un factor que nos permitirá realizar deducción estimada, que mediante comparaciones de sus resultados se medirá su rentabilidad.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

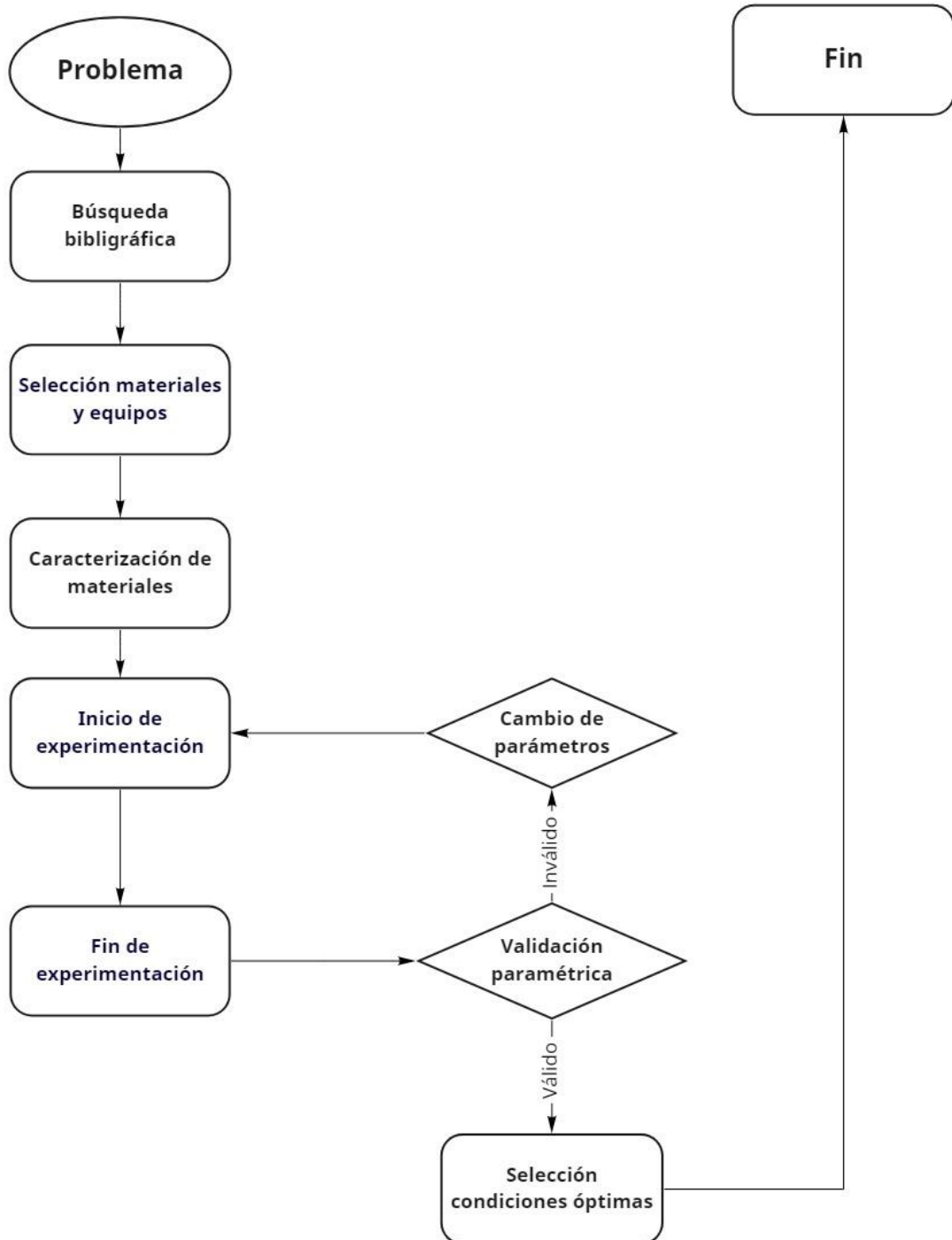


Figura 2.1 Esquema del proceso metodológico aplicado

2.1 Materiales y Equipos

A continuación, se describen: los materiales utilizados, equipos utilizados y sus características para el desarrollo de este proyecto.

2.1.1 Materiales experimentales

Los materiales que fueron utilizados en la parte experimental del presente estudio son los siguientes:

El material termoplástico utilizado es el polipropileno que se encuentra comercialmente como Polipropileno H 202HC de la empresa Braskem.

Este material es la resina base que sirve para el moldeo de plásticos por inyección, cuya proporción corresponde al 70 % y el 30% corresponde a la pigmentación concho de vino y beige.

Tabla 2.1 Propiedades de control (Braskem S. t., 2019)

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	23

Tabla 2.2 Propiedades típicas (Braskem S. t., 2019)

Característica	Método	Unidades	Valores
Densidad	D 792	g/cm ³	0.905
Módulo de Flexión, Secante al 1%	D 790	MPa	1950
Resistencia a la Tracción en el punto de Fluencia	D 638	MPa	41
Elongación en el punto de fluencia	D 638	%	7
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	109
Resistencia al impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	20
Temperatura de deflexión térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	127
Temperatura de deflexión térmica 1,820 MPa	D 648	°C	72
Temperatura de ablandamiento vicat a 10 N	D 1525	°C	159

2.1.2 Material de validación

El material que fue utilizado en la validación del presente estudio presenta las siguientes aplicaciones. Para la limpieza de tornillos, barril, boquillas, eliminación de depósitos de materiales residuales, manchas negras e incrustaciones de diferentes termoplásticos.

Se utilizan en inyección polimérica especialmente el polipropileno, Ultra Plast PO-E es el compuesto utilizado para este fin.

Tabla 2.3 Propiedades Físicas y Químicas (Kalay, 2016)

Apariencia	Sólido
Color	Característico
Olor	Inodoro
pH	No aplicable
Punto de fusión	70 °C (158 °F)
Congelación	No aplicable
Punto de ebullición	No aplicable
Punto de Inflamación	>450 °C (842 °F)
Tasa de evaporación	No aplicable
Fuego	>300 °C (572 °F)
Límite inferior / superior de inflamabilidad o explosividad	No aplicable
Presión de vapor	No disponible
Densidad de vapor	No disponible
Densidad	AT 25 °C: 0.70 g/cc
Solubilidad	Solubilidad en agua insignificante
Coeficiente de reparto n-octano / agua	No disponible
Temperatura de autoignición	No disponible
Temperatura de descomposición	85 °C
Viscosidad	No aplicable

Tabla 2.4 Estabilidad y Reactividad (Kalay, 2016)

Reactividad	El producto no tiene reactividad.
Estabilidad Química	En las condiciones recomendadas de almacenamiento y manipulación, el producto es estable.
Posibilidad de reacciones peligrosas	Ninguna, cuando el producto es almacenado, manipulado y procesado correctamente.
Condiciones que deben evitarse	Evitar temperaturas superiores a 80 °C. salvo durante el uso del producto, no supere la temperatura de 320 °C.
Materiales incompatibles	Ácidos y bases fuertes.
Productos de descomposición peligrosos	Puede liberar gases tóxicos e irritantes durante la combustión.

Además, se utilizó polipropileno natural, como material para favorecer la transición en las etapas de Pre-purga y Post-purga. Este material lo fabrica la empresa Braskem y se encuentra con el nombre de Polipropileno H 202HC como nombre comercial, cuyas características se encuentran en la (tabla 2.1) y (tabla 2.2).

2.2 Equipos utilizados

A continuación, se describen los equipos utilizados en el desarrollo de este proyecto: equipos para realizar ensayos y equipos de caracterización.

2.2.1 Máquina de inyección

Para poner a prueba los nuevos parámetros de purga en máquinas de inyección, se hizo uso de una máquina de inyección del modelo D 75. La máquina pertenece a la marca LIEN YU cuyas características se presentan a continuación. (Inyectoras Lien Yu, 2021)

Características técnicas de la máquina de inyección

Grupo de inyección.

- Diámetro del Tornillo [mm]: 36
- Relación Tornillo [L/D]: 17.8
- Volumen de Barrido [cc]: 162
- Máx. Disparo (PS) [g (oz)]: 146 (5.1)
- Máx. Presión de Inyección [bar]: 1404
- Máx. Rata de Inyección [g/sec]: 82
- Carrera del Tornillo [mm]: 160

Grupo de cierre.

- Máx. Fuerza de Cierre [ton]: 75
- Máx. Carrera de Apertura [mm]: 270
- Min. Altura del Molde [mm]: 100
- Máx. Altura de Molde [mm]: 360
- Máx. Luz Entre Placas [mm]: 630
- Distancia Entre Barras [mm]: 320 x 320
- Diámetro de las Barras [mm]: 55
- Máx. Fuerza del Expulsor [ton]: 2.74
- Máx. Carrera del Expulsor [mm]: 80

General.

