



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

## **“MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA EXTRUSORA TIPO HUSILLO MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE ANSYS CFD SIMULATION”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA: SELENA ALEXANDRA CORONEL PARRA**

**DIRECTOR: ING. DANIEL ANTONIO CHUQUÍN VASCO, M.Sc**

Riobamba – Ecuador

2020

**©2020, Selena Alexandra Coronel Parra**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Selena Alexandra Coronel Parra declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 18 de Febrero de 2020



**Selena Alexandra Coronel Parra**

**060408245-3**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Propuesta Tecnológica, **“MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA EXTRUSORA TIPO HUSILLO MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE ANSYS CFD SIMULATION”**, realizado por la señorita: **SELENA ALEXANDRA CORONEL PARRA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

|  | <b>FIRMA</b>  | <b>FECHA</b> |
|--|---|--------------|
| Dr. Bolivar Edmundo Flores Humanante<br><b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>             | <br>-----  | 2020-02-18   |
| Ing. Daniel Antonio Chuquín Vasco<br><b>DIRECTOR DEL TRABAJO<br/>DE TITULACIÓN</b> | <br>----- | 2020-02-18   |
| Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes<br><b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>                    | <br>----- | 2020-02-18   |

## **DEDICATORIA**

Dedico estas páginas a mis padres Leonor y Gustavo por ser mi orgullo e inspiración y formar parte del pilar fundamental para la construcción de mi formación académica y personal. Por todo su apoyo incondicional para enfrentar los retos de la vida, pero sobre todo por confiar en mí y enseñarme valores que hoy me hacen ser mejor. Cada amanecida, sacrificio y esfuerzo trae consigo una gran meta, gracias por siempre recordármelo y no dejarme decaer en ningún momento, ustedes padres son el mejor regalo que Dios me pudo dar, sin ustedes nada de esto sería posible. A mis hermanos Angélica y Edgar por brindarme incondicionalmente su paciencia, comprensión y apoyo con palabras de aliento para seguir adelante en cada etapa que he transcurrido, cada uno de ustedes son un ejemplo de superación y un estímulo para seguir adelante. De igual manera a mis sobrinos por siempre sacarme una sonrisa todos los días y ser la alegría de mi vida.

Selena

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme culminar esta meta anhelada, también a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo especialmente a la Escuela de Ingeniería Química por mi formación académica, a todos mis maestros, amigos y personas que estuvieron a lo largo de la carrera universitaria acompañándome y que de una u otra manera hicieron que sea posible formar un lazo mutuo de confianza, respeto y enseñanza.

Selena

## TABLA DE CONTENIDO

|                         |      |
|-------------------------|------|
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | xi   |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xii  |
| RESUMEN.....            | xiii |
| SUMARY .....            | xiv  |

### CAPÍTULO I

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b> | <b>1</b> |
| 1.1. Identificación del Problema.....                 | 1        |
| 1.2. Justificación del proyecto .....                 | 2        |
| 1.3. Línea de base del Proyecto .....                 | 2        |
| 1.4. Beneficiarios directos e indirectos .....        | 3        |
| 1.4.1. <i>Beneficiarios directos</i> .....            | 3        |
| 1.4.2. <i>Beneficiarios indirectos</i> .....          | 3        |
| 1.5. Objetivos .....                                  | 3        |
| 1.6. Localización del Proyecto .....                  | 4        |

### CAPÍTULO II

|   |          |
|---|----------|
| <b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>                    | <b>5</b> |
| 2.1. Extrusora Tipo Husillo .....                       | 5        |
| 2.2. Zonas de la Extrusora .....                        | 6        |
| 2.2.1. <i>Zona de Alimentación</i> .....                | 6        |
| 2.2.2. <i>Zona de Plastificación o Compresión</i> ..... | 6        |
| 2.2.3. <i>Zona de Dosificación y Descarga</i> .....     | 6        |
| 2.3. Polipropileno.....                                 | 7        |

|  |   |
|--|---|
| <b>2.4. ANSYS CFD Simulation</b> .....     | 7 |
| <i>2.4.1. Geometría</i> .....              | 8 |
| <i>2.4.2. Pre Procesamiento CFD</i> .....  | 8 |
| <i>2.4.3. Solver CFD</i> .....             | 8 |
| <i>2.4.4. Post Procesamiento CFD</i> ..... | 9 |

### **CAPÍTULO III**

|   |    |
|---|----|
| <b>3. MARCO METODOLÓGICO</b> .....  | 10 |
| <b>3.1. Tipo de Estudio</b> .....   | 10 |
| <b>3.2. Métodos</b> .....   | 10 |
| <b>3.3. Proceso de Extrusión de Material Plastificante</b> .....  | 11 |
| <i>3.3.1. Pre calentamiento de la Extrusora Tipo Husillo</i> .....  | 11 |
| <i>3.3.2. Extrusión de Polipropileno</i> .....  | 12 |
| <i>3.3.3. Recolección de datos</i> .....  | 12 |
| <b>3.4. Técnicas</b> .....  | 12 |
| <i>3.4.1. Análisis SEM</i> .....  | 12 |
| <i>3.4.2. Análisis FTIR</i> .....   | 13 |
| <i>3.4.3. Determinación de Densidad</i> .....   | 13 |
| <i>3.4.4. Modelado de la extrusora tipo husillo en el Software CFD</i> .....  | 14 |
| <i>3.4.5. Determinación de variables de Proceso (Entrada y Salida)</i> .....  | 14 |
| <i>3.4.6. Obtención de perfiles de Temperatura, Presión y Velocidad con variación del flujo de Alimentación</i> ..... | 15 |
| <b>3.5. Planteamiento de Simulación:</b> .....  | 15 |
| <i>3.5.1. Geometría</i> .....   | 16 |
| <i>3.5.2. Mallado</i> .....   | 19 |
| <i>3.5.3. Configuración</i> .....   | 20 |

### **CAPÍTULO IV**



|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>4.1. Propiedades Físicoquímicas</b> .....  | <b>22</b> |
| <i>4.1.1. Caracterización de la Materia Prima</i> .....   | <b>23</b> |
| <b>4.2. Condiciones de Operación de Extrusión</b> .....   | <b>24</b> |
| <i>4.2.1. Datos de estabilización reales del equipo</i> .....   | <b>24</b> |
| <i>4.2.2. Simulación CFD</i> .....  | <b>25</b> |
| <b>4.3. Obtención de perfiles de Temperatura, Presión y Velocidad con variación del flujo de Alimentación</b> ..... | <b>32</b> |
| <i>4.3.1. Variación de Flujo de Alimentación a 1 kg</i> .....   | <b>32</b> |
| <i>4.3.2. Variación de Flujo de Alimentación a 1.5 Kg</i> .....   | <b>36</b> |
| <i>4.3.3. Variación de Flujo de Alimentación a 2.5 kg</i> .....   | <b>37</b> |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO V</b> .....   | <b>39</b> |
| <br>  |           |
| <b>5. REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>5.1. Análisis Costo-Beneficio del Proyecto</b> .....   | <b>39</b> |
| <i>5.1.1. Presupuesto</i> .....   | <b>39</b> |
| <b>5.2. Cronograma de ejecución del Proyecto</b> .....  | <b>39</b> |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b> .....  | <b>42</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   |           |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1-3:</b> Microscopía Electrónica de Barrido .....  | 12 |
| <b>Tabla 2-3:</b> Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo .....                               | 13 |
| <b>Tabla 3-3:</b> Determinación de Densidad .....   | 13 |
| <b>Tabla 4-3:</b> Modelado de la extrusora tipo husillo en Software CFD .....                     | 14 |
| <b>Tabla 5-3:</b> Determinación de variables de Proceso (Entrada y Salida) .....                  | 14 |
| <b>Tabla 6-3:</b> Obtención de perfiles de T, P y V con variación del flujo de Alimentación ..... | 15 |
| <b>Tabla 7-3:</b> Piezas de la extrusora Tipo Husillo .....                                       | 17 |
| <b>Tabla 8-3:</b> Condiciones de Simulación .....   | 21 |
| <b>Tabla 1-4:</b> Densidad de Polipropileno .....   | 22 |
| <b>Tabla 2-4:</b> Caracterización Físicoquímica de Polipropileno .....                            | 23 |
| <b>Tabla 3-4:</b> Variación de Flujo de Alimentación .....  | 32 |
| <b>Tabla 4-4:</b> Variación de Flujo de Alimentación a 1 Kg .....                                 | 36 |
| <b>Tabla 5-4:</b> Variación de Flujo de Alimentación a 1.5 Kg .....                               | 37 |
| <b>Tabla 6-4:</b> Variación de Flujo de Alimentación a 2.5 Kg .....                               | 38 |
| <b>Tabla 1-5:</b> Análisis Costo-Beneficio-Presupuesto .....                                      | 39 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1-1.</b> Georreferenciación del laboratorio de Operaciones Unitarias. ESPOCH..... | 4  |
| <b>Figura 1-2.</b> Extrusora Tipo Husillo.....  | 5  |
| <b>Figura 2-2.</b> Sección de la máquina de extrusión mostrando las diversas zonas.....     | 6  |
| <b>Figura 3-2.</b> Representación estereoquímica de las configuraciones de PP.....          | 7  |
| <b>Figura 4-2.</b> Ecuaciones de conservación.....  | 9  |
| <b>Figura 1-3.</b> Flujograma del Modelado y Simulación de la Extrusora tipo husillo.....   | 16 |
| <b>Figura 2-3.</b> Modelación y Ensamblaje CAD-Extrusora tipo husillo.....                  | 19 |
| <b>Figura 3-3.</b> Capas, mallado y límites de flujo en Software CFD.....                   | 19 |
| <b>Figura 4-3.</b> Inputs Fluido.....   | 20 |
| <b>Figura 1-4.</b> Condición inicial de temperatura.....                                    | 26 |
| <b>Figura 2-4.</b> Pre calentamiento del equipo a 25min.....                                | 26 |
| <b>Figura 3-4.</b> Pre calentamiento del equipo a 45min.....                                | 27 |
| <b>Figura 4-4.</b> Pre calentamiento del equipo a 1h y 10min.....                           | 27 |
| <b>Figura 5-4.</b> Pre calentamiento del equipo a 1h y 30min.....                           | 28 |
| <b>Figura 6-4.</b> Pre calentamiento del equipo a 1h y 56min.....                           | 28 |
| <b>Figura 7-4.</b> Presión teórica del Polipropileno.....                                   | 29 |
| <b>Figura 8-4.</b> Velocidad teórica del Polipropileno.....                                 | 30 |
| <b>Figura 9-4.</b> Temperatura teórica del Polipropileno.....                               | 30 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Gráfico 1-4.</b> Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo Polipropileno .....       | 23 |
| <b>Gráfico 2-4.</b> Microscopía electrónica de barrido de Polipropileno .....             | 24 |
| <b>Gráfico 3-4.</b> Datos de temperatura de estabilización del Equipo .....               | 25 |
| <b>Gráfico 4-4.</b> Datos de temperatura de estabilización del Equipo en el Software..... | 29 |
| <b>Gráfico 5-4.</b> Temperatura: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo .....                  | 33 |
| <b>Gráfico 6-4.</b> Presión: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo .....                      | 34 |
| <b>Gráfico 7-4.</b> Velocidad: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo .....                    | 35 |
| <b>Gráfico 8-4.</b> Cronograma de ejecución del proyecto .....                            | 35 |

## RESUMEN

El objetivo del modelado y simulación de la extrusora tipo husillo mediante el uso del Software ANSYS CFD permitió realizar una simulación en tiempo real del proceso de extrusión del Polipropileno, además de determinar las propiedades del material plástico cuando el mismo es sometido bajo ciertas condiciones. La principal ventaja del uso de este programa es que facilita el desarrollo y solución de problemas de cálculo y diseño, acorta tiempos y permite observar además de verificar el proceso del fluido, el cual pasa por varias etapas entre ellas: la zona de alimentación, plastificación, dosificación y descarga. El diseño del equipo se lo realiza con medidas reales, esto a fin de que los resultados obtenidos se encuentren lo más cercano posible a la realidad. Con el modelo generado de la extrusora se procede a ingresar datos (inputs) del Polipropileno entre los que constan valores de densidad, viscosidad dinámica, Cp y conductividad térmica como parte del fluido, y como parte de equipo se configura el material de construcción propio de la extrusora. Con todos los parámetros ya establecidos se fijan las condiciones de frontera donde se configuran valores de presión ambiental y temperatura de 3 resistencias que alcanzan los 500 grados Celsius. Finalmente se procede a ejecutar el Simulador en primera instancia para el precalentamiento del equipo en donde el fluido netamente es aire, y posterior a esto cuando alcanza la temperatura seteada de 175 grados Celsius de extrusión del Polipropileno se procede a ingresar el nuevo fluido preestablecido del material plastificante para observar su comportamiento en el transcurso del tiempo, cabe mencionar que para alcanzar esta meta se trabajó con un determinado número de iteraciones y tiempo establecidos por el usuario. Las principales variables de análisis proporcionadas por el software al concluir el análisis de fluidos fueron: presión, temperatura y velocidad. Además, se procedió a realizar un análisis del material que entra al equipo el cual posee ciertas propiedades que pueden influir en el proceso de extrusión. Se recomienda considerar para el análisis las pérdidas de calor existentes durante el proceso.