- Bomba de Impulsión del Motor [kw(HP)]: 7.5 (10)
- Presión Hidráulica [bar]: 140
- Capacidad de Calentamiento [kw]: 5.0
- No. Zonas de Calentamiento [qty]: 3+N
- Dimensiones [m]: 3.8 x 1.05 x 1.5
- Peso [kgs]: 3500



Figura 2.2 Máquina de Inyección, marca Lien Yu, modelo D 75

2.2.2 Equipo calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Según (Boronat Vitoria, 2009), “esta técnica experimental es muy útil para evaluar los procesos térmicos que pueden experimentar los materiales cuando se someten a pruebas isotérmicas a una velocidad constante de calentamiento”, para ello fue necesario el uso del equipo TA Instruments Q2000 DSC.

Características técnicas del equipo DSC

- Rango de temperatura [° C]: Ambiente a 725
- Con accesorios de enfriamiento [° C]: -180 a 725
- Exactitud de temperatura [° C]: ± 0.1
- Reproducibilidad de temperatura [° C]: ± 0.01
- Reproducibilidad calorimétrica [%]: ± 0.05 basada en el estándar metálico Indio.
- Presión calorimétrica [%]: ± 0.05 basada en el estándar metálico Indio.
- Margen Dinámico de Medición [mW]: $> \pm 500$

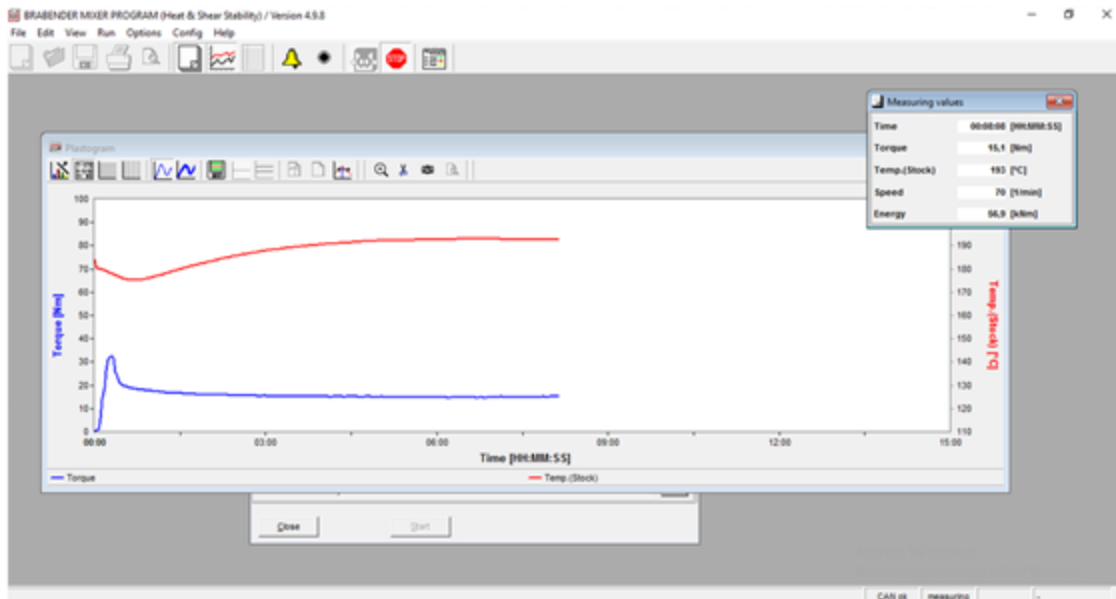
- Curvatura de línea base (-50°C a 300°C) [μ W]: 10
- Reproducibilidad de línea base [μ W]: ± 10
- Sensibilidad calorimétrica [μ W]: 0.2 (2:1 señal a ruido)
- Relación altura/ancho Indio [$mW/^\circ C$]: 60



Figura 2.3 Analizador térmico DSC, marca TA Instruments, modelo Q2000

2.2.3 Equipo Reómetro de torque

Para este estudio fue necesario el uso del equipo Reómetro de torque (Brabender Plastograph® EC), el cual permite la obtención del comportamiento de la muestra presentando la gráfica de Torque & Tiempo y Temperatura & Tiempo, estas graficas son visualizadas atreves de un programa llamado Brabender Mixer versión 4.9.8 por ejemplo Gráfica 2.1.



Gráfica 2.1 Brabender Mixer versión 4.9.8

Características técnicas del equipo

Tabla 2.5 Datos técnicos del Plastograph® EC (Brabender GmbH, 2008)

Accionamiento	Motor:	Motor inversor de 3.8 kW
	Rango de velocidad:	0.2 - 150 min ⁻¹
	Desviación de velocidad:	0.01% por regulación digital
Unidad dinamométrica	Campo de medición par de giro:	0 – 200 Nm Reconocimiento automático del par de giro máximo del cabezal medidor seleccionado Desconexión automática al exceder el par de giro máximo
Unidad reguladora de temperatura e indicadora	Regulador de temperatura de 3 zonas:	Entradas/Salidas: <ul style="list-style-type: none"> • 4 * Temperatura de la masa • 3 * Temperatura de control • 3 * Calefacción • 1 * Entrada central de aire de refrigeración • 1 * Salida refrigeración zona 2 (caja de amasado)

		<ul style="list-style-type: none"> • 1 * Termostato externo • CAN-OUT <p>Consola de mando CAN-Bus para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de n° de rev. De consigna • Ajuste de la temp. De consigna • Indicación temp. De la masa • Indicación valor de medición • Indicación de diagrama
Suministro eléctrico	Conexión de la red:	3 * 200 V, 50/60 HZ *PE, 32 A
	Consumo eléctrico: <ul style="list-style-type: none"> • Acción sin cabezal medidor: • Acción con cabezal medidor: 	10 A Hasta 32 A, según el cabezal medidor
Dimensiones y peso	Dimensiones (ancho*alto*prof): <ul style="list-style-type: none"> • Sin bastidor: • Con bastidor: 	650 mm * 480 mm * 1150 mm 650 mm * 1300 mm * 1150 mm
	Peso: <ul style="list-style-type: none"> • Sin bastidor: • Con bastidor: 	154 kg 174 kg
	Almacenamiento: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura: • Humedad relativa: 	-20°C ... + 55°C 5 ... 95% Sin condensación Los valores máximos a.m. para la temperatura y la humedad relativa no deben mostrarse al mismo tiempo.

Condiciones ambientales	Funcionamiento: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura: • Humedad relativa: 	+5°C ... + 40°C 5 ... 85% Sin condensación Los valores máximos a.m. para la temperatura y la humedad relativa no deben mostrarse al mismo tiempo.
-------------------------	--	--



Figura 2.4 Reómetro de torque, marca Brabender, modelo Plastograph® EC

2.3 Técnicas y procedimientos operativos

A continuación, se describen los procedimientos que se llevaron a cabo para la elaboración este proyecto.

2.3.1 Proceso de purga

La purga en las máquinas de inyección de plásticos, está orientada a la eliminación de color, incrustaciones, manchas negras, oxidaciones entre otras. Para este proyecto en particular se utilizó el material purga UltraPlast PO-E, la cual trabaja con reacción química y no es abrasivo.

La purga está compuesta por diversos aditivos, que actúan como agente expansores y agentes aglomerantes dando lugar a una eficiencia adecuada. (Purga-UltraPlast (R) , 2021)

El proceso de purga inicia cuando se ingresa un material, que permita la disminución total o parcial de concentración de la resina o polímero que se estaba inyectando inicialmente y termina cuando se logra establecer un nuevo material, polímero, resina o color. En general la purga prepara el camino para una nueva producción o mantenimiento preventivo.

2.3.1.1 Tiempos durante una purga

Pre-purga: este es el primer paso inicia cuando se ingresa un material que permita la reducción de la concentración y termina cuando empieza actuar el material de purga.

Purga: pertenece al intervalo en que el material de purga se encuentra en acción.

Post-purga: inicia cuando finaliza la acción del material de purga y termina cuando se ha logrado completar el cambio de un nuevo material o color.

Tiempo total de purga: como su nombre lo indica es el tiempo total que dura el proceso es la suma de los tiempos de Pre-purga, Purga y Post-purga, siendo la Pre-purga la etapa de transición de material o color inicial y material de purga, por otro lado, la Post-

purga es la etapa de transición de material de purga y un nuevo material o color para iniciar un nuevo proceso de inyección.

2.3.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Es una de las técnicas más empleadas en la identificación y caracterización de polímeros permite determinar el calor específico (C_p) de un material. (Boronat Vitoria, 2009)

Esta caracterización fue realizada por el analizador térmico TA Instruments Q2000, se realizó experimentación de doble corrida a partir de una estabilización de temperatura a 23°C y se eleva hasta 350°C a una tasa constante de 10°C/min, todo este proceso se realiza en una atmosfera inerte lo cual se hace uso de nitrógeno a un flujo de 50 mL/min.

2.3.3 Determinación de la viscosidad con reómetro de torque

Para el desarrollo de este análisis se hizo uso del equipo reómetro de torque Brabender Plastograph® EC, cuya experimentación fue realizada a tres temperaturas: 220°C, 240°C y 260°C. Por cada temperatura se realizó cinco ensayos con las siguientes revoluciones por minuto: 10 RPM, 30 RPM, 50 RPM, 70 RPM y 90RPM.

De acuerdo con las ecuaciones (5) y (6), se puede calcular el valor de la viscosidad η :

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K_1 M}{K_2 S} \quad (7)$$

Donde los parámetros de maquinaria son los siguientes:

- ❖ R_i : Radio interno = 1.64 cm
- ❖ R_e : Radio externo = 1.94 cm
- ❖ R_m : Radio promedio = 1.79 cm
- ❖ h : Longitud de cilindro = 4.78 cm

2.3.4 Diseño experimental comparativo del proceso de purga

El proceso de purga las mismas etapas pre-purga, purga, post-purga e independiente de su método de aplicación.

Proceso purga con auto purga

Este proceso purga consiste en la ejecución del proceso como tal, con la boquilla separada del molde, lo que permite la salida del material hacia afuera del cilindro. La dosificación de los materiales para el proceso de purga en este proyecto; material de purga y polipropileno natural, estará a cargo de criterio del personal de supervisión. La cantidad y materia de estos suministros pueden variar dependiendo su caso de aplicación, por ejemplo: cambio de materia de inyección, cambio de color, mantenimiento preventivo, etc. Para este proceso se realizaron ensayos a diferentes temperaturas, que permite determinación del número de ciclos y el tiempo total del proceso.

Proceso de purga con inyección continua

Este proceso de purga, como su nombre lo indica es un proceso continuo, el cual consiste en mantener unido el plato fijo a la boquilla, durante la ejecución del proceso de purga. Para aplicar este proceso se debe tener claro la dosificación de materiales y número de ciclos utilizados durante el proceso.

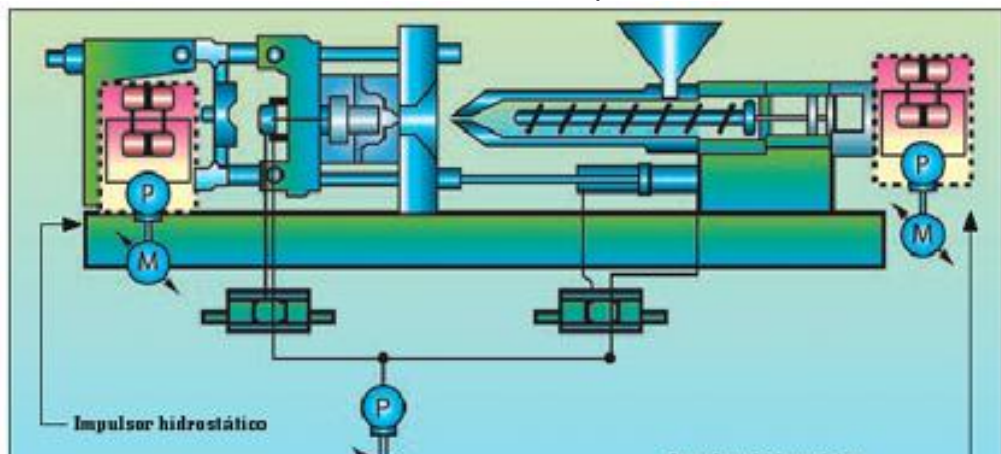


Figura 2.5 Esquema de máquina inyectora

La cantidad de ensayos requeridos fue realizada por el programa R Studio, los datos ingresados fueron; varianza muestral= 62.68, valor de significancia alfa=0.05, cantidad de niveles o temperaturas de estudio= 3 y delta de temperatura en minutos= 20.

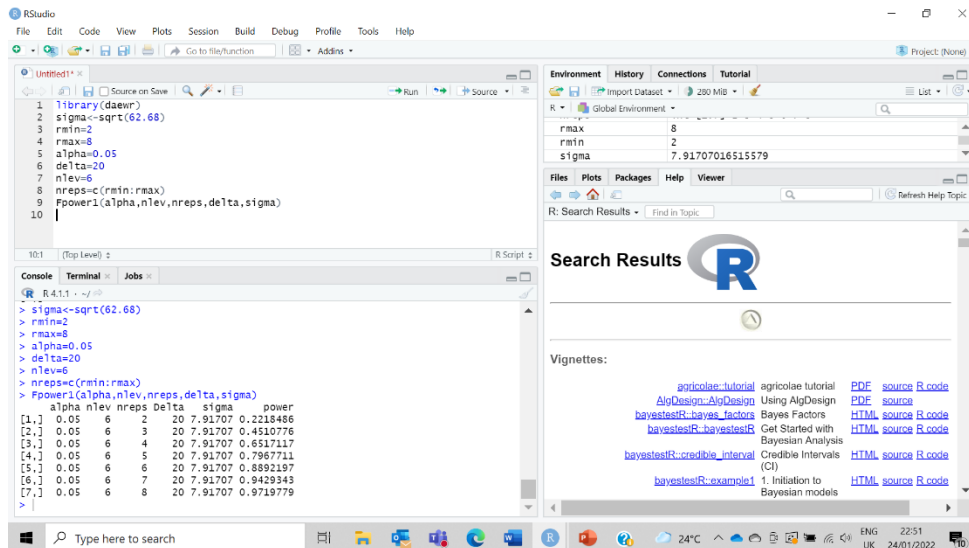


Figura 2.6 RStudio, número de ensayos recomendados

Esto nos indica que al realizar 5 ensayos por cada una de las 3 temperaturas se alcanza una potencia de prueba de 89%.

Tabla 2.6 Niveles y observaciones para un solo Factor (Zurita, 2010)

Niveles del Factor	Observaciones
1	$y_{11} \ y_{12} \ \dots \ y_{1n_1}$ $\bar{y}_{1.} = \frac{y_{1.}}{n_1}$
2	$y_{21} \ y_{22} \ \dots \ y_{2n_2}$ $\bar{y}_{2.} = \frac{y_{2.}}{n_2}$
...	...
A	$y_{a1} \ y_{a2} \ \dots \ y_{an_a}$ $\bar{y}_{a.} = \frac{y_{a.}}{n_a}$
	$\bar{y}_{.n}$

Tabla 2.7 Análisis de Varianzas para un solo Factor (Zurita, Diseño robusto de un producto, 2010)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma Cuadrática	Medias Cuadráticas	F
Tratamiento (Factor)	a-1	$\sum_i^a \sum_j^{n_i} (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	$MCTR = \frac{SCTR}{a-1}$	$F_o = \frac{MCTR}{MCE}$
Error	N-a	$\sum_i^a \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$MCE = \frac{SCE}{N-a}$	
Total	N-1	$\sum_i^a \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$		

El contraste de la hipótesis:

$$H_o: t_1 = t_2 = \dots = t_a = 0$$

vs

H_1 : Al menos uno de los factores t no es cero

Luego el siguiente paso es determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

$$t_{ij} = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_j}{\sqrt{MCE \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}}$$

$$H_o: u_i - u_j = 0$$

vs

$$H_1: u_i - u_j \neq 0$$

$$|t_{ij}| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}; N-a\right)}$$

La diferencia significativa debe declararse con n nivel de confianza (1- α)100% entre u_i y u_j sí y solo si:

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > MDS$$

La mínima diferencia significativa MDS se determina de la siguiente manera:

$$MDS = t_{\left(\frac{\alpha}{2}, N-a\right)} \sqrt{MCE \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} = t_{\left(\frac{\alpha}{2}, N-a\right)} \sqrt{\frac{2MCE}{n}}$$

2.3.5 Determinación de consumo durante la purga

En este apartado se describen los pasos utilizados para la determinación de los materiales utilizados.

2.3.5.1 Consumo de material experimental

La determinación del material polimérico pigmentado a utilizar, fue realizado mediante ensayos de cantidad de abastecimiento para llenar el cilindro de una maquina inyectora Lien-Yu D75, con un diámetro de tornillo de 36 mm y una máxima de 250 mm, de esta longitud se hizo uso de 110 mm.

2.3.5.2 Consumo de material de validación

En esta sección consta de 3 etapas, las cuales son las siguientes: pre-purga, purga y post-purga. En la etapa de pre-purga y post-purga se hace uso de polipropileno natural, de la misma manera que en el paso anterior se realiza ensayos de abastecimiento en la maquinaria.

La etapa de purga conste en realizar ensayos de limpieza del cilindro de la maquina inyectora previamente ensuciados con polímero pigmentado color concho de vino hasta lograr el cambio al color beige, esto permite la determinación de material de purga necesario para efectuar un proceso de purga eficiente y satisfactorio.

2.4 Determinación del análisis económico

En este apartado se describe el procedimiento económico que permitió el desarrollado de este proyecto, tomando en consideración la inversión en

personal de trabajo y maquinaria, beneficio económico. El tiempo total de horas de trabajo es de 20 horas.

Inversión personal de trabajo

Esta parte consiste en dos tipos de personal, los cuales son: personal operativo y personal de supervisión. Para la obtención del costo del personal utilizado se realizó su determinación en base a su sueldo y horas de trabajo mensual, obteniendo el costo para el personal operativo y personal de supervisión los valores de 3,13 \$/hora y 7,50 \$/hora.