**Palabras Clave:** <ANSYS CFD (SOFTWARE) >, <POLIPROPILENO>, <EXTRUSIÓN>, <EXTRUSORA TIPO HUSILLO>, <PLASTIFICACIÓN>.



## SUMMARY

The objective of the modeling and simulation of the screw extruder by using the ANSYS CFD software allowed a real-time simulation of the extrusion process of the Polypropylene in addition to determining the properties of the plastic material when it is submitted under certain conditions. The main advantage of the use of this program is that it facilitates the development and solution of calculation and design of problems, shortens times and allows observing as well as verifying the process of the fluid, which goes through several stages such as: the feeding, plasticizing, dosing and unloading area. The design of the equipment is carried out with real measurements so that the results obtained are as close as possible to reality. With the model generated of the extruder, data (inputs) of the Polypropylene are entered, among which are values of density, dynamic viscosity, Cp and thermal conductivity as part of the fluid, and as part of the equipment, the extruder's construction material is configured. With all the parameters already established, the boundary conditions are set where the values of environmental pressure and temperature of 3 resistances reaching 500 degrees Celsius are configured. Finally, the Simulator is run first to preheat the equipment where the fluid is clear air, and then when it reaches the set temperature of 175 degrees Celsius of the polypropylene extrusion, the new pre-established fluid of the plasticizing material is introduced to observe its behavior over time. It is worth mentioning that to achieve this goal, a certain number of iterations and time established by the user were used. The main analysis variables provided by the software at the end of the fluid analysis were: pressure, temperature, and speed. Besides, an analysis of the material entering the equipment was carried out, which has certain properties that can influence the extrusion process. It is recommended to consider for the analysis the heat losses existing during the process.

**Keywords:** <ANSYS CFD (SOFTWARE)>, <POLYPROPYLENE>, <EXTRUSION>, <SCREW EXTRUDER>, <PLASTIFICATION>.



# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del Problema

La extrusión es un proceso en el cual un material mediante presión pasa por una matriz con el fin de generar artículos con diferentes perfiles más complejos por lo que es considerado un proceso importante de transformación a nivel industrial. La utilización de un Software computacional para la realización de análisis y optimizaciones de diferentes procesos de flujo no se pueden solamente describir de manera analítica, por lo que se debe hacer uso de nuevos métodos los cuales proporcionan una perspectiva minuciosa del proceso dentro de las maquinas que trabajan esencialmente con flujos de fluidos puros y mezclas.

La extrusora tipo husillo en el proceso de plastificación de un determinado material presenta una gran factibilidad para el uso de simuladores como es CFD, el mismo que dependiendo de determinadas variables mostrará valores y comportamientos ideales que debe presentar dicho equipo para su correcto funcionamiento. El proceso de fundición esencialmente se ejecuta dentro de la pared que forma parte del cilindro caliente, por lo que debe existir un control adecuado de ciertos parámetros que intervienen en el proceso como es la temperatura de extrusión del plástico, velocidad, rpm, viscosidad, presión, flujo de masa y la capacidad calorífica. Este último parámetro se almacena en dependencia del modelo del material en donde se analiza la cantidad de energía necesaria para calentar un kilogramo de una sustancia a un Kelvin.

Cabe mencionar que la temperatura es un parámetro sumamente importante, por lo que la conductividad térmica depende de dos efectos que es la movilidad de las moléculas por efecto de la temperatura y el volumen utilizado. Por ende, considerando la gran importancia que debe tener la temperatura dentro del proceso de extrusión del material plástico, así como las otras variables ya mencionadas, lo más adecuado en primera instancia es necesario conocer el funcionamiento correcto de los dispositivos presentes en el equipo ya que los mismos deben funcionar de manera adecuada y correcta al momento del desarrollo del proceso.

El equipo de referencia ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias es utilizado para generar películas o láminas de un determinado material fundido que puede ser puro o en mezcla. El principal inconveniente de este equipo se enfoca en las variaciones significativas de temperaturas proporcionadas por las termocuplas a diferentes tiempos al momento que se

encuentra en funcionamiento el equipo, esto genera un gran problema debido a que al momento de realizar varias repeticiones utilizando iguales temperaturas, materiales similares y a unos mismos rpm, la extrusión presenta variaciones notables en el producto final.

Debido a esta falla lo que se busca mediante el Software CFD es analizar de forma más detallada el comportamiento que debería tener el equipo dependiendo de las variables con las que se trabaje.

## **1.2. Justificación del proyecto**

La extrusora tipo husillo ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias utiliza fuerzas mecánicas para plastificar materiales mediante rotación del tornillo, en donde mediante la disipación de calor se calienta el plástico y se derrite. Los plásticos sufren una fundición gracias a una conducción de calor existente por lo que la principal variable a controlar es la temperatura. En la actualidad la extrusión de plástico es una de las tecnologías más utilizadas a nivel industrial debido a que su fuente de materia prima puede ser a partir del reciclaje esto previo a tratamientos que adecuen el material inicial, para que el mismo se funda y se obtenga un material más complejo con las características y especificaciones deseadas.

La utilización en este caso de un software computacional es de suma importancia ya que contribuye a una serie de ventajas, entre las más importantes es que permite conocer de manera detallada el funcionamiento del equipo con el que se trabaja, da a conocer valores significativos considerando y modificando parámetros que intervienen dentro del proceso de extrusión, incluso permite verificar el estado de actividad de los dispositivos que forman parte del equipo. La modelación y simulación además mostrará un proceso continuo del fluido, donde su proceso dependerá netamente de las variables que se considere.

## **1.3. Línea de base del Proyecto**

La extrusora tipo husillo encargada de la fundición de diversos tipos de plástico se encuentra en el laboratorio de Operaciones Unitarias, la misma radica su importancia debido a que dicho equipo tiene la capacidad de extruir un determinado material bajo ciertas condiciones generando un cambio de fase del mismo en una de las zonas que conforman el tornillo. La principal variable para que ocurra este proceso es la temperatura por lo que es necesario tener un control adecuado de la misma. Las termocuplas acopladas para la medición de la temperatura se encuentran ubicadas en la zona de alimentación, compresión, dosificación y descarga, estas generan datos reales los cuales serán comparados con datos ideales simulados posteriormente.



## **1.4. Beneficiarios directos e indirectos**

### **1.4.1. Beneficiarios directos**

Los principales beneficiarios del uso de la aplicación de la simulación en ANSYS CFD son estudiantes, docentes y grupos de investigación de la facultad de Ciencias que requieran hacer uso del equipo, ya que el mismo permitirá comprobar el estado de funcionamiento correcto de la extrusora y las variables presentes, así se obtendrán datos más confiables para posibles prácticas y temas investigativos.

### **1.4.2. Beneficiarios indirectos**

La presente propuesta tecnológica otorgará múltiples beneficios a la industria de plásticos o generadoras de este, ya que mediante revalorización se pueden obtener nuevos productos de composición más compleja, en el cual para el proceso de este se hará uso de equipos (extrusoras) donde se aplicará un software computacional como es ANSYS CFD a fin crear nuevas mejoras.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

- Modelar la extrusora tipo husillo mediante el uso del Software ANSYS CFD Simulation.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el material de ingreso a la extrusora mediante un análisis fisicoquímico.
- Modelar el funcionamiento de la extrusora tipo husillo con el uso del programa ANSYS CFD Simulation.
- Establecer condiciones de operación y estabilización del equipo teóricos vs reales.
- Obtener perfiles de presión, temperatura, velocidad variando el flujo de alimentación.

## 1.6. Localización del Proyecto

El proyecto de estudio se realizará en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la Panamericana Sur km 1 ½. Laboratorio de Operaciones Unitarias se encuentra en las coordenadas 780 42'20" oeste a una altitud de 2815 msnm.



**Figura 1-1.** Georreferenciación del laboratorio de Operaciones Unitarias. ESPOCH

Realizado por: Google Maps, 2019

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Extrusora Tipo Husillo

La extrusora es un equipo capaz de procesar material plastificante mediante un flujo continuo bajo ciertas condiciones. El empuje generado se desarrolla mediante un husillo el cual hace pasar un material fundido a través del cilindro hasta la zona de descarga donde se obtiene finalmente un material homogeneizado. La Extrusora tipo husillo cuenta con algunos componentes como son: una tolva de alimentación, una camisa, un tornillo con 10 filetes, resistencias de 220V, y motor-reductor de 2 HP. El material de construcción de este es Acero Inoxidable AISI 304. (Tubón & Carillo 2014)

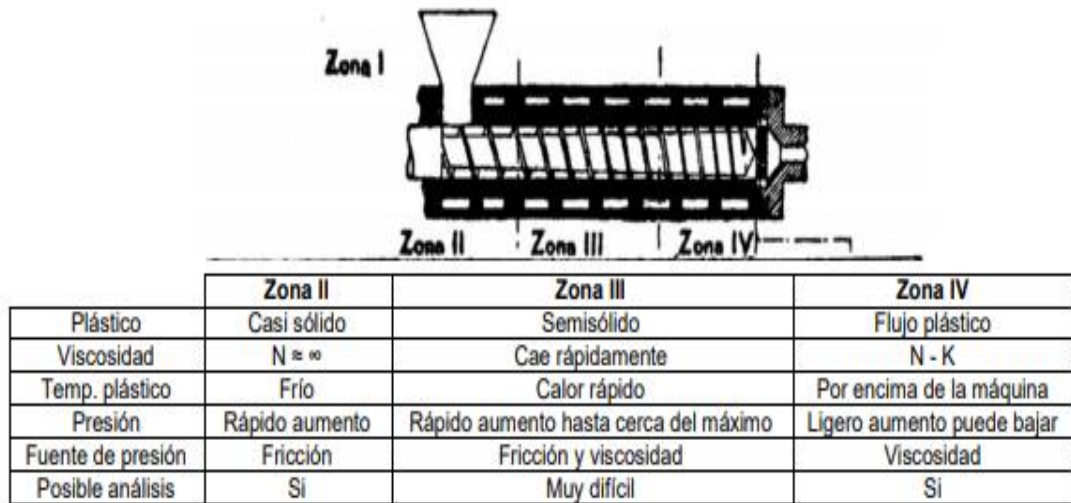
Dicho equipo además posee un tablero de control donde el usuario puede configurar según su necesidad diferentes temperaturas para cada una de las zonas además de poder establecer un número determinado de rpm.



**Figura 1-2.** Extrusora Tipo Husillo

**Fuente:** Espoch-Ciencias

## 2.2. Zonas de la Extrusora



**Figura 2-2.** Sección de la máquina de extrusión mostrando las diversas zonas

Fuente: Simonds 1972

### 2.2.1. Zona de Alimentación

Zona por la que ingresa el material sin fundir es decir se transporta el material sólido y empieza el incremento de la temperatura de este.

### 2.2.2. Zona de Plastificación o Compresión

Se comprime el polipropileno y es sometido a esfuerzos cortantes y fricción para lograr una fusión segura. El material para fundirse debido a la acción mecánica (arrastre) en conjunto con el incremento de temperatura empuja al material plástico hasta la zona de dosificación y descarga aumentando la presión. (Guamán 2017)

### 2.2.3. Zona de Dosificación y Descarga

Zona en la que existe una disminución del volumen del material y se genera una compresión sobre dicho material plástico la cual es útil para una buena homogenización de mezclado. Para este punto el plástico tiene una consistencia de líquido viscoso.

### 2.3. Polipropileno

El Polipropileno es un polímero termoplástico resultante de la polimerización del propeno, considerado el plástico más ligero por lo que resulta ventajoso dentro de diversas aplicaciones. Además, este polímero posee una alta resistencia a la temperatura y tracción.

El Polipropileno puede ser de tres maneras:

– **Isotáctica**

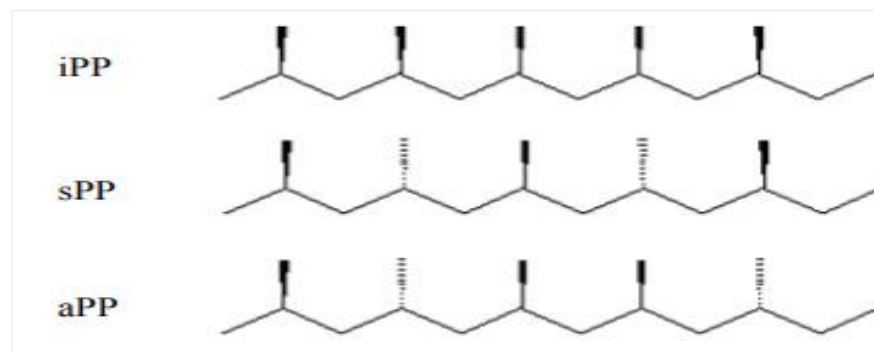
Los grupos metilo presentes se encuentran dispuestos de un mismo lado de la cadena.

– **Sindiotáctica**

Los grupos metilo se encuentran alternados de los dos lados de la cadena.

– **Atáctica**

Los grupos metilo se encuentran de forma desordenada sin ninguna secuencia específica.



**Figura 3-2.** Representación estereoquímica de las configuraciones de PP

Fuente: Maspoch, 2016

### 2.4. ANSYS CFD Simulation

Este Software proporciona un modelo integral para una extensa categoría de problemas de flujo de fluidos mediante el desarrollo de un análisis de estados, recrea modelos físicos y los efectos que intervienen en el mismo. Las herramientas disponibles además permiten la selección de flujo, demostración de la turbulencia y transferencia de calor existente principalmente. ANSYS CFD tiene la capacidad de predecir en si como se desarrolla el comportamiento de un fluido determinado dentro de un proceso. (Cedillo & Marín 2015)

### **2.4.1. Geometría**

DesignModeler es la herramienta designada para la creación y modificación de la geometría del equipo en el que se va a desarrollar posteriormente un análisis. Debido al vínculo directo que posee con los modelos geométricos creados se relaciona de forma adecuada con paquetes de CAD. La fuente geométrica al poseer una extensa gama de herramientas de simulación de Ingeniería.