Inversión maquinaria

En esta parte se toma la consideración del precio de obtención de la maquinaria, con este dato se puede determinar la depreciación de la maquinaria por el tiempo utilizado, considerando que la tasa de depreciación de una maquinaria es de 10 años. Para el sector industrial el valor del consumo energético es 0,0799 \$/kwh (Ekos, 2021). Además, al valor subtotal obtenido se agrega un valor de 20% por gastos indirectos.

Beneficio económico

Los pasos implementados para la determinación del beneficio económico fueron los siguientes:

1. Cálculo de costo del proceso de purga sin mejora en la parte empresarial.
2. Cálculo de costo del proceso de purga sin mejora por la parte experimental.
3. Cálculo de costo del proceso de purga con mejora por la parte experimental.
4. Cálculo de costo estimado del proceso de purga con mejora en la parte empresarial.
5. Determinación del porcentaje de ahorro, mediante la comparación de los procesos; sin mejora y con mejora.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

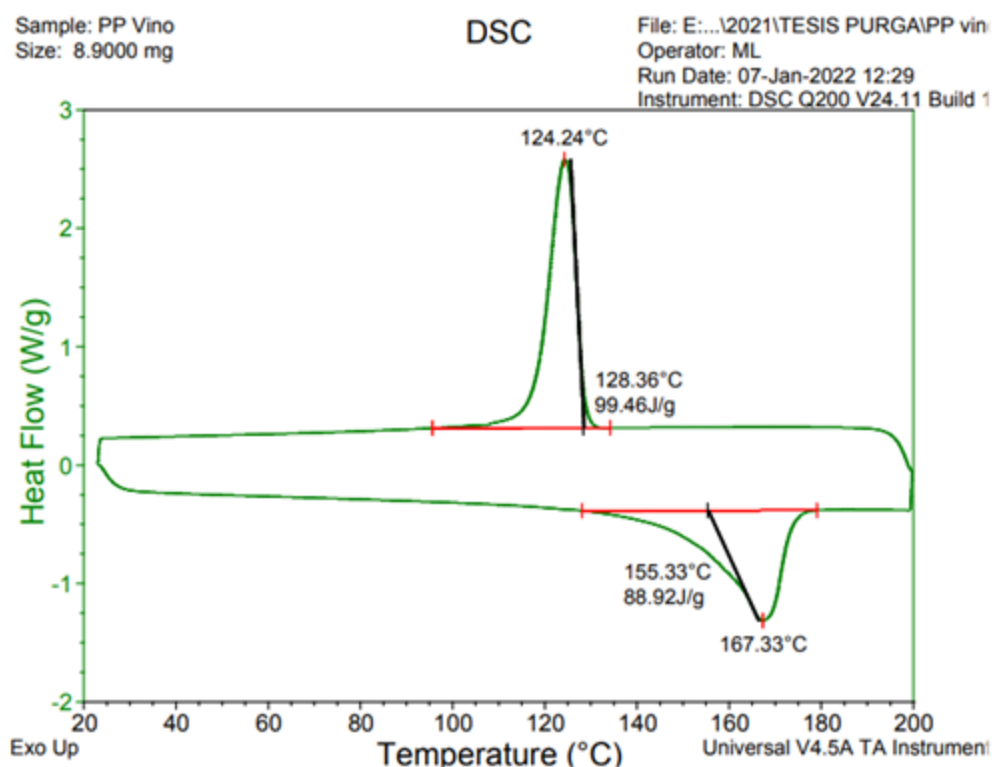
3.1 Caracterización de los materiales

En este apartado se dará a conocer los resultados de las caracterizaciones térmicas y reológicas.

3.1.1 Caracterización térmica (DSC)

Este análisis es muy importante porque permite la identificación de los componentes de los materiales poliméricos en una determinada muestra, mediante sus temperaturas de fusión y cristalización.

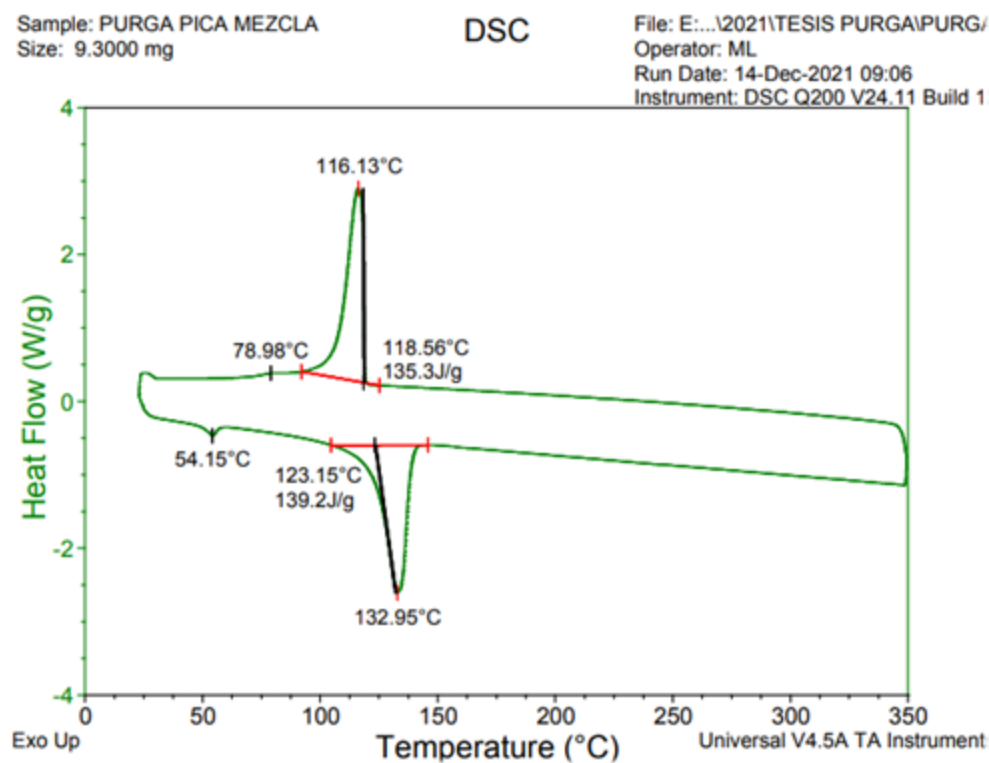
La gráfica DSC en el eje X se encuentra su variación de temperatura (°C) y en el eje Y se encuentra el flujo de calor (W/g).



Gráfica 3.1 Análisis térmico DSC de polipropileno pigmentado

El presente análisis térmico de calorimetría diferencial de barrido DSC, en la gráfica 3.1 está conformada por dos curvas una superior y otra inferior, la curva inferior da a conocer su punto de fusión a la temperatura de 167.33°C y una entalpia de fusión de 88.92 J/g, por otro lado, la curva superior da a conocer su punto de cristalización a la temperatura de 124.24°C y una entalpia de cristalización 99.46 J/g.

En base a sus picos endotérmicos y exotérmicos se confirman que la muestra pertenece a un polipropileno.

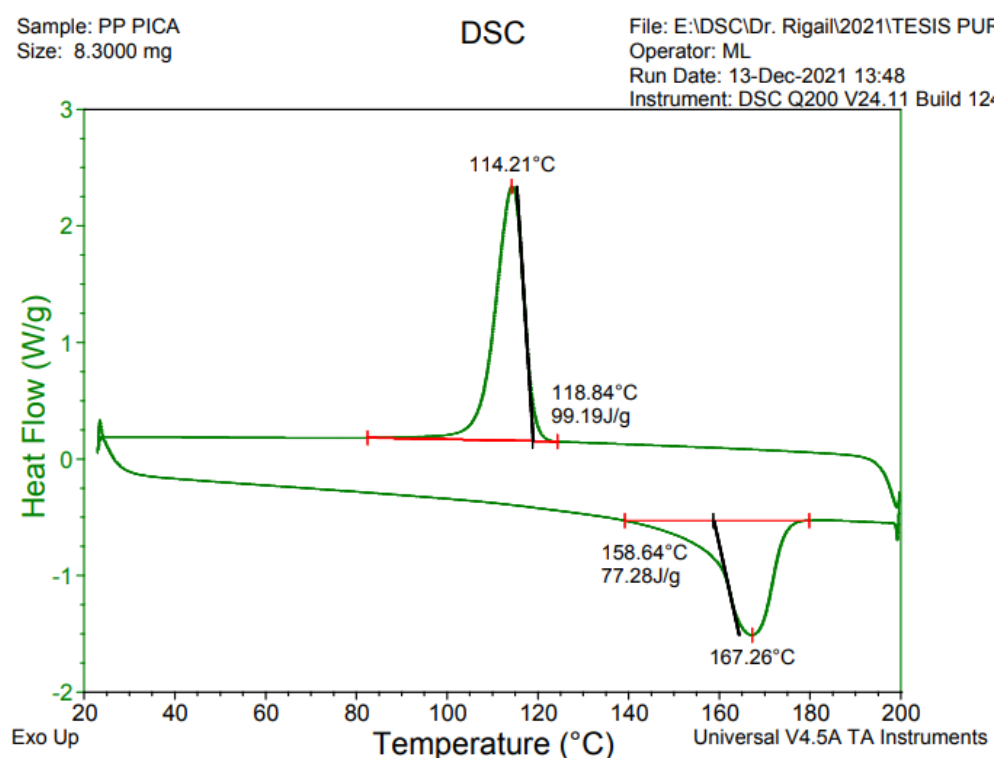


Gráfica 3.2 Análisis térmico DSC de material de purga

El presente análisis térmico de calorimetría diferencial de barrido DSC, en la gráfica 3.2 está conformada por dos curvas una superior y otra inferior, la curva inferior presenta dos picos el primero a una

temperatura de 54.15°C y el segundo su punto de fusión a la temperatura de 132.95°C y una entalpia de fusión de 139.2 J/g, por otro lado, la curva superior da a conocer su punto de cristalización a la temperatura de 116.13°C y una entalpia de cristalización 135.3 J/g y un segundo pico a la temperatura de 78.98°C.