### **2.4.2. Pre Procesamiento CFD**

PreTM es una interfaz que genera una definición intuitiva más definida para la simulación, en donde el mallado tiene una variedad de fuentes las cuales proporcionan al usuario diversas opciones de dominio, así como también condiciones de contorno entradas, salidas y diferentes perfiles. (Cedillo & Marín 2015)

### **2.4.3. Solver CFD**

Solver ManagerTM es un solucionador fiable y rápido que proporciona información del proceso, visualización dinámica, y parámetros ajustables. Posee por defecto una alta precisión de datos precisos de flujo. El movimiento de fluidos y la transferencia de calor además se encuentran establecido por las ecuaciones de:

- Cantidad de movimiento
- Cantidad de energía
- Conservación de masa

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Masa</b>                 | $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$  |
| <b>x-momentum</b>           | $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho) u \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx}$ |
| <b>y-momentum</b>           | $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho) v \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My}$ |
| <b>z-momentum</b>           | $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho) w \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz}$ |
| <b>Energía</b>              | $\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho) i \mathbf{u} = -\rho \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad} T) + \Phi + S_i$  |
| <b>Ecuaciones de estado</b> | $p = p(\rho, T) \quad i = i(\rho, T)$   |

**Figura 4-2.** Ecuaciones de conservación

Fuente: Ansys, 2018

#### 2.4.4. Post Procesamiento CFD

Posee una interfaz intuitiva que representa resultados cuantitativos y da representaciones gráficas de los mismos, además proporcionan información del comportamiento del equipo empleado para la simulación en tiempo real. Los valores cuantitativos generados incluso permiten obtener datos necesarios para un posterior análisis y mejoras del equipo. (Torres & Leonidivna 2018)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo de Estudio

Con referencia a recopilación bibliográfica se puede establecer un estudio exploratorio y experimental, ya que se utilizará un determinado número de variables a partir de las cuales será posible conocer diversos datos y comportamientos ideales del equipo.

- **Exploratoria:** la obtención de datos correctos en la actividad de la extrusora tipo husillo se convierte en el objetivo primordial para comprobar un mejor funcionamiento del equipo, así como de los accesorios que forman parte de esta corroborando su validación, además de obtener datos más exactos.
- **Experimental:** para la simulación será necesario el uso de datos o perfiles diversos de temperatura, viscosidad, flujo de masa y la capacidad calorífica, esto a fin de conseguir resultados que serán interpretados por el mismo programa utilizado como es ANSYS CFD.

#### 3.2. Métodos

Los trabajos de modelado y simulación que se encuentran dentro de propuestas tecnológicas necesitan fundamentación bibliográfica principalmente investigativa por lo que la parte teórica es de suma importancia dentro del presente anteproyecto. Las variables por utilizar son específicas, sin embargo, mediante el software ANSYS CFD se pueden realizar modificaciones en sus parámetros teniendo en consideración características especiales que se desee obtener en el producto final, de este modo los métodos a utilizar son los siguientes:

- **Método Inductivo**

Partiendo de un conocimiento previo sobre el funcionamiento de una extrusora se establecen variables que serán utilizadas en el Software, en el cual se ingresan valores dependientes de



especificaciones, se analizan variaciones de temperatura que presenta el tornillo central tipo husillo, así como rpm e incluso el material de ingreso al mismo equipo.

– **Método Deductivo**

Se analizan los principales problemas generados por el equipo y mediante recopilación bibliográfica se establecen comparaciones de los valores obtenidos en cada variable planteada, posteriormente dichos valores son utilizados en el software ANSYS CFD el cual es una herramienta que permitirá simular diferentes condiciones experimentales y validar la más apropiada.

– **Método Experimental**

En el caso de propuesta tecnológica el estudio se enfoca en la verificación de temperaturas dentro del equipo, así como de otras variables. La temperatura al ser una variable sumamente importante debe ser controlada de manera minuciosa. La simulación permitirá tener resultados viables para un mejor funcionamiento y rendimiento del equipo.

### **3.3. Proceso de Extrusión de Material Plastificante**

Para el proceso de extrusión del material plastificante es necesario conocer la temperatura de transición vítrea, la misma que es la temperatura a la cual las propiedades mecánicas de un plástico cambian absolutamente debido a sus cadenas.

#### ***3.3.1. Precalentamiento de la Extrusora Tipo Husillo***

Las resistencias eléctricas acopladas al equipo se encargan del calentamiento a lo largo de todo tornillo el cual mediante una conducción de calor alcanza las temperaturas deseadas y configuradas por el usuario. El precalentamiento del mismo se lo realiza utilizando como único fluido el aire. Las temperaturas seteadas para el caso del Polipropileno son 175 °C para todas sus zonas. El tiempo para la estabilización de las mismas temperaturas es de 90 a 120 min, las cuales pueden ser controladas y verificadas mediante iteraciones o tiempo establecido.

### 3.3.2. *Extrusión de Polipropileno*

Para que ocurra el proceso de extrusión del polipropileno el equipo se debe encontrar a 175°C, temperatura que es alcanzada previamente por el precalentamiento del equipo, además se debe establecer un número de rpm, valor que según Nonato & Bonse 2016 en su texto del Estudio de Polipropileno corresponde a 350 rpm para una correcta fluidez del fluido. Por último, se procede a alimentar el equipo con el material plastificante. Para la simulación se consideran también condiciones de presión local y temperatura ambiente.

### 3.3.3. *Recolección de datos*

La recolección de datos se realiza a través de 4 termocuplas instaladas como accesorios en cada una de las zonas de la extrusora. Los valores de las temperaturas son tomadas cada 60 segundos hasta que exista una estabilización de estas, pudiendo así determinar el tiempo de precalentamiento que necesita el equipo.

## 3.4. Técnicas

### 3.4.1. *Análisis SEM*

**Tabla 1-3:** Microscopia Electrónica de Barrido

| <b>FUNDAMENTO</b>  | <b>MATERIALES</b>  | <b>TÉCNICA</b>   |
|--|--|--|
| Es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra un fino haz de electrones, que permite obtener información morfológica, topográfica y composicional de las muestras produciendo imágenes de alta resolución. | – Microscopio electrónico de barrido.<br>– Muestra de Polipropileno. | – Encender el equipo y establecer un enlace con la cinta metálica.<br>– Operar a un nivel de vacío bajo y observar la muestra.<br>– Observar y capturar imágenes de las muestras analizadas.<br>– Analizar los resultados obtenidos. |

**Fuente:** Clavijo, 2013

**Realizado por:** Coronel Selena, 2019

### 3.4.2. Análisis FTIR

**Tabla 2-3:** Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo

| FUNDAMENTO   | MATERIALES   | TÉCNICA  |
|--|--|--|
| La espectroscopia de absorción infrarroja es el método utilizado para determinar las estructuras de moléculas con características de absorción de la radiación infrarroja según su vibración molecular. El espectro IR se puede usar como “huella dactilar” en la identificación de muestras desconocidas. | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Muestra de Polipropileno (Polvo).</li> <li>– Equipo: Perkin Elmer 100 FTIR Spectrum.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Encender el Equipo.</li> <li>– Verificar que el compartimiento de muestra este limpio y colocar el Polipropileno analizar.</li> <li>– Observar los resultados mediante el programa “Spectra Analysis”</li> <li>– Interpretar valores del espectro vibracional.</li> </ul> |

Fuente: Martinez, 2016

Realizado por: Coronel Selena, 2019

### 3.4.3. Determinación de Densidad

**Tabla 3-3:** Determinación de Densidad

| FUNDAMENTO  | MATERIALES   | TÉCNICA  |
|---|--|--|
| La densidad es una propiedad física, que en los polímeros depende de la estructura molecular del mismo. Esta es la cantidad de masa por unidad de volumen, medido en gramos por centímetro cúbico. El rango de densidades de los plásticos es relativamente bajo. | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Probeta.</li> <li>– Muestra de Polipropileno.</li> <li>– Termómetro.</li> <li>– Balanza.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se pesa una muestra de Polipropileno</li> <li>– Se sumerge la muestra en el agua (volumen determinado).</li> <li>– La densidad es calculada de acuerdo con la norma INEN-ISO 1183-1.</li> </ul> |

Fuente: Bartels, Campos & Gutiérrez, 2015

Realizado por: Coronel Selena, 2019

### 3.4.4. Modelado de la extrusora tipo husillo en el Software CFD

**Tabla 4-3:** Modelado de la extrusora tipo husillo en Software CFD

| FUNDAMENTO  | MATERIALES  | TÉCNICA  |
|---|---|--|
| ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están provistos de una interfaz gráfica. Incluye análisis de estructuras dinámicas y estáticas, análisis de transferencia de calor y fluidodinámica. | <ul style="list-style-type: none"> <li>– CAD</li> <li>– Software CFD</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se importa la geometría CAD al Software.</li> <li>– Se crean las capas, mallado, límites de entrada y salida del flujo.</li> <li>– Se introducen parámetros preestablecidos de fluido.</li> <li>– Se analiza los resultados obtenidos del Solver del Programa.</li> </ul> |

Fuente: Software CFD

Realizado por: Coronel Selena, 2019

### 3.4.5. Determinación de variables de Proceso (Entrada y Salida)

**Tabla 5-3:** Determinación de variables de Proceso (Entrada y Salida)

| FUNDAMENTO   | MATERIALES   | TÉCNICA  |
|--|--|--|
| Las variables de procesos establecen las principales condiciones en las que se desarrolla el proceso de extrusión. Las mismas ayudaran a que el material plastificante que será introducido se desarrolle bajos ciertos parámetros ya establecidos a fin de obtener un nuevo producto de características diferentes. | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Software CFD</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se establecen datos de funcionamiento del equipo (inputs) mediante revisión bibliográfica.</li> <li>– Se configuran parámetros de extrusión.</li> <li>– Se procede a ejecutar el Solver del programa.</li> <li>– Se analizan los resultados obtenidos (outputs).</li> </ul> |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

**3.4.6. Obtención de perfiles de Temperatura, Presión y Velocidad con variación del flujo de Alimentación**

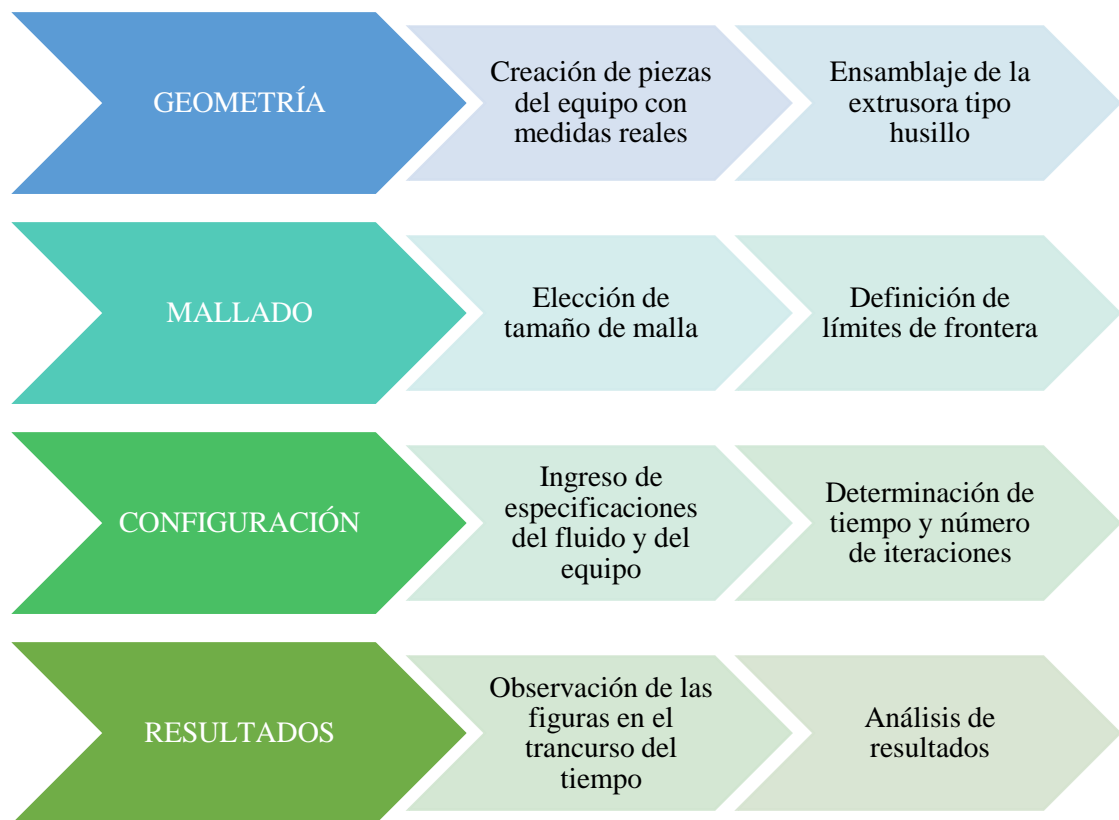
**Tabla 6-3:** Perfiles de Temperatura, Presión y Velocidad con variación de la Alimentación

| FUNDAMENTO   | MATERIALES   | TÉCNICA   |
|--|--|---|
| <p>Los elementos que componen un sistema son: entrada, salida y proceso. Los elementos de entradas son variables necesarias que deben ser definidas para poder tener objetivos resueltos, es decir elementos de salida. Cabe mencionar que las entradas se programan, en el proceso se aplican métodos, y con las salidas se encuentran soluciones a una interrogante.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Software</li> <li>- CFD.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se establecen Temperaturas de: Alimentación, Plastificación, Dosificación, Descarga. También condiciones del fluido y equipo.</li> <li>- Se ingresa el flujo másico.</li> <li>- Se procede a correr la simulación.</li> <li>- Se analizan las variables en cada una de las zonas que conforman la extrusora tipo husillo.</li> <li>- Se varía el flujo de alimentación para obtener perfiles de Presión, Temperatura y Velocidad.</li> </ul> |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