De acuerdo a la gráfica presente en sus puntos de fusión y cristalización, se puede deducir que el polímero base en material de purga corresponde a polietileno y se desconoce el material aditivo solo se sabe que sus puntos de fusión y cristalización corresponde a los picos endotérmicos y exotérmicos menor pronunciados.



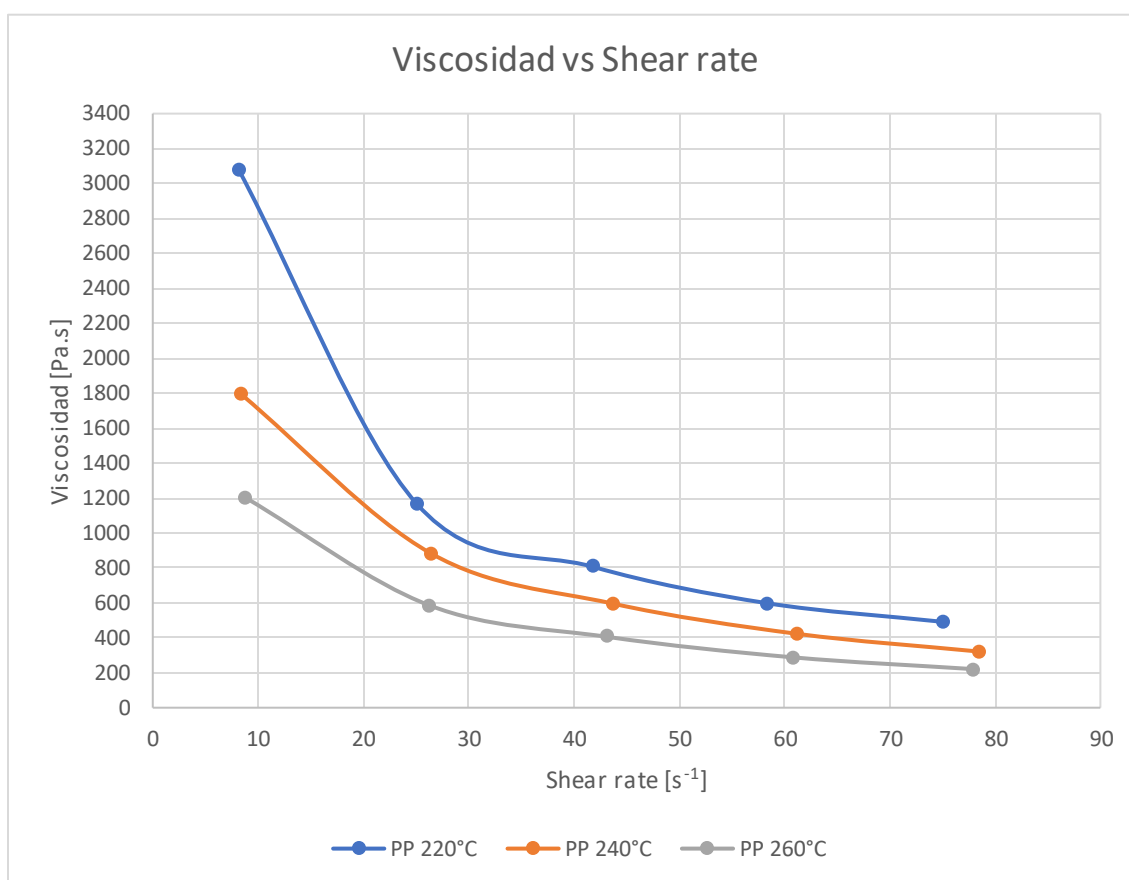
Gráfica 3.3 Análisis térmico DSC de polipropileno natural

El presente análisis térmico de calorimetría diferencial de barrido DSC, en la gráfica 3.3 está conformada por dos curvas una superior y otra inferior, la curva inferior da a conocer su punto de fusión a la temperatura de 167.26°C y una entalpia de fusión de 77.28 J/g, por otro lado, la curva superior da a conocer su punto de cristalización

a la temperatura de 114.21°C y una entalpia de cristalización 99.19 J/g.

3.1.2 Caracterización reológica (Brabender)

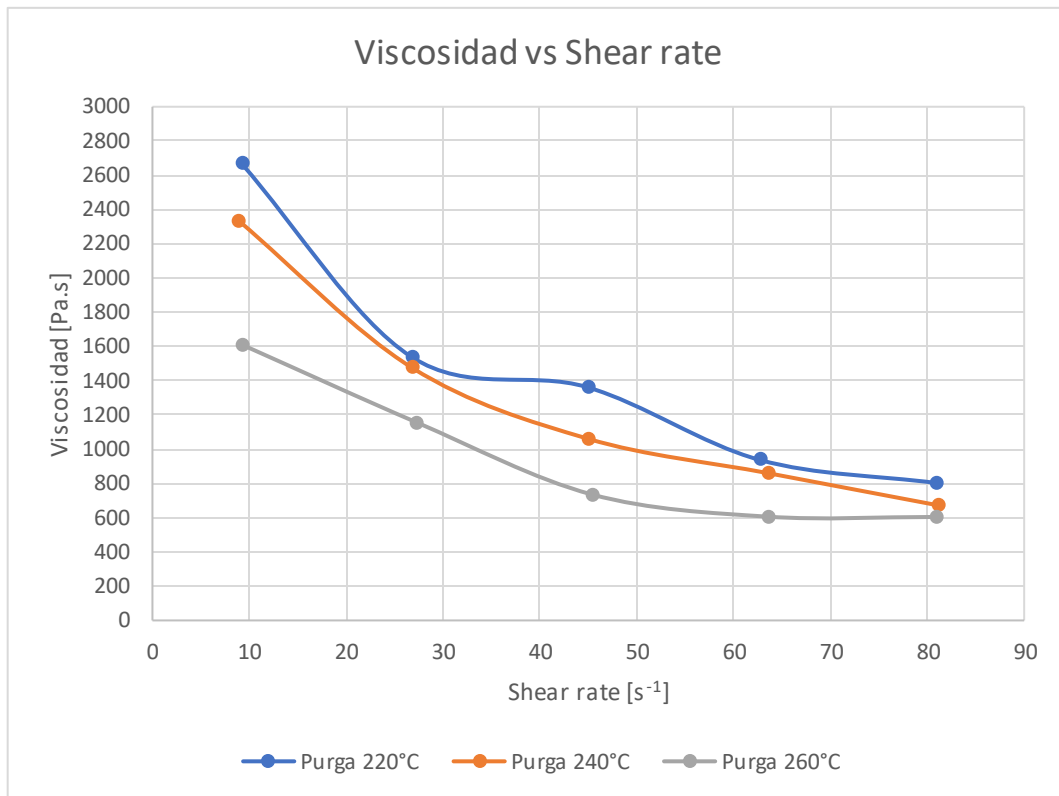
Esta caracterización es de gran importancia ya permite observar el comportamiento de la viscosidad a medida que se aumenta su velocidad de corte y temperatura.



Gráfica 3.4 Viscosidades & Velocidades de corte del Polipropileno

De acuerdo con la Gráfica 3.4 se puede visualizar que la viscosidad del polipropileno disminuye a medida que se incrementa la velocidad de corte, pero a medida que su temperatura aumenta la viscosidad también disminuye. Además, la curva a la temperatura de 220°C presenta una pendiente negativa más pronunciada que a las otras temperaturas, esto indica se encuentra

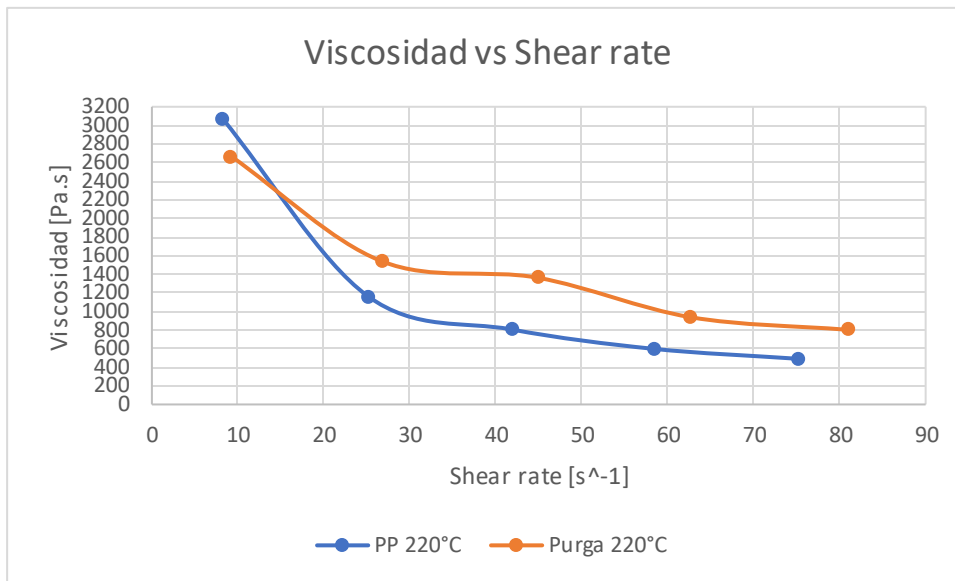
lejos de llegar a la estabilidad en comparación con la curva a 260°C.



Gráfica 3.5 Viscosidades & Velocidades de corte del UltraPlast PO-E

De acuerdo con la Gráfica 3.5 se puede observar que la viscosidad del material de purga UltraPlast PO-E disminuye a medida que aumenta su velocidad de corte, también a medida que aumenta su temperatura su viscosidad disminuye. Pero las pendientes de las curvas a 220°C y 240°C, son mucho más negativas en comparación con la curva a 260°C.

Esta última curva a medida que se incrementa la velocidad de corte tiene la tendencia a llegar a la estabilidad cerca del valor de $65s^{-1}$.

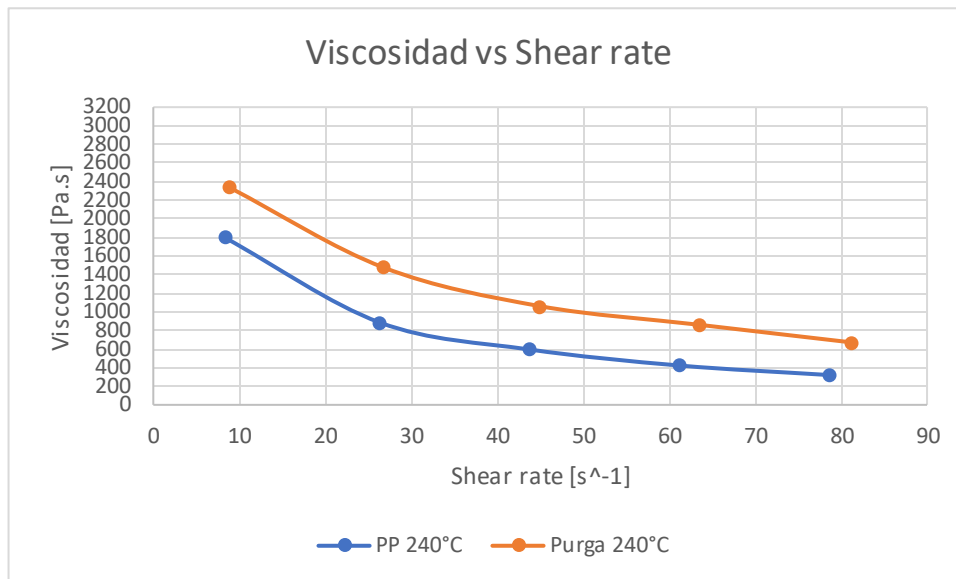


Gráfica 3.6 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 220°C

De acuerdo con la Gráfica 3.6 las curvas presentes son de polipropileno y material de purga a la temperatura de 220°C.

Al inicio la viscosidad del polipropileno es mayor que la del material de purga a una velocidad de corte de 10s⁻¹, a medida que se aumenta su velocidad de corte la viscosidad del material de purga aumenta en comparación con la curva del polipropileno.

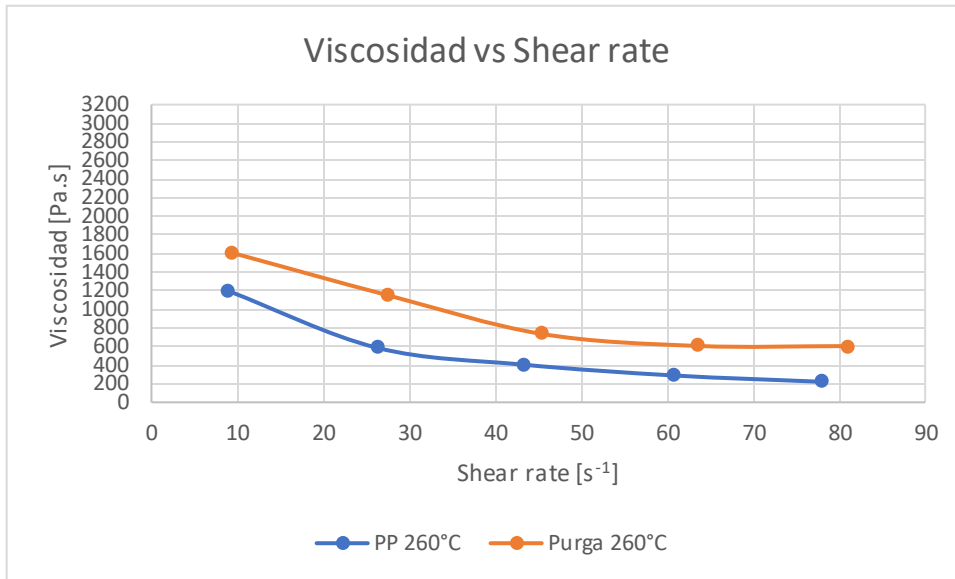
La diferencia de viscosidades tiende a reducir su valor conforme aumenta su velocidad de corte.



Gráfica 3.7 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 240°C

De acuerdo con la Gráfica 3.7 las curvas correspondientes son del polipropileno y material de purga a la temperatura de 240°C. Se puede observar que el comportamiento de la viscosidad inicial es muy parejo, pero a medida que se incrementa la velocidad de corte su diferencia tiende a reducir.

Además, las curvas presentan el inicio en cuanto a la reducción de la diferencia de sus viscosidades a la velocidad de corte de 40s⁻¹ y finalmente las curvas no llegan a la estabilidad.



Gráfica 3.8 Viscosidad & Velocidad de corte del Polipropileno y UltraPlast PO-E a 260°C

De acuerdo con la Gráfica 3.8 las curvas presentes corresponden al polipropileno y al material de purga a una temperatura de 260°C. Se puede observar que la viscosidad del material de purga es mayor que la del polipropileno, desde inicio hasta a la altura de una velocidad de corte de $30s^{-1}$ se visualiza un incremento en la diferencia de viscosidades.

La viscosidad de la curva del material de purga presenta una tendencia de estabilidad a una velocidad de corte de $65s^{-1}$, por otro lado, la curva del polipropileno no llega a un punto de estabilidad. Sino que disminuye su viscosidad, de esta manera se incrementa la diferencia de viscosidades.

Lo que favorece al material de purga arrastrar con mayor facilidad el material residual o polipropileno.

Tabla 3.1 Diferencia porcentual de las viscosidades

RPM	220°C	240°C	260°C
10	-15%	23%	25%
30	24%	40%	49%
50	41%	44%	45%
70	36%	51%	52%
90	39%	52%	63%

En la tabla 3.1 presenta la diferencia porcentual de la viscosidad de las curvas de polipropileno y material de purga UltraPlast PO-E por cada temperatura y revolución. A medida que la temperatura aumenta se incrementa la diferencial del porcentual de éstas.

La diferencia porcentual se incrementa al incrementar las revoluciones hasta la revolución de 50 rpm, luego existe una pequeña disminución en 70 rpm y después nuevamente se incrementa la diferencia porcentual en cada una de las temperaturas.

Las mayores diferencias porcentuales se encuentran en la temperatura de 260°C, esto indica que a esta existe una mayor fuerza de arrastre facilitando la salida del material residual o polipropileno.

3.2 Diseño de experimentos

En este apartado se presentan los resultados experimentales, por purga automática e inyección continua.

Por purga automática:

Tabla 3.2 Ensayos del proceso por purga automática

N° Ensayos	Tiempo	Unidad
1	34,38	Minutos
2	29,95	Minutos
3	19,97	Minutos
4	41,58	Minutos
5	28,89	Minutos
Media	30,95	Minutos
Media	0,52	Hora
Varianza Muestral	62,68	

En este proceso de purga automática se obtuvo como resultado promedio de los ensayos el valor de 0,52 horas y una varianza muestral de 62,68. Estos ensayos fueron realizados semejando al proceso de purga que se realiza normalmente en la industria plástica PICA, en escala nivel experimental. Con esta información se estableció una referencia y se la llamó proceso sin mejora.

A continuación, la varianza muestral calculada fue un dato clave que permitió la estimación de la cantidad de ensayos recomendables mediante el software estadístico RStudio. Cuyo resultado fue que con 5 ensayos por tratamiento nos da una potencia de prueba del 89%.