**3.5. Planteamiento de Simulación:**

En la siguiente figura se detalla el procedimiento para la Simulación:



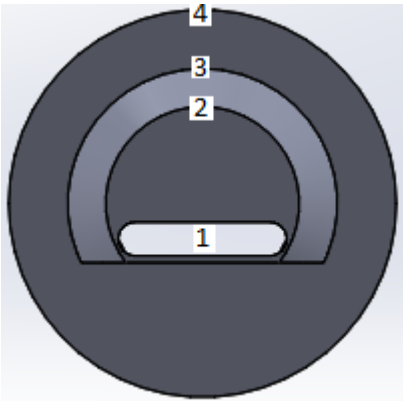
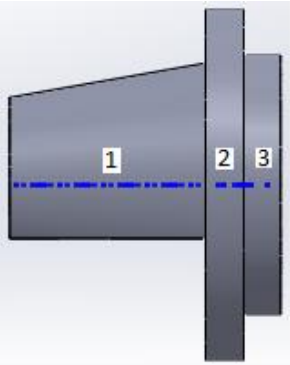
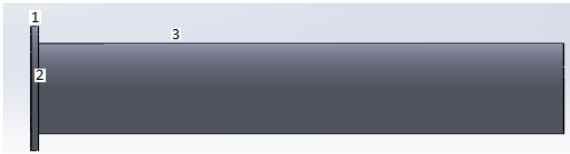
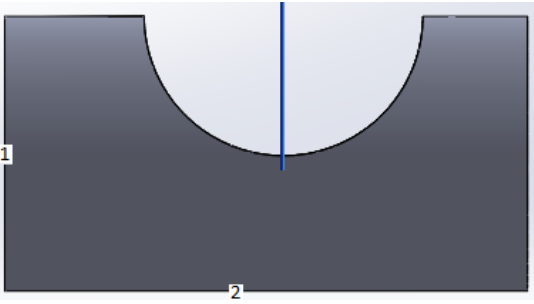
**Figura 1-3.** Flujograma del Modelado y Simulación de la Extrusora tipo husillo

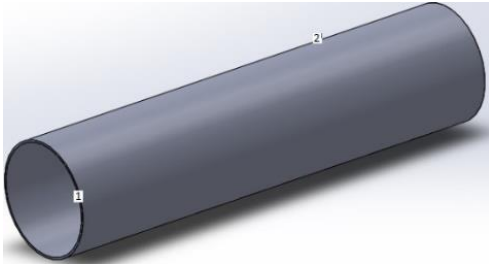
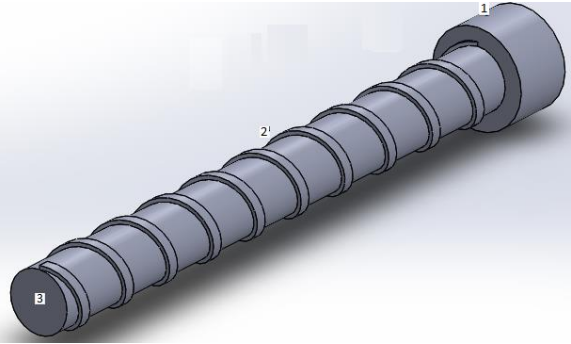
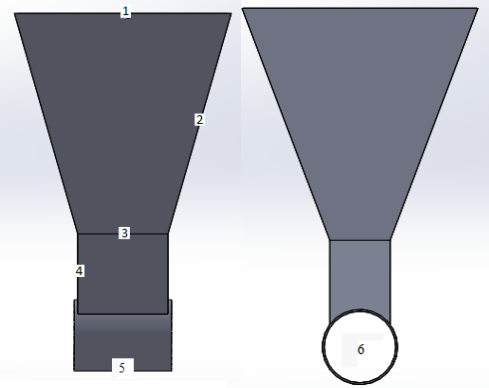
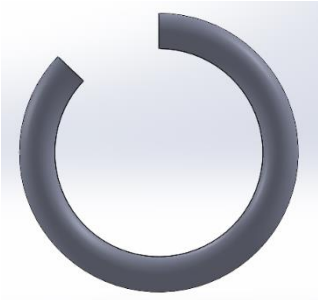
**Realizado por:** Coronel Selena, 2019

### 3.5.1. Geometría

El modelado de la extrusora tipo husillo se lo realizó mediante un Software CAD, el cual permite crear un diseño con perspectiva 3D. En el mismo se recrea cada parte del equipo como es la tolva de alimentación, el cilindro, el tornillo con sus respectivos filetes y la boquilla de descarga. Cada pieza fue realizada con medidas reales del equipo a fin de lograr un modelo idóneo del mismo. Las medidas para el diseño de la misma geometría fueron:

**Tabla 7-3:** Piezas de la extrusora Tipo Husillo

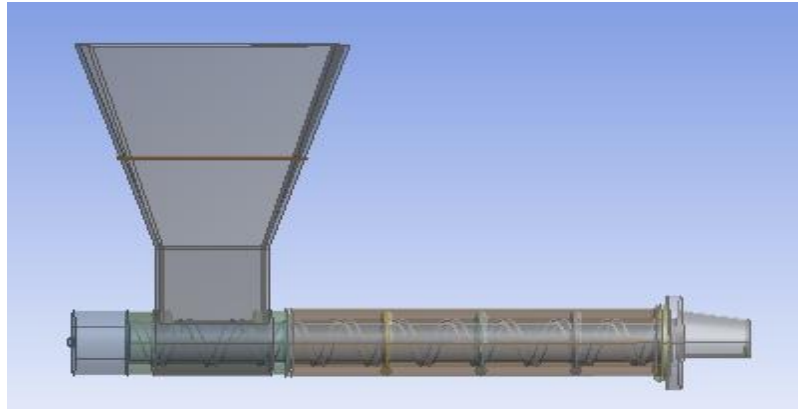
| Pieza                        | Diseño   | Dimensión   |
|------------------------------|--|---|
| Boquilla<br>Vista<br>frontal |     | 1. Orificio de Salida:<br>40mmx10mm<br>2. Radio: 28.72mm<br>3. Radio: 40mm<br>4. Diámetro: 115mm  |
| Boquilla<br>Vista<br>Lateral |    | 1. Área: 9410.9mm <sup>2</sup><br>Perímetro:420.61mm<br>2. Área:4516.04mm <sup>2</sup><br>Diámetro:115mm<br>Perímetro:722.57mm<br>3. Área:3204.42mm <sup>2</sup><br>Diámetro:85mm<br>Perímetro:534.07mm |
| Camisa                       |  | 1. Diámetro: 84mm<br>2. Área:68031.19mm <sup>2</sup><br>Perímetro:383.27mm<br>3. Distancia:353.93mm   |
| Conexión                     |  | 1. Área:28584.43mm <sup>2</sup><br>Diámetro:78.8mm<br>Perímetro:383.27mm<br>2. Distancia:148.72mm   |

|             |  |   |
|-------------|--|---|
| Forro       |     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área:92890.61mm<sup>2</sup><br/>Diámetro:84mm<br/>Perímetro:527.79mm</li> <li>2. Distancia:<br/>351.05mm</li> </ol>   |
| Tornillo    |    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área:12566.37mm<sup>2</sup><br/>Diámetro:80mm<br/>Perímetro:502.65mm<br/>Distancia: 49.95cm</li> <li>2. Longitud pieza:<br/>498.32mm<br/>Longitud de arco:<br/>1868.21mm<br/>Distancia entre cada filete:51.3mm</li> <li>3. Diámetro: 50.9mm</li> </ol> |
| Tolva       |  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Distancia: 245mm</li> <li>2. Distancia:<br/>276.66mm</li> <li>3. Distancia: 102mm</li> <li>4. Distancia: 90.83mm</li> <li>5. Distancia:<br/>109.09mm</li> <li>6. Diámetro: 81mm</li> </ol>  |
| Resistencia |   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Área:5931.56mm<sup>2</sup><br/>Perímetro:62.83mm</li> </ol>   |

Realizado por: Coronel Selena, 2019



Una vez creada cada una de las piezas se procede a realizar el ensamblaje del equipo en un nuevo archivo, obteniendo así la modelación completa de la extrusora tipo husillo:

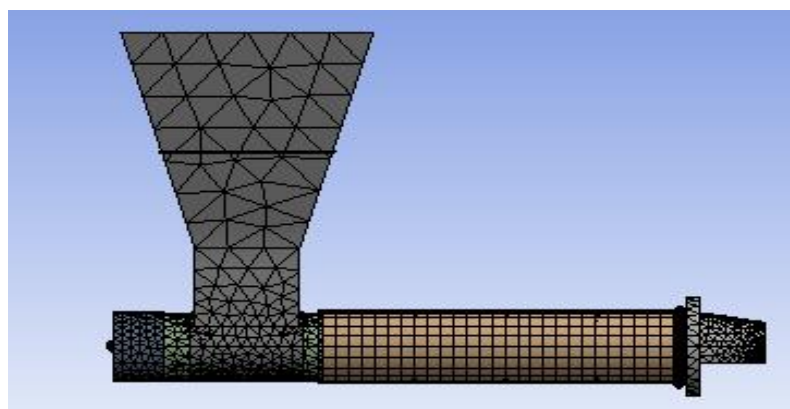


**Figura 2-3.** Modelación y Ensamblaje CAD-Extrusora tipo husillo

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

### 3.5.2. *Mallado*

Para la recreación del funcionamiento de la Extrusora tipo Husillo, se importa la geometría de la figura prediseñada en CAD hasta uno de los paquetes complementarios con los que trabaja ANSYS CFD, donde posteriormente en el mismo se crean capas, mallas y se fijan límites de entrada y salida de flujo. El tamaño de malla se fija por defecto o de forma manual esto considerando que a aun menor tamaño de malla se podrá realizar un análisis minucioso en cada punto, pero esto a su vez también dependerá del procesador en el que se esté desarrollando la simulación y los paquetes complementarios que posea la versión del Software CFD.



**Figura 3-3.** Capas, mallado y límites de flujo en Software CFD

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

### 3.5.3. Configuración

Uno de los parámetros importantes para el desarrollo de la simulación es el establecimiento las características del fluido con el que se va a trabajar, por lo que existe la posibilidad de utilizar un material que se encuentre dentro de la base de datos del mismo programa o se puede crear uno nuevo conociendo ciertas variables. En este caso el material con el que se trabaja es Polipropileno el cual se ingresará como nuevo fluido y tendrá las siguientes características:

| Property             | Value                    |
|----------------------|--------------------------|
| Name                 | CxHx-liquido             |
| Comments             | I-S                      |
| Density              | 889.02 kg/m <sup>3</sup> |
| Dynamic viscosity    | 4630 Pa*s                |
| Specific heat (Cp)   | 1925.92 J/(kg*K)         |
| Thermal conductivity | 0.22 W/(m*K)             |
| Cavitation effect    | <input type="checkbox"/> |
| Radiation properties | <input type="checkbox"/> |

**Figura 4-3.** Inputs Fluido

Fuente: Coronel Selena, 2019

Los parámetros de entrada (Inputs) se establecieron en base a recopilación bibliográfica en donde

- La densidad según Caicedo, et al. (2017), en el artículo científico “Propiedades termomecánicas del Polipropileno” considera un valor de 889.02 kg/m<sup>3</sup>.
- La viscosidad según Tripathi 2002, en el texto Practical Guide to Polypropylene establece que la viscosidad disminuye en base a dos factores los cuales son: la velocidad y el esfuerzo cortante aplicado. Por lo que se toma un valor de 4630 Pa.s, valor que se enmarca en base a los datos disponibles considerando las condiciones más extremas del flujo de Polipropileno fundido a través de un orificio estándar a 230°C y 2.16 kg de carga.
- El Cp seleccionado es de 1925.92 J/(kg.°K) según Ramos 1993, en el texto: Extrusión de plásticos, en el cual establece que el Cp se mantiene constante en el rango de temperatura a analizar en la simulación (175°C-185°C).
- La conductividad térmica a partir del libro de Propiedades y Características del Polipropileno Aplicadas establece un valor de 0.22 W/(m.°K) que al igual que la capacidad calorífica se mantiene constante en el rango de temperatura de análisis.

Además de las condiciones es necesario establecer parámetros para la simulación, tales como:

**Tabla 8-3:** Condiciones de Simulación

| <b>Variable</b>                     | <b>Valor para el Calentamiento</b> |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Tiempo de estabilización del equipo | 1h 56min                           |
| Número de Iteraciones               | 43 234                             |
| Temperatura Ambiente                | 20 °C                              |
| Temperatura Resistencias            | 500 °C                             |
| Temperaturas de Extrusión           | 175 °C                             |
| Presión Ambiental                   | 71705 Pa                           |
| Calidad de malla                    | 3                                  |
| Material                            | Acero Inox. AISI 302               |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

El tiempo de estabilización del equipo como el número de iteraciones son valores generados mediante el Software computacional al momento que se ejecuta la simulación, dichos datos son tomados al momento que el equipo alcanza las condiciones predeterminadas. Los valores de temperatura de 20 °C y la presión ambiental de 71705 Pa se establecen en concordancia a la localización del equipo. La temperatura de las resistencias es 500 °C valor máximo que alcanza dichos dispositivos y que posteriormente son seteados a 185 °C para el proceso de extrusión. La calidad de malla tiene de 1 a 5 niveles por defecto siendo el último una malla muy fina con un análisis casi preciso en cada punto del equipo, en este caso se trabajó con un número de malla 3 debido a que mediante repeticiones con un nivel superior existe un error al momento de la simulación. El material de construcción del equipo es Acero Inoxidable AISI 304 pero para la simulación se configura como AISI 302 ya que los dos tipos de acero poseen la misma composición con una variación insignificativa en las cantidades de formación.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 4.1. Propiedades Fisicoquímicas

La medición de las propiedades fisicoquímicas se realiza para determinar las principales características del material plástico y para estimar la pureza del Polipropileno. Las pruebas deben ser realizadas debido a que en el procesamiento de plásticos pueden existir alteraciones en su estructura y composición, las cuales pueden interferir en el proceso de extrusión. Dichas alteraciones pueden verse evidenciadas cuando se reprocesan plásticos. Basado en los análisis espectrofotométricos realizados por Montero 2015, en su artículo Pirólisis para el tratamiento de diferentes tipos de biomasa y polímeros se encontró que el Polipropileno reprocesado puede llegar a contener enlaces simples, dobles y aromáticos, incluso se puede encontrar una menor cantidad de insaturaciones en sus mezclas y aceites.

Dentro del análisis físico químico se determinó la densidad del Polipropileno teniendo un valor de 0.87g/ml, acorde con la norma INEN-ISO 1183-1 “Métodos para determinar la densidad de plásticos”, además de encontrar una estructura isotáctica dentro del análisis FTIR al poseer una banda de  $1465.63\text{ cm}^{-1}$  en donde los grupos metilos se encuentran situados de un mismo lado de la cadena. Además, la temperatura de fusión del Polipropileno varía en función del contenido del polímero siendo el valor estimado de  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el proceso de extrusión.

El plástico al poseer átomos de Carbono e Hidrogeno con similares electronegatividades corrobora su naturaleza apolar.

**Tabla 1-4:** Densidad del Polipropileno

| Muestra | Masa de PP (g) | Vo (ml) | VF(ml) | VDes(ml)        | Densidad(g/ml) |
|---------|----------------|---------|--------|-----------------|----------------|
| 1       | 1              | 7       | 8.12   | 1.12            | 0.89           |
| 2       | 1              | 7       | 8.17   | 1.17            | 0.85           |
| 3       | 1              | 7       | 8.15   | 1.15            | 0.86           |
|         |                |         |        | <b>Promedio</b> | 0.87           |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

Aplicando dicha norma se obtuvo como resultado 0.87 g/ml que se encuentra dentro del rango de (0.85-0.95) de Polipropileno según fuentes bibliográficas.

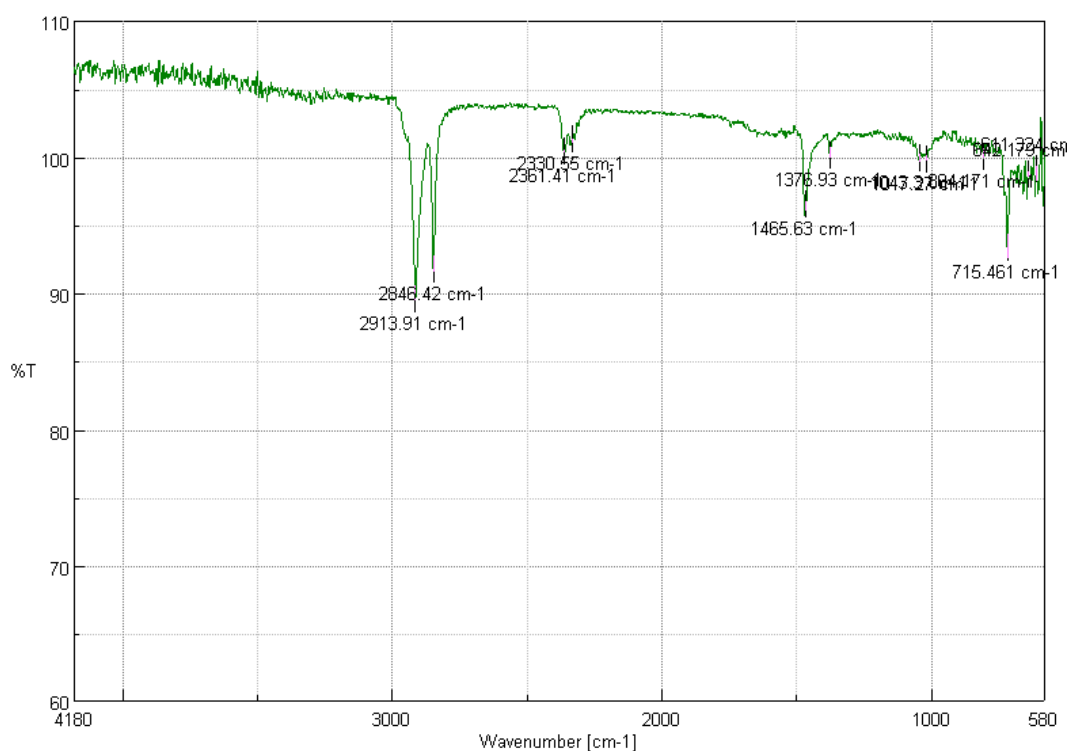
**Tabla 2-4:** Caracterización Físicoquímica de Polipropileno

| PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| -                           | Densidad 0.87 g/ml            |
| -                           | Reciclable                    |
| -                           | Estructura Isotáctica         |
| -                           | Punto de Fusión 175°C - 185°C |
| -                           | Naturaleza Apolar.            |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

#### 4.1.1. Caracterización de la Materia Prima

##### 4.1.1.1. Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo (FTIR)



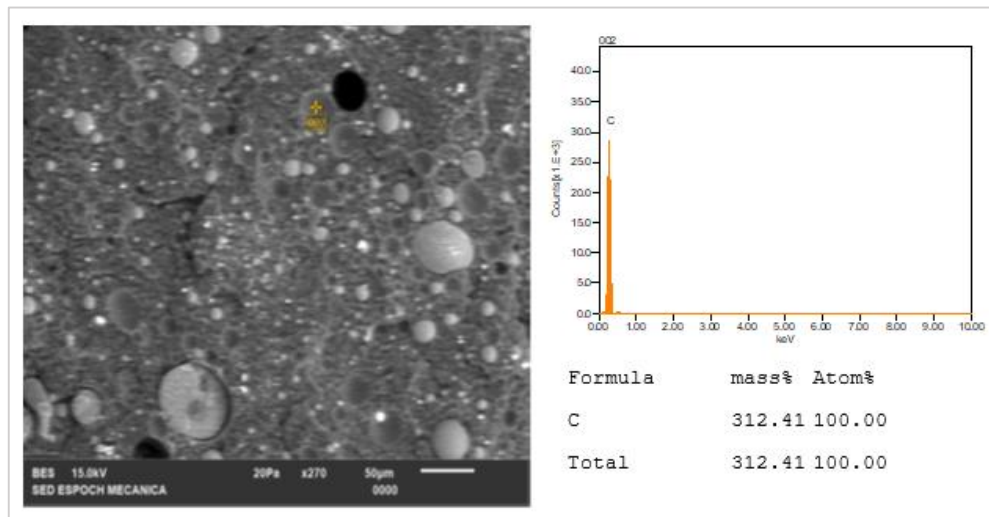
**Gráfico 1-4.** Espectroscopia de Transmisión de Infrarrojo Polipropileno

Fuente: Coronel Selena, 2019

El pico correspondiente a  $1465.63\text{ cm}^{-1}$  establece la presencia de una banda isotáctica que según Kotschkina & Grell 2014 para que exista dicha banda de isotacticidad de Polipropileno se debe encontrar entre los rangos establecidos de  $700$  y  $1500\text{ cm}^{-1}$  por lo que se verifica la presencia de este compuesto. Los primeros picos con longitudes de onda de  $2913.91$  y  $2846.42\text{ cm}^{-1}$

corresponden a un enlace C-H ya que se encuentra en un intervalo de frecuencia de 2800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$ . Pudiendo con este análisis verificar la presencia de los grupos funcionales correspondientes a Polipropileno.

#### 4.1.1.2. *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*



**Gráfico 2-4.** Microscopía electrónica de barrido de Polipropileno

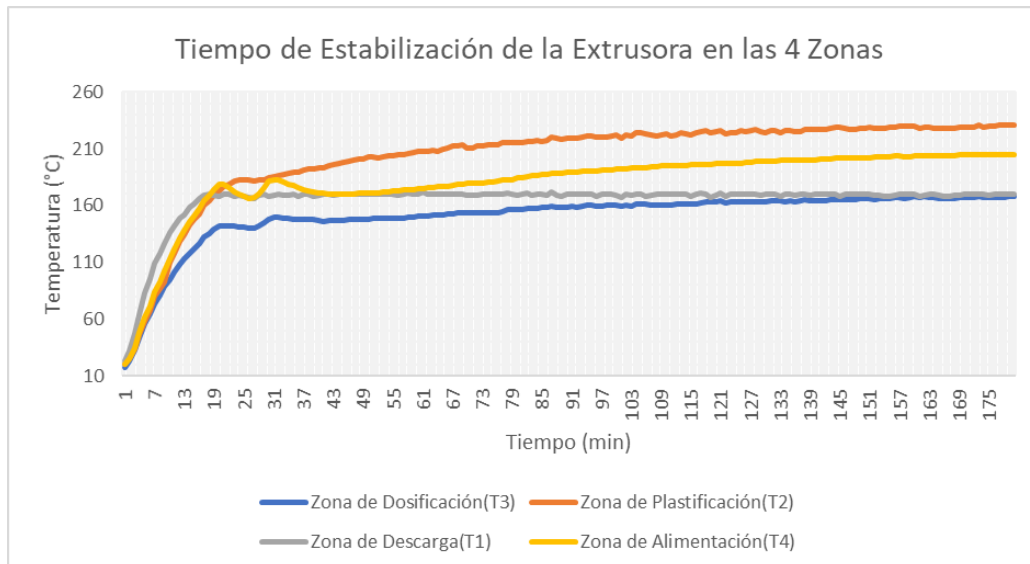
Fuente: Epoch-Mecánica

Este análisis permite observar y caracterizar materiales. La imagen presenta una estructura morfológica con superficie lisa homogénea del conglomerado. Para esta microscopía electrónica de barrido se utiliza un voltaje de 12 kV arrojando resultados de un 100% de átomos de Carbono, la cual corrobora la estructura propia del Polipropileno para el proceso de extrusión.

## 4.2. Condiciones de Operación de Extrusión

### 4.2.1. *Datos de estabilización reales del equipo*

Para la determinación de los perfiles de temperatura de estabilización se realizaron toma de datos en intervalos de 1 minuto durante, esto a fin de tener datos más precisos sobre las variaciones que ocurren y su tiempo de estabilización para cada una de las zonas que presenta.



**Gráfico 3-4.** Datos de temperatura de estabilización del Equipo

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

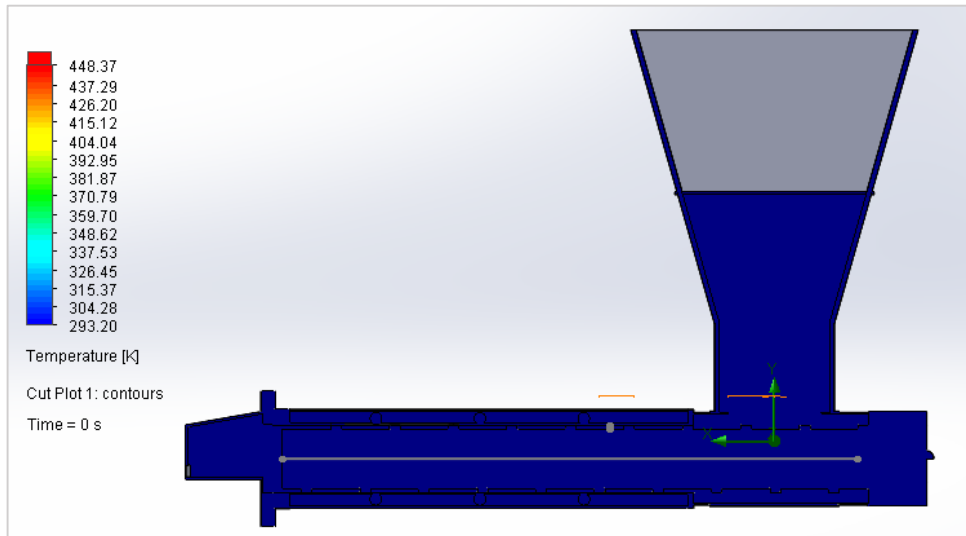
Si se analiza el gráfico 1-4 para datos de temperatura de estabilización del equipo se puede identificar que en el transcurso del tiempo se logra una estabilización en cada una de las termocuplas correspondientes a cada zona. Las únicas termocuplas cercanas al valor del setpoint establecido es la de dosificación y descarga, por el contrario, las termocuplas de alimentación y plastificación se encuentran por encima de la temperatura estimada. Analizando cada zona se tiene que cada una de ellas logra dicha estabilización a diferentes tiempos, tal es que para la zona de alimentación el tiempo de estabilización es de 133 minutos, para la zona de plastificación 128 minutos, para la zona de dosificación 118 minutos y finalmente para la zona de descarga 110 minutos. Estas variaciones presentes se deben a que el cilindro generalmente se divide en varias zonas de calentamiento con controles independientes en cada una de ellas, pudiendo así alcanzar un gradiente de temperatura a lo largo del todo el equipo o una concentración de calor en ciertas zonas de este. (Beltran & Marcilla 2012)

#### 4.2.2. Simulación CFD

##### 4.2.2.1. Datos de estabilización teóricos del equipo

Uno de los parámetros más importantes a considerar dentro del proceso es la temperatura, por lo cual se realizó un seguimiento de esta a diferentes tiempos. La figura 3-4 muestra una temperatura baja (condición inicial) antes de que inicie el proceso de precalentamiento del equipo, el cual

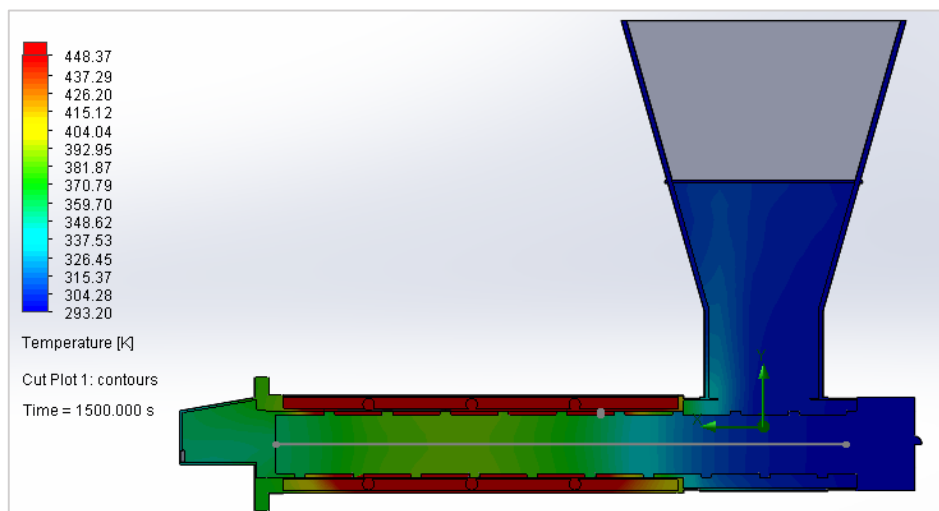
mediante resistencias instaladas posteriormente proporcionaran un incremento de calor en el transcurso del tiempo, bajo estas condiciones el único fluido analizado es el aire.