Por inyección continua:

Tabla 3.3 Perfil de Temperatura en la elaboración de ensayos

Contrapresión	Boquilla	Sección de dosificación	Sección de transición	Sección de alimentación
15 kg/cm ²	220°C	220°C	200°C	190°C
15 kg/cm ²	240°C	240°C	200°C	190°C
15 kg/cm ²	260°C	260°C	200°C	190°C

La tabla 3.3 nos indica los perfiles de temperatura utilizados durante los ensayos de purga por inyección continua.

Tabla 3.4 Ensayos del proceso por inyección continua

N° Ensayos	Tiempo total del proceso durante la purga		
	Temp 220°C	Temp 240°C	Temp 260°C
1	18,40	16,19	14,41
2	20,49	15,62	15,17
3	15,1	17,81	14,96
4	15,75	14,33	15,75
5	18,67	15,13	14,63
Media (min)	18,33	16,185	14,63
Media (hora)	0,31	0,27	0,25

De acuerdo a la tabla 3.4 se puede los valores que fueron sombreados, estos corresponden a valores aberrantes que no se tomaron en cuenta en los cálculos estadísticos durante el proceso de inyección continua.

Tabla 3.5 Análisis de Varianza de los ensayos realizados

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Medias Cuadráticas	Razón F
Factor	25,31	2	12,66	7,169
Error	15,88	9	1,76	
Total	41,20			

De acuerdo con la tabla 3.5 la cual presenta los resultados del análisis de varianza para un factor.

Tabla 3.6 Determinación del valor-p (Zurita, Tabla D, Distribución F de Fisher, 2010)

Valor p	Valor F
0,05	5,12
0,025	7,21
0,02549043	7,169

En la tabla 3.6 de acuerdo con el valor p obtenido, se concluye que se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa con un nivel de confianza del 95%.

Intervalo de confianza para las medias de los tratamientos:

$$\bar{y}_i - t_{\frac{\alpha}{2}; N-a} \sqrt{\frac{MCE}{n}} \leq \mu_i \leq \bar{y}_i + t_{\frac{\alpha}{2}; N-a} \sqrt{\frac{MCE}{n}}$$

Para $\frac{\alpha}{2} \rightarrow t_{0,025} = 2,262$ (Tabla B Distribución T de Student, 2010);

$$MCE = 1,76; n = 4; a = 3$$

$$\text{Para } u_1: 16,82 \leq \mu_1 \leq 19,83$$

$$\text{Para } u_2: 14,68 \leq \mu_2 \leq 17,69$$

$$\text{Para } u_3: 13,29 \leq \mu_3 \leq 16,30$$

$$\bar{y}_1 - \bar{y}_2 = 2,14$$

$$\bar{y}_1 - \bar{y}_3 = 3,53$$

$$\bar{y}_2 - \bar{y}_3 = 1,39$$

Determinación de la mínima diferencia significativa MDS al 95% de confianza

$$MDS = t_{\frac{\alpha}{2}, N-a} \sqrt{\frac{2MCE}{n}} = 2,125 \quad |\bar{y}_i - \bar{y}_j| > MDS$$

De acuerdo con los resultados obtenidos se selecciona el valor promedio de los tiempos totales para los ensayos realizados a la temperatura de 260°C el valor de 0,25 horas con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3.7 Obtención y deducción de los tiempos totales

Tiempo	Experimental	Empresa
Tiempo de carga sin mejora (min)	15,57	22
Tiempo de carga con mejora (min)	9,16	16,31
Porcentaje de ahorro en tiempo	41%	26%
Tiempo total sin mejora (hora)	0,52	0,83
Tiempo total con mejora (hora)	0,25	0,56
Porcentaje ahorro total	52%	33%
Capacidad maquinaria (Ton)	75	600
Máxima inyección (g)	146	3145
Relación tonelaje/gramaje	0,51	0,19
Factor de tonelaje/gramaje	0,37	
Factor porcentual estimación	63%	

En la tabla 3.7 se registran los valores de los tiempos totales de acuerdo a los procesos sin mejora y con mejora a nivel experimental y empresarial.

En cuanto a la obtención del tiempo total del proceso sin mejora a nivel experimental, esto es el proceso de purga automática se obtuvo el valor de 0,52 horas. Por otro lado, en la parte empresarial este valor fue requerido de parte de representantes de la empresa siendo expresado en horas el tiempo total de 0,83.

En la parte experimental con mejora se estableció el valor de 0,25 horas de acuerdo a los resultados estadísticos desarrollados. Además, para la estimación de la parte empresarial fue necesario el uso de la relación tonelaje/gramaje dando como resultado un valor aproximado de 0,56 horas.

Finalmente obteniendo un ahorro porcentual en la parte experimental y empresarial los valores de 52% y 33%.

3.3 Resultados de consumos durante la purga

3.3.1 Consumo de material de experimental

Se determinó por la capacidad de llenado del barril en la máquina inyectora.

Tabla 3.8 Cantidad de materia necesaria en el barril

Cantidad (kg)	Observación
0,3	Exceso
0,15	Insuficiente
0,2	Exacto
0,25	Exceso

La tabla 3.8 presenta los resultados obtenidos durante la determinación de cantidad de materia necesaria para llenar el barril de la inyectora, seleccionando el valor de 0,2 kg como cantidad de polipropileno necesario para llenar el barril de manera satisfactoria.

3.3.2 Consumo de material de validación

Tabla 3.9 Obtención y deducción de material de purga

Consumo purga	Experimental	Empresa
Sin mejora	0,5	4
Con mejora	0,3	2,99
Porcentaje de ahorro	40%	25%
Capacidad maquinaria (Ton)	75	600
Máxima inyección g	146	3145
Relación tonelaje/gramaje	0,51	0,19
Factor de tonelaje/gramaje	0,37	
Factor porcentual	63%	

En la tabla 3.9 presenta la cantidad de material de purga necesaria para la realización en los procesos experimentales y su estimación en la parte empresarial. Para estimación realizada se hizo uso de la relación tonelaje/gramaje, de esta manera se estima un porcentaje de ahorro del 25% en la parte empresarial y en cuanto a lo experimental un ahorro del 40%.

Tabla 3.10 Obtención y deducción de material de transición

Consumo PP natural	Experimental	Empresa
Sin mejora	0,63	5
Con mejora	0,2	2,85
Porcentaje de ahorro	68%	43%
Capacidad maquinaria (Ton)	75	600
Máxima inyección (g)	146	3145
Relación tonelaje/gramaje	0,51	0,19
Factor de tonelaje/gramaje	0,37	
Factor porcentual	63%	

En la tabla 3.10 haciendo usos de la relación de tonelaje/gramaje se logró estimar el proceso con mejora a nivel empresarial con un valor de 2.85 kg y un ahorro porcentual de 43%.

3.4 Resultados del análisis económico

A continuación, se procede a detallar el resultado de las tablas desarrolladas para la elaboración del análisis económico.

Tabla 3.11 Costo de implementación de maquinaria

LIEN-YU D75			
Detalle	Cantidad	Unidad	Total
Horas de trabajo semanal al 50%	20	[horas]	20
Número de personal para operar la maquinaria	2	unid.	2
Inversión en maquinaria:	22393,66	[\$]	22393,66
Tasa de depreciación	10	[años]	10
Depreciación	43,06	[\$]	43,06
Mano de Obra directa (\$3,13/hora):	20	[hora]	62,60
Supervisión (\$7,50/hora):	10	[hora]	75,00
Energía (\$0.0799/KW)	6	[KW/hora]	9,59
SUBTOTAL			\$ 190,25
Gastos Indirectos (20% del subtotal)			\$ 38,05
COSTOS TOTALES			\$ 228,30

De acuerdo con la tabla 3.11 se obtiene el valor de la inversión maquinaria, para la elaboración de este proyecto siendo un valor de \$ 228,30 en este valor incluye, la depreciación de maquinaria, mano de obra, supervisión, energía y gastos indirectos.

Tabla 3.12 Costo de proceso empresarial Sin Mejora

Tipo de proceso: Inyección (600 Ton) Sin Mejora			
Material de purga: UltraPlast PO-E			
Aplicación: Cambio de polipropileno concho de vino a beige			
Detalle	Cantidad	Unidad	Total
Cantidad de compuesto de purga usada	4	[kg]	4
Precio del compuesto purga	14	[\$/kg]	14
Costo de purga del compuesto		[\$]	56
Tiempo total de parado de máquina (50 min)	0,833333	[hora]	0,833
Valor hora hombre operador	2,90	[\$/hora]	2,90
Valor hora hombre supervisor	3,72	[\$/hora]	3,72
Costo de personal operativo		[\$]	5,51
Cantidad de resina usada junto con la purga	5	[kg]	5
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para pre-purgar		[\$]	10,00
Cantidad de resina para eliminar el compuesto purga	5	[kg]	5
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para post-purga		[\$]	10,00
COSTO TOTAL			\$ 81,51

En la tabla 3.12 se detalla el costo de la implementación de un proceso sin mejora a nivel empresarial cuyo valore representa \$ 81,51.