**Figura 1-4.** Condición inicial de temperatura

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

A  $T=0$  se puede observar que la temperatura en todas las secciones del equipo es prácticamente igual y corresponde a la temperatura ambiente  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



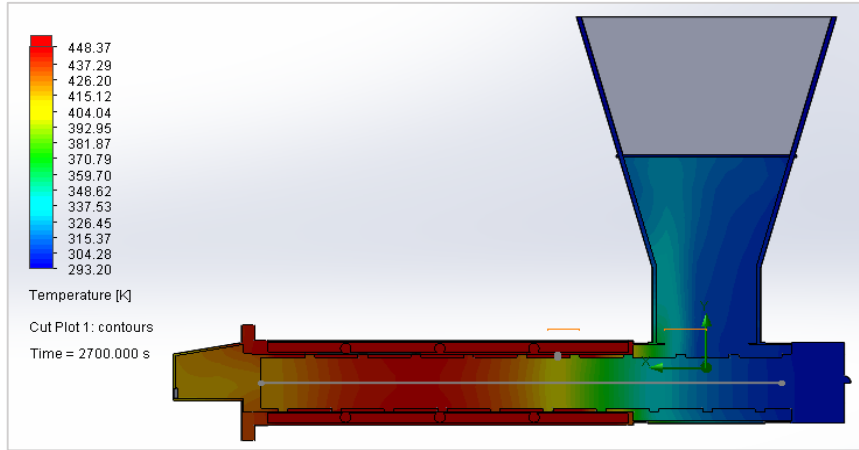
**Figura 2-4.** Pre calentamiento del equipo a 25min

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

La figura 4-4 se muestra el comportamiento del equipo a los 25min de encenderlo, como se puede observar los valores incrementan de forma paulatina en cada una de las cuatro zonas que conforma la extrusora tipo husillo. Se pueden distinguir 4 zonas de temperatura siendo la más baja la correspondiente a la tolva o alimentación la cual está a  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , seguida de la zona de plastificación



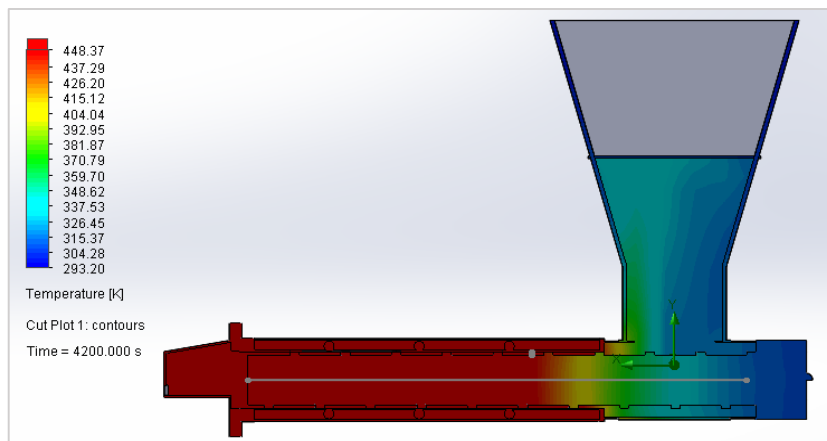
con una temperatura de 75.62 °C y la zona de dosificación con una temperatura de 108.72 °C. Por otro lado la zona de descarga tiene una pequeña disminución de temperatura teniendo un valor de 86.55 °C. Cabe mencionar que las temperaturas más altas se concentran en la camisa, las cuales alcanzan temperaturas de 175.22 °C



**Figura 3-4.** Pre calentamiento del equipo a 45min

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

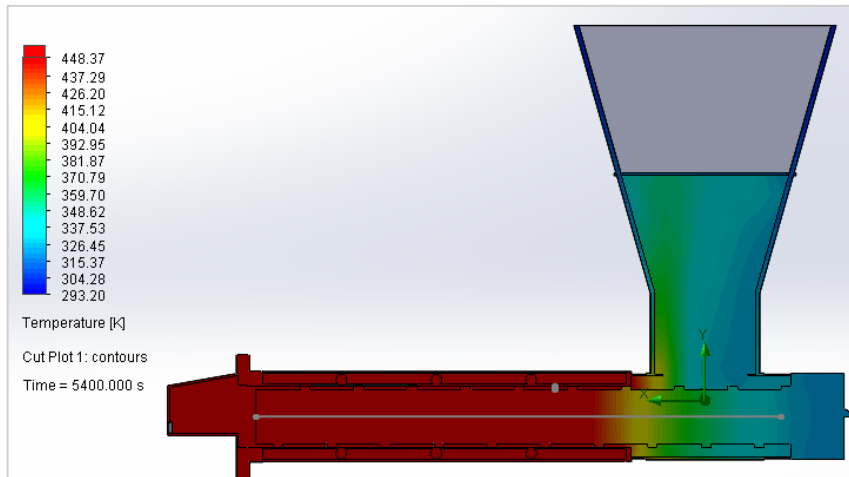
A medida que avanza el proceso de pre calentamiento se puede observar que la zona de alimentación tiende a mantenerse con variaciones mínimas alcanzando la temperatura de 57 °C. Se puede observar un aumento de temperatura en la zona de plastificación y dosificación de 124 °C y 153.2 °C respectivamente, pero en la zona de descarga se puede notar que la temperatura disminuye y se puede deber a que en la boquilla existe una liberación de calor por el orificio que presenta. El calor por acción de las resistencias se sigue concentrando en la camisa a 175.22 °C.



**Figura 4-4.** Pre calentamiento del equipo a 1h y 10min

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

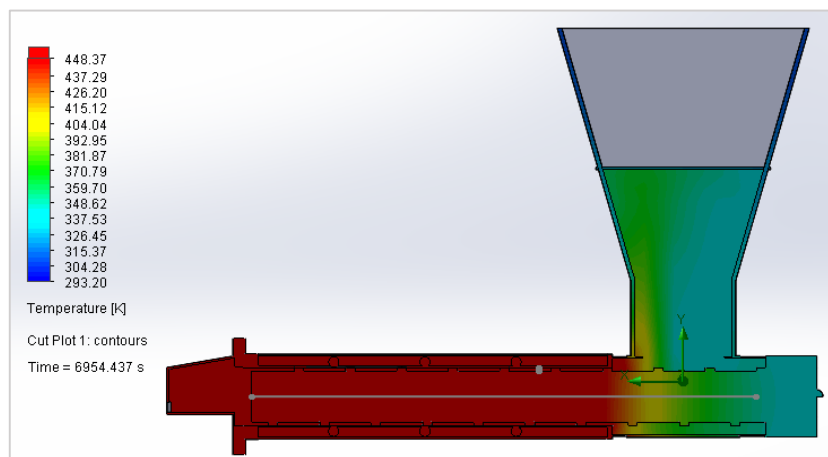
El cambio más evidente evidenciado a 1h y 10min es el comienzo de la equiparación de temperaturas entre la camisa la cual se encuentra cerca de los 175 °C y la zona de Dosificación y una parte de la zona de Plastificación los cuales se encuentran en valores cercanos al mismo.



**Figura 5-4.** Pre calentamiento del equipo a 1h y 30min

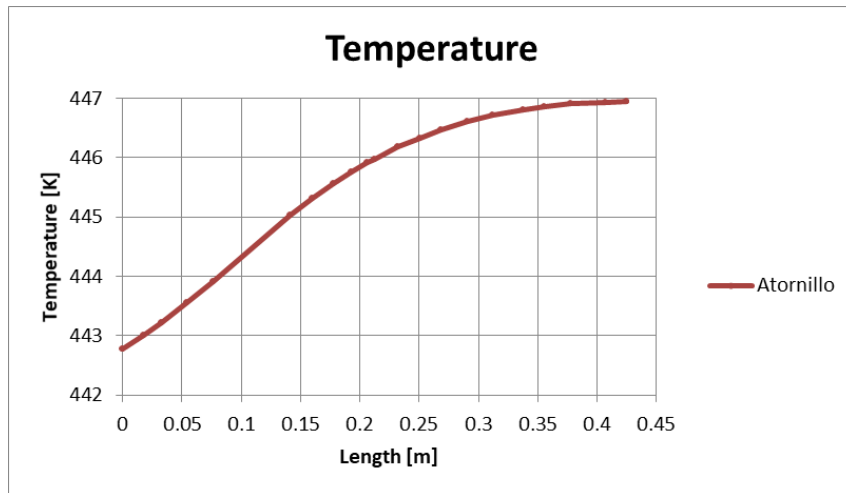
**Fuente:** Coronel Selena, 2019

Pasado 1h y 30min de pre calentamiento la temperatura de la zona de descarga, dosificación y una parte de la zona de plastificación han alcanzado temperaturas de 175.2 °C. La zona de alimentación sufre pequeñas variaciones de temperatura alcanzando un valor aproximado de 119 °C. Finalmente la camisa se encuentra en una equiparación más significativa con las zonas que poseen las temperaturas más altas.



**Figura 6-4.** Pre calentamiento del equipo a 1h 56min

**Fuente:** Coronel Selena, 2019



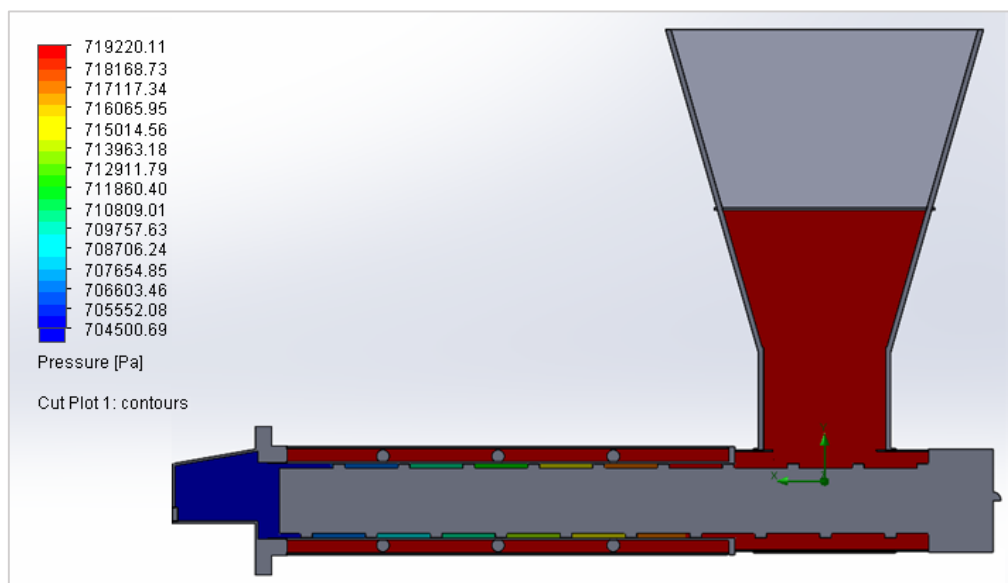
**Gráfico 4-4.** Datos de temperatura de estabilización del Equipo

Fuente: Coronel Selena, 2019

A 1h 56min de precalentamiento se puede observar que existe una estabilización en las temperaturas de las diferentes zonas, alcanzando valores cercanos y/o superiores a 175 °C. En base a esto se puede establecer que el tiempo ideal óptimo de precalentamiento es de 1h y 56min para el inicio del proceso.

#### 4.2.2.2. *Proceso de Extrusión*

##### 4.2.2.2.1. Presión teórica del Polipropileno

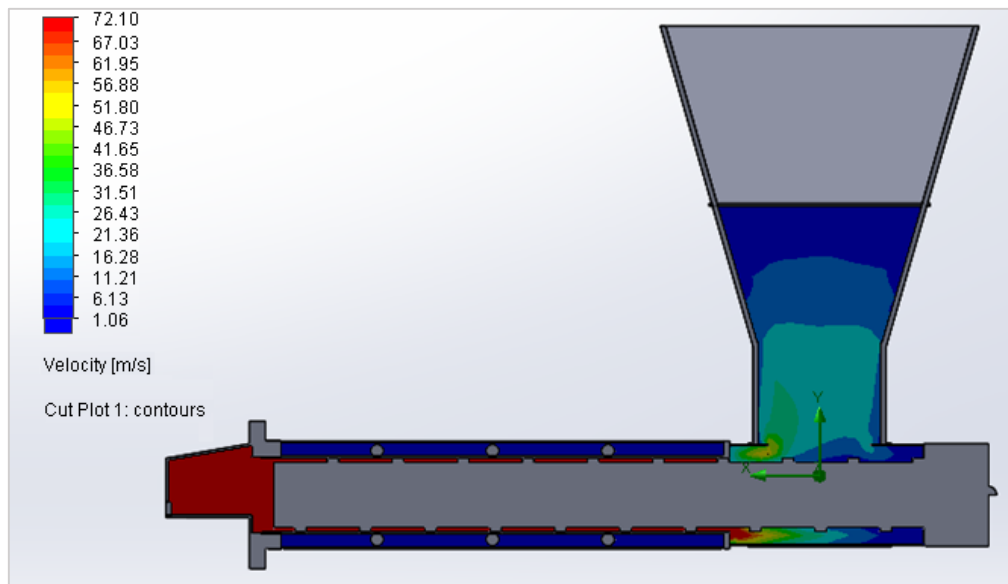


**Figura 7-4.** Presión teórica del Polipropileno

Fuente: Coronel Selena, 2019

Una de las limitantes de la simulación aplicada es que no permite el cambio de fase producido del polipropileno, es decir la simulación ya toma el material como si fuera un fluido. Uno de los parámetros requeridos para la simulación como se menciona es la viscosidad la cual entra como input, por lo que la gráfica de presión generada dependerá exclusivamente de la estructura, geometría y valor de rotación del tornillo en este caso 350 rpm. Esto se fundamenta a partir de Ramos 2012, en su texto Extrusión de Plásticos donde afirma que en la zona de Dosificación el Polímero llega alcanzar una adecuada consistencia. En el gráfico 9-4 se puede observar que la presión más alta se concentra en la zona de Alimentación y Plastificación. También se observa que la presión en el resto de las zonas disminuye en comparación a las zonas anteriormente descritas. Cabe mencionar que la velocidad del tornillo es decir la presión ejercida puede ser controlada según las necesidades.

#### 4.2.2.2. Velocidad teórica del Polipropileno



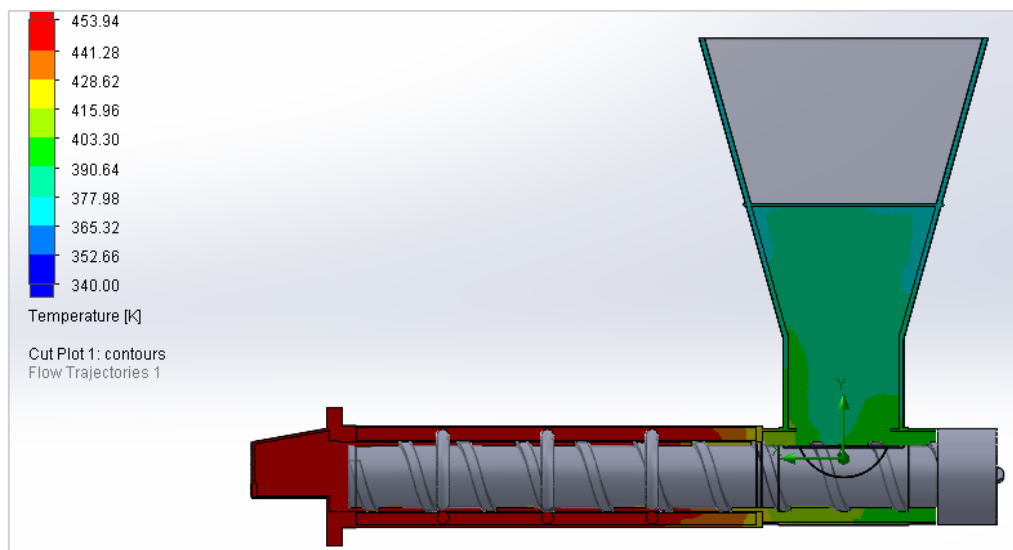
**Figura 8-4.** Velocidad teórica del Polipropileno

Fuente: Coronel Selena, 2019

La velocidad del fluido tiene sus valores más altos en las secciones que están más en contacto con el tornillo y tienden a disminuir a medida que estos se acercan a la pared. La gráfica muestra un aumento considerable de velocidad en estas secciones. Esto puede ser explicado al tratar a la extrusora como una tubería. Cuando se analiza un sistema de tubería ha quedado demostrado que para flujos laminares la velocidad tiende a disminuir cuando el fluido está cerca de las paredes que lo contienen mientras que tiende a aumentar hacia la sección central de la tubería, este efecto puede verse favorecido por el movimiento del tornillo. Se puede observar también un aumento de

velocidad en la boquilla de descarga esto debido a que incluso los fluidos viscosos deben cumplir con la ecuación de continuidad, la boquilla de dosificación puede ser considerada como una reducción, es decir existe una disminución en el área disponible para que el fluido fluya lo que conlleva un aumento en la velocidad. Según lo descrito por Beltrán & Marcilla 2012, en su texto Tecnología de Polímeros, establece que debido al movimiento del tornillo existirá un gradiente de velocidad dentro de la película fundida entre la superficie del cilindro y la capa sólida, además de que existirá un aumento en su velocidad al disminuir la profundidad del canal, es decir una pequeña profundidad impone una mayor velocidad sobre el fluido. El efecto contrario puede ser evidenciado en la tolva de alimentación en la que, al tener un área extremadamente grande en comparación a la boquilla, en cumplimiento en la ecuación de continuidad este debería ser el punto con la velocidad más baja, suposición que se ve reflejada en la simulación.

#### 4.2.2.3. Temperatura teórica del Polipropileno



**Figura 9-4.** Temperatura teórica del Polipropileno

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

El perfil de temperatura obtenido muestra que el fluido a medida que recorre las zonas de alimentación, plastificación, dosificación y descarga va aumentando paulatinamente su temperatura, siendo la temperatura más baja del fluido la registrada en la zona de alimentación con 397 °K, al avanzar a la zona de plastificación sufre un significativo aumento en la parte superior de la camisa por efecto de las pérdidas de conducción, las pérdidas de conducción se producen en los límites de dos sólidos que están en contacto, dado la forma en la que es alimentado el PP en el inicio de la zona de alimentación se puede considerar como un sólido que entra en conducción con las paredes en la camisa sin embargo, el momento que empieza el tornillo a extruir

favorece las pérdidas por convección. Estas pérdidas se generan cuando un fluido que fluye entra en contacto con una pared sólida, siendo en este caso la pared sólida la cara lateral de la camisa. Este fenómeno puede ser explicado a partir de las investigaciones realizadas por Beltrán & Marcilla 2012, en su trabajo Tecnología de Polímeros en donde establece que “Un aumento de la temperatura del cilindro implicará en principio un aumento del flujo de calor por conducción, y por tanto aumento de la velocidad de fusión, pero por otra parte al aumentar la temperatura disminuirá la viscosidad del material y, por tanto, la generación de calor por disipación viscosa, de modo que algunos polímeros cuya viscosidad es muy sensible a la temperatura podrían ver reducida la velocidad de fusión.”. Un aumento de temperatura favorece el flujo del fluido lo que deriva en una disminución de la presión y viceversa, lo cual se puede observar al momento de comparar las figuras correspondientes a la temperatura teórica del Polipropileno con la Presión teórica del Polipropileno en donde las zonas de mayor temperatura les corresponde las presiones más bajas como por ejemplo en el segmento de descarga.

#### **4.3. Obtención de perfiles de Temperatura, Presión y Velocidad con variación del flujo de Alimentación**

La variación del flujo de alimentación se realizó para tres variables a determinar: temperatura, presión y velocidad considerando 350rpm para el proceso de extrusión en la simulación. Los valores de ingreso al equipo se trataron como flujo másico así que se establecieron los siguientes valores:

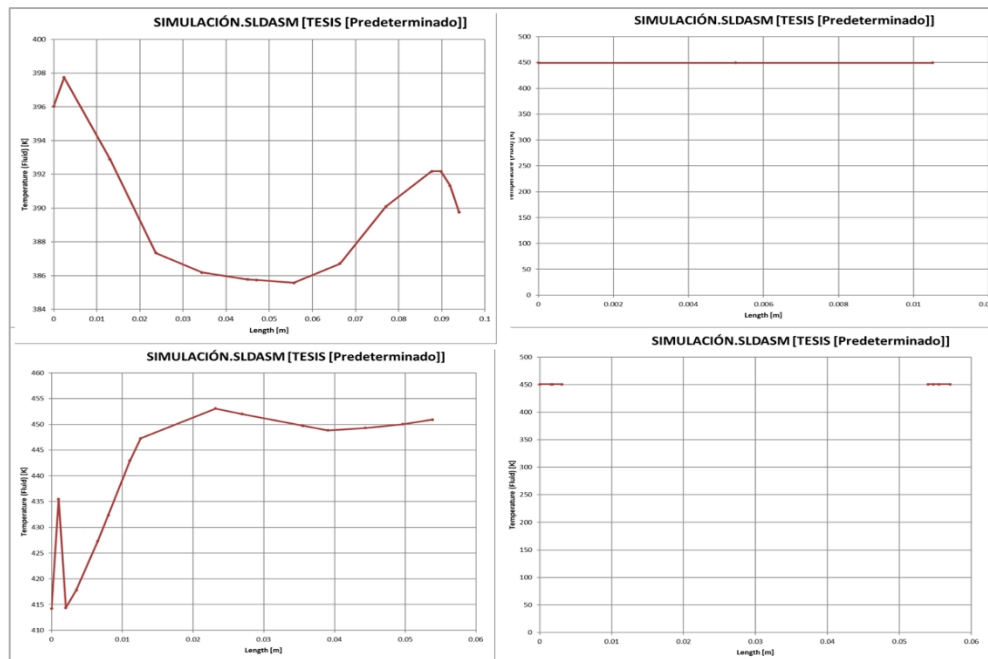
**Tabla 3-4:** Variación de Flujo de Alimentación

| <b>Alimentación (kg)</b> | <b>Flujo másico (kg/s)</b> |
|--------------------------|----------------------------|
| 1                        | 0.0055                     |
| 1.5                      | 0.00625                    |
| 2.5                      | 0.00694                    |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

Cada uno de los valores representa resultados dentro de un punto al azar en cada una de las zonas ya sea la zona de alimentación, plastificación, dosificación y descarga; obteniendo:

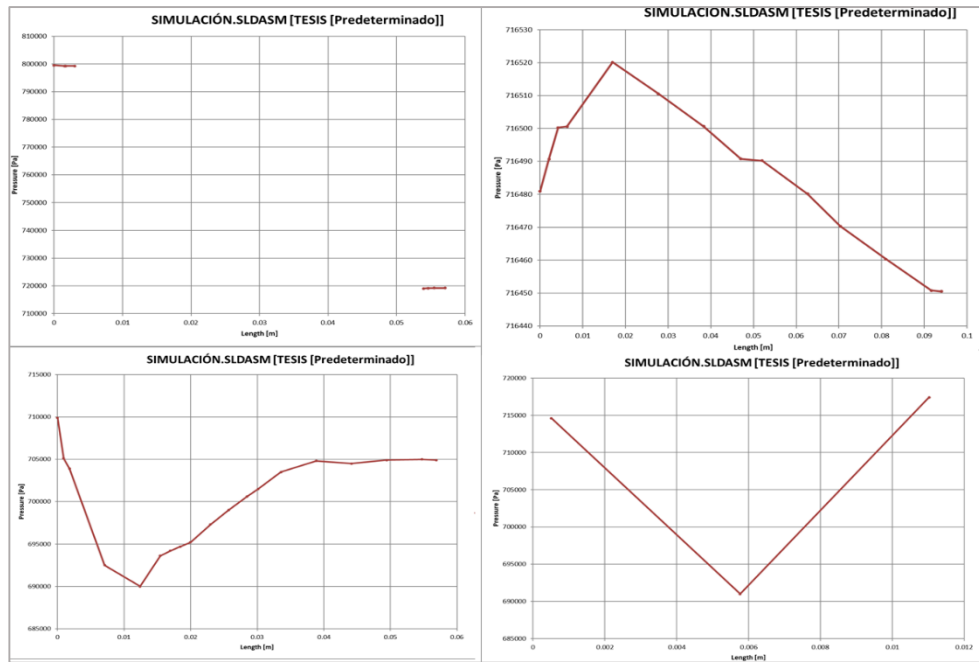
##### **4.3.1. Variación de Flujo de Alimentación a 1 kg**



**Gráfico 5-4.** Temperatura: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

Los valores de temperatura obtenidos en cada una de las gráficas anteriores corresponden a la extrusión del Polipropileno a 350 rpm con un flujo de alimentación de 1 kg a lo largo de las cuatro zonas. En el primer gráfico se observa una pequeña variación de temperatura que posee un valor relativamente bajo al setearlo para extrusión del material, esto debido a que la zona de alimentación en un inicio se encuentra en contacto ambiental por lo que existe una pérdida de calor. En el segundo gráfico correspondiente a la zona de plastificación existe una temperatura constante y se ve reflejado sin variaciones ya que el punto análisis fue tomado de forma cercana a las resistencias del equipo los mismos dispositivos que proporcionan calor al mismo. En el tercer gráfico correspondiente a la zona de dosificación se puede observar un valor de temperatura mayor respecto a las otras zonas, debido a que en este punto del equipo existe una concentración de calor por las resistencias, tomando en consideración que la variación que presenta se debe al movimiento de las partículas y al volumen utilizado. Finalmente, en el último gráfico se tiene un valor de temperatura menor a la zona anterior ya que corresponde a la boquilla y la misma ya se encuentra en contacto ambiental por ende su disminución. Todos estos valores de temperatura obtenidos se pueden corroborar según el documento de Guamán 2017, “Determinación de perfiles de temperatura para el proceso de extrusión de polipropileno virgen y Polipropileno reciclado” en donde afirma que la temperatura de extrusión de Polipropileno se encuentra en el rango de 180 a 250 °C, valores cercanos a los obtenidos de forma ideal mediante simulación.