Tabla 3.13 Costo de proceso experimental Sin Mejora

Tipo de proceso: Inyección (75 Ton) Sin Mejora			
Material de purga: UltraPlast PO-E			
Aplicación: Cambio de polipropileno concho de vino a beige			
Detalle	Cantidad	Unidad	Total
Cantidad de compuesto de purga usada	0,5	[kg]	0,5
Precio del compuesto purga	14	[\$/kg]	14
Costo de purga del compuesto		[\$]	7
Tiempo total de parado de máquina (30,95 min)	0,52	[hora]	0,52
Valor hora hombre	3,13	[\$/hora]	3,13
Costo de personal operativo (2 personas)		[\$]	3,26
Cantidad de resina usada junto con la purga	0,63	[kg]	0,63
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para pre-purgar		[\$]	1,26
Cantidad de resina para eliminar el compuesto purga	0,63	[kg]	0,63
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para post-purga		[\$]	1,26
COSTO TOTAL			\$ 12,78

En la tabla 3.13 se detalla el costo de un proceso de purga sin mejora a nivel experimental con un valor de \$12,78.

Tabla 3.14 Costo de proceso experimental Con Mejora

Tipo de proceso: Inyección (75 Ton) Con Mejora			
Material de purga: UltraPlast PO-E			
Aplicación: Cambio de polipropileno concho de vino a beige			
Detalle	Cantidad	Unidad	Total
Cantidad de compuesto de purga usada	0,3	[kg]	0,3
Precio del compuesto purga	14	[\$/kg]	14
Costo de purga del compuesto		[\$]	4,2
Tiempo total de parado de máquina (16,18 min)	0,27	[hora]	0,27
Valor hora hombre	3,13	[\$/hora]	3,13
Costo de personal operativo (2 personas)		[\$]	1,69
Cantidad de resina usada junto con la purga	0,2	[kg]	0,2
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para pre-purgar		[\$]	0,40
Cantidad de resina para eliminar el compuesto purga	0,2	[kg]	0,2
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para post-purga		[\$]	0,40
COSTO TOTAL			\$ 6,69

En la tabla 3.14 se detalla el costo de un proceso de purga con mejora a nivel experimental con un valor de \$6,69.

Tabla 3.15 Costo proceso empresarial Con Mejora

Tipo de proceso: Inyección (600 Ton) Con Mejora estimada			
Material de purga: UltraPlast PO-E			
Aplicación: Cambio de polipropileno concho de vino a beige			
Detalle	Cantidad	Unidad	Total
Cantidad de compuesto de purga usada	2,99	[kg]	2,99
Precio del compuesto purga	14	[\$/kg]	14
Costo de purga del compuesto		[\$]	41,86
Tiempo total de parado de máquina (33,54 min)	0,56	[hora]	0,56
Valor hora hombre operador	2,9	[\$/hora]	2,9
Valor hora hombre supervisor	3,72	[\$/hora]	3,72
Costo de personal operativo		[\$]	3,7072
Cantidad de resina usada junto con la purga	2,85	[kg]	2,85
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para pre-purgar		[\$]	5,7
Cantidad de resina para eliminar el compuesto purga	2,85	[kg]	2,85
Precio de la resina	2	[\$/kg]	2
Costo de la resina para post-purga		[\$]	5,7
COSTO TOTAL			\$56,97

En la tabla 3.15 se detalla el costo de un proceso de purga con mejora a nivel empresarial con un valor de \$56,97.

Tabla 3.16 Cantidad de beneficio porcentual

Cantidad de purga promedio mensual: 700kg		
Cantidad promedio de procesos de purga mensuales:175		
	Sin Mejora	Con Mejora
Costo por unidad de proceso	\$81,51	\$56,97
Costo mensual del proceso	\$14.264,25	\$9.969,75
Ahorro porcentual estimado	30%	

En la tabla 3.16 se refleja la comparación de un proceso sin mejora y con mejora a nivel empresarial obteniendo un ahorro porcentual estimado de 30% como beneficio económico.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la caracterización reológica se demostraron que existe incrementos en las variaciones de viscosidad al aumentar la temperatura, mientras mayor sea la viscosidad del material de purga en comparación con el material residual o polipropileno. Mayor será de fuerza de arrastre que permitirá salida de residuos facilitando la limpieza, minimizando el tiempo en que la maquinaria no se encuentra operando de manera productiva.

De acuerdo con análisis de varianza ANOVA se selecciona la temperatura de 260°C, la cual permite que el proceso de purga mediante inyección continua tenga una reducción en cuanto el tiempo total de 26%, material de purga de 25% y material de transición de 43% en ahorro con un nivel de significancia del 95%.

El análisis económico presente indica que con una inversión de \$ 228,30 se puede lograr un ahorro porcentual del proceso en un 30% a nivel empresarial, tomando en cuenta un promedio mensual de material de purga de 700kg se estima un ahorro de \$ 4,294.50 mensual con la implementación del proceso mejorado.

Recomendaciones

Los resultados proyectados son una estimación del proceso de purga con mejora, lo que sería ideal la validación de este proceso propuesto en las maquinarias que se operan a nivel empresarial. De esta manera los resultados proyectados serian corroborados.

Los resultados de este proceso de purga por inyección continua podrían mejorar si la dosificación del material de purga se lo realiza en 2 o 3 partes alternadas con material de transición es decir con polipropileno natural.

Evitar que la maquinaria se quede sin material durante el proceso de purga, ya que esta acción hace que los tiempos de implementación sean prolongados. Además, esto permite el ingreso de oxígeno dentro del barril dando lugar a que se queme la resina que se encuentra adherida a las paredes del barril perjudicando la eficiencia de la implementación del proceso.

Se recomienda realizar un análisis de consumo energético a nivel empresarial para comparación de la cantidad de energía requerida en este nuevo proceso versus el beneficio económico alcanzado.

BIBLIOGRAFÍA

- Alva, N. (25 de Marzo de 2014). *Plásticos y Desarrollo*. Obtenido de <http://plasticosydesarrollo.blogspot.com/2014/03/torque-reometro.html>
- Boronat Vitoria, T. (2009). *Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados*. España: Tesis Doctoral Universidad. Politécnica de Valencia,doi:10.4995/Thesis/10251/5024.
- Brabender GmbH, C. K. (2008). *Manual de instrucciones*. Alemania.
- Braskem, S. T. (2017). *Ficha Técnica según la norma ASTM D 4101*. Brasil.
- Braskem, S. t. (2019). *Ficha técnica según la norma ASTM D 4101*. Brasil.
- Ekos. (30 de Junio de 2021). Obtenido de <https://www.ekosnegocios.com/articulo/ecuador-tiene-tarifas-electricas-mas-economicas-que-colombia-y-peru#:~:text=Las%20tarifas%20promedio%20de%20consumo,de%20todo%20el%20sector%20el%C3%A9ctrico>.
- Halimatuddahlia, H. I. (2005). Flow Behavior of Polypropylene/EthylenePropylene Diene Terpolymer/Natural Rubber (PP/EPDM/NR) Blends by Torque Rheometer: The Effect of N,N-m-Phenylene Bismaleimide (HVA-2) Addition. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1429-1442.
- Inyectoras Lien Yu. (28 de Octubre de 2021). Obtenido de https://maquitecsolutions.com/pages/pdf/inyectoras_lienyu.pdf
- Kalay. (2016). *Ultra Plast PO-E, Ficha de datos de seguridad*. Brasil.
- Lerma, J. R. (17 de Noviembre de 2021). *Canales sectoriales*. Obtenido de [https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/227098-Temperatura-de-molde-\(V\).html](https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/227098-Temperatura-de-molde-(V).html)
- Ortega, C. (28 de Octubre de 2021). *PRIVARSA*. Obtenido de <https://www.privarsa.com.mx/la-purga-te-ayuda-a-reducir-costos-en-la-inyeccion-de-plastico/>

- PETROQUIM.* (12 de Noviembre de 2021). Obtenido de <http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/>
- Prada Ospina, R., & Acosta Prado, J. C. (2017). El moldeo en el proceso de inyección de plásticos para el logro de objetivos empresariales. *Dimensión Empresaria*, 157-168.
- Purga-UltraPlast (R)* . (28 de Diciembre de 2021). Obtenido de <http://www.purga-ultraplast.com/>
- Quimica.es.* (18 de Noviembre de 2021). Obtenido de https://www.quimica.es/enciclopedia/Moldeo_por_inyecci%C3%B3n.html
- Quimica.es.* (1 de Diciembre de 2021). Obtenido de https://www.quimica.es/enciclopedia/Polipropileno.html#_note-1/
- Tabla B Distribución T de Student. (2010). En *Probabilidad y Estadística, Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 726). Guayaquil.
- Wikimedia.* (17 de Noviembre de 2021). Obtenido de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polypropylen.png>
- Zurita, G. (2010). Diseño robusto de un producto. En *Probabilidad y Estadística, Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 706). Guayaquil.
- Zurita, G. (2010). Tabla D, Distribución F de Fisher. En *Probabilidad y Estadística, Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 729). Guayaquil.

APÉNDICE



Apéndice Figura 1. Secuencia de proceso de purga por sistema automático



Apéndice Figura 2. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 220°C



Apéndice Figura 3. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 240°C



Apéndice Figura 4. Secuencia de proceso de purga por inyección continua a 260°C