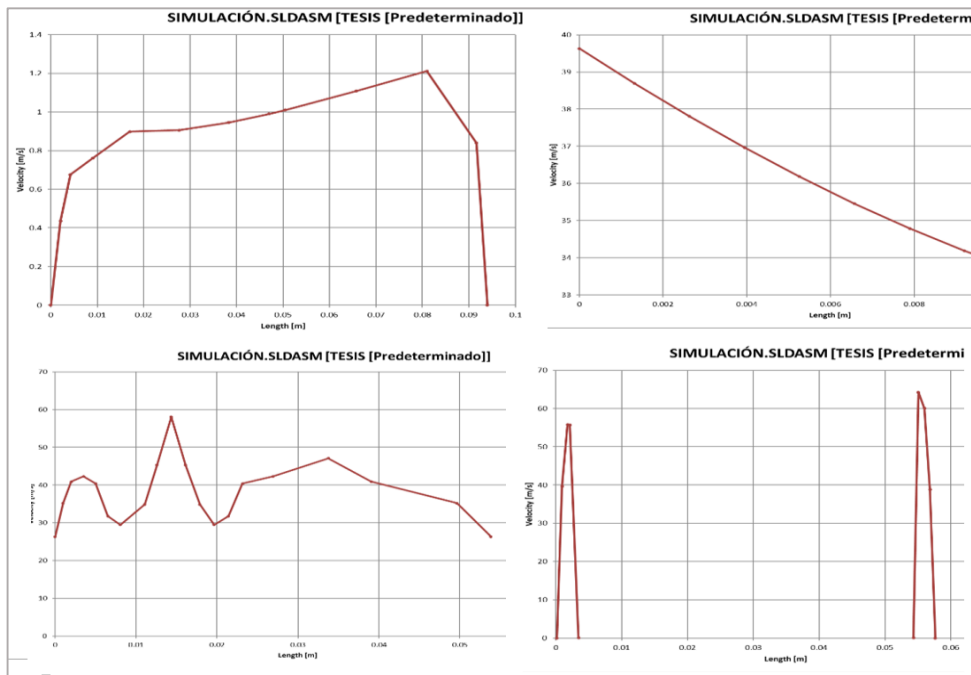


**Gráfico 6-4.** Presión: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

Las gráficas de presión generadas para la extrusión de Polipropileno a 350 rpm con 1 kg de carga nos muestran valores para las cuatro zonas de la extrusora tipo husillo. En el primer gráfico correspondiente a la zona de alimentación se tiene un valor de presión constante relativamente cercano a los otros valores de presión, tomando en consideración que al estar el Polipropileno en estado sólido el husillo necesitará un incremento de presión en esta sección al momento de introducir el material y generar su primera rotación para su extrusión. En el segundo gráfico correspondiente a la zona de plastificación existe una disminución de presión, esto ya que al aumentar la temperatura se necesita menos energía en el proceso y viceversa. En el tercer gráfico para la zona de dosificación de igual manera que la anterior zona la presión es menor debido a que como ya se mencionó en dicha zona existe una gran concentración de calor. Sin embargo, en el mismo gráfico también se puede apreciar que existe un incremento de presión al final esto se debe a que la sección de análisis se tomó casi en la parte final de la zona. Por último, en el gráfico correspondiente a la zona de descarga se puede ver evidenciado de forma más clara un incremento de presión ya que corresponde a la boquilla. Según el documento de Tubón 2014 menciona que, en cualquier operación de extrusión de un material, a medida que éste se va moviendo a lo largo del husillo, aumentan la temperatura y la presión. Si se compara los datos obtenidos con las fuentes bibliográficas existe una variación y la misma se debe a que la simulación posee ciertas limitantes entre ellas establece el flujo de fluidos como un proceso continuo y no considera la disminución en la profundidad del canal, factor que incrementa la presión a lo largo de la extrusora.





**Gráfico 7-4.** Velocidad: 4 Zonas de Extrusora tipo husillo

**Fuente:** Coronel Selena, 2019

En la figura 14-4 se muestra gráficas de velocidad para las cuatro zonas que conforman la extrusora tipo husillo. Como en la presión, la velocidad también se ve influenciada por las rpm utilizadas, teniendo así en el primer gráfico una velocidad con un valor mínimo, debido a que en la parte superior de la zona de alimentación no se observa movimiento del tornillo por ende su valor. En la zona de plastificación se tiene el primer valor a considerar de 39.62 m/s para la extrusión, además en la segunda grafica se puede observar que también existe una disminución de velocidad la cual se atribuye a que el rango análisis se toma cerca de las paredes que conforman la camisa del tornillo. En el tercer gráfico correspondiente a la zona de dosificación se tiene un valor más alto de velocidad ya que el polipropileno para este punto alcanza las características de líquido viscoso, las variaciones presentes como se mencionaba se deben al movimiento de las partículas del fluido. Finalmente, en la zona de descarga existe la mayor velocidad, debido a que la misma incrementa su valor al disminuir el área (zona de la boquilla). Según Beltrán & Marcilla 2012, en su investigación mencionan que para una velocidad de tornillo (rpm) constante, la longitud de fusión disminuye al aumentar la temperatura del cilindro por tanto aumenta la velocidad de fusión. Además, una zona de pequeña profundidad impone mayor velocidad sobre un fundido, corroborando los valores ideales obtenidos mediante simulación.

**Tabla 4-4:** Variación de Flujo de Alimentación a 1 kg

| <b>Zona de Alimentación</b>   |                     |                        |
|-------------------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 124.42                        | 719220              | 1.21                   |
| <b>Zona de Plastificación</b> |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 176.85                        | 716520              | 39.62                  |
| <b>Zona de Dosificación</b>   |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 179.91                        | 704500              | 47.06                  |
| <b>Zona de Descarga</b>       |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 176.85                        | 714600              | 55.73                  |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

Cómo se puede observar en la tabla 4.4 las temperaturas para las cuatro zonas con una alimentación de 1 kg no varían significativamente, esto debido a que el análisis se lo realiza cuando el equipo se encuentra precalentado y estabilizado, es decir existe ya una concentración de calor por lo que la temperatura no influye significativamente con el flujo de alimentación que se trabaja. Con lo que respecta a la presión se tiene que los valores donde se ejerce mayor presión son en las zonas de alimentación y plastificación, esto debido a que son etapas en las cuales se necesita una mayor energía para que fluya el fluido debido a la viscosidad que presenta el material. Los valores más altos para la velocidad se encuentran en la zona de plastificación y dosificación, teniendo en consideración que a una menor área se obtendrá valores más altos de velocidad y a medida que se acerquen a las paredes como es en la zona de alimentación se tendrá valores menores.

#### 4.3.2. Variación de Flujo de Alimentación a 1.5 Kg

**Tabla 5-4:** Variación de Flujo de Alimentación a 1.5 Kg

| <b>Zona de Alimentación</b>   |                     |                        |
|-------------------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 124.59                        | 716800              | 1.37                   |
| <b>Zona de Plastificación</b> |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 176.85                        | 716540              | 48.57                  |
| <b>Zona de Dosificación</b>   |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 177.41                        | 715100              | 66.57                  |
| <b>Zona de Descarga</b>       |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 176.85                        | 716660              | 72.34                  |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

En la tabla 5-4 basando en los principios similares ya explicados en la tabla 4-4 con respecto a las temperaturas, existe una pequeña variación, teniendo así la temperatura más baja de 124.59 °C en la zona de alimentación y la temperatura más alta en la zona de dosificación de 177.41 °C. De la misma forma para el análisis de la presión se obtuvo un mayor valor en la zona de plastificación, seguido de la zona de dosificación, zona de descarga y finalmente zona de alimentación.

Si se compara los valores de estas presiones con los del apartado anterior se puede notar que al aumentar el flujo de alimentación se necesita un aumento de presión en la zona de plastificación, por el contrario, con lo que respecta a la velocidad en referencia al primer análisis considerando un flujo de 1.5 kg se puede notar que existe un incremento en la velocidad teniendo la más baja de 1.21 m/s y la más alta de 55.73 m/s.

#### **4.3.3. Variación de Flujo de Alimentación a 2.5 kg**

**Tabla 6-4:** Variación de Flujo de Alimentación a 2.5 kg

| <b>Zona de Alimentación</b>   |                     |                        |
|-------------------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 124.71                        | 717860              | 1.28                   |
| <b>Zona de Plastificación</b> |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 178.19                        | 717490              | 56.19                  |
| <b>Zona de Dosificación</b>   |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 181.06                        | 717320              | 64.90                  |
| <b>Zona de Descarga</b>       |                     |                        |
| <b>Temperatura (°C)</b>       | <b>Presión (Pa)</b> | <b>Velocidad (m/s)</b> |
| 175.32                        | 717600              | 70.51                  |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

En la tabla 6-4 se obtienen valores para los 2.5 kg, en el mismo se puede evidenciar que al aumentar el flujo de alimentación los valores de presión en cada una de las zonas aumentan sus valores pero no de manera considerable, esto se debe principalmente a la cantidad del material con el que se está desarrollando el proceso. Con lo que respecta a la velocidad en la zona de plastificación y dosificación se siguen manteniendo valores mayores con respecto a las otras dos zonas. Finalmente, las temperaturas no varían casi en las tres repeticiones realizadas. Por tanto, se puede decir que el flujo de alimentación con el que se trabaja si influye con respecto a las variables de análisis, pero no de manera significativa como se muestran en los datos tabulados.

## CAPÍTULO V

### 5. REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

#### 5.1. Análisis Costo-Beneficio del Proyecto

##### 5.1.1. Presupuesto

Para el presente proyecto se requiere realizar un análisis económico de la inversión requerida para el modelado y simulación de la extrusora tipo husillo en ANSYS CFD, con la finalidad de declarar su factibilidad.

**Tabla 1-5:** Análisis Costo-Beneficio-Presupuesto

| PRESUPUESTO          |       |                          |         |
|----------------------|-------|--------------------------|---------|
| ACTIVIDAD            | MONTO | FUENTE DE FINANCIAMIENTO |         |
|                      |       | INTERNA                  | EXTERNA |
| Curso ANSYS CFD      | \$250 | X                        |         |
| Polipropileno        | \$30  | X                        |         |
| Copias e Impresiones | \$30  | X                        |         |
| Empastados           | \$50  | X                        |         |
| Imprevistos          | \$40  | X                        |         |
| TOTAL                | \$400 |                          |         |

Realizado por: Coronel Selena, 2019

#### 5.2. Cronograma de ejecución del Proyecto

| TIEMPO<br><br><br><br>ACTIVIDADES      | TIEMPO  |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---------|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 1       |   |   |   | 2   |   |   |   | 3   |   |   |   | 4   |   |   |   | 5   |   |   |   | 6   |   |   |   |   |   |   |   |
|  | MES     |   |   |   | MES |   |   |   | MES |   |   |   | MES |   |   |   | MES |   |   |   | MES |   |   |   |   |   |   |   |
|  | SEMANAS |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
|  | 1       | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 | 1   | 2 | 3 | 4 |   |   |   |   |
| Revisión bibliográfica                 | ■       | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Elaboración del anteproyecto           | ■       | ■ |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Modelado extrusora (AutoCAD)           |         |   | ■ | ■ |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Determinación de variables de proceso  |         |   |   |   | ■   | ■ |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Caracterización de materia prima       |         |   |   |   |     |   | ■ | ■ |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Importación de modelo a Software ANSYS |         |   |   |   |     |   |   |   | ■   | ■ |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Generación de modelos                  |         |   |   |   |     |   |   |   |     | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Obtención de parámetros termodinámicos |         |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   | ■   | ■ | ■ | ■ |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Validación de Simulaciones generadas   |         |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   | ■   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Revisión del documento final.          | ■       | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Defensa de los resultados              |         |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |     |   |   |   |   |   |   | ■ |

**Gráfico 1-5.** Cronograma de ejecución del proyecto

Fuente: Coronel Selena, 2019

## CONCLUSIONES

- Se modeló la extrusora tipo husillo mediante el Software Ansys CFD Simulation tomando dimensiones del equipo que generó una geometría en la cual se simuló el comportamiento de polipropileno a lo largo del proceso de extrusión, considerando todas las variables de proceso (inputs y outputs).
- Se caracterizó las propiedades fisicoquímicas a fin de determinar las principales características del Polipropileno estimando la pureza del mismo, ya que al ser sometido a reprocesamiento puede presentar alteraciones en su estructura. Según pruebas realizadas se obtuvo una densidad de  $0.87 \text{ g/cm}^3$ , una estructura isotáctica debido a la presencia de una banda de  $1465.63 \text{ cm}^{-1}$  y una presencia de 100% de átomos de carbono según el análisis SEM.
- Se modeló la extrusora tipo husillo mediante un Software computacional compuesto de paquetes incluyentes al mismo es decir archivos CAD y CFD, los mismos ayudaron al diseño y a la simulación respectivamente. El primer paquete mediante modelación 3D recreó el diseño del equipo con medidas reales, y el segundo ayudó a configurar las condiciones para el posterior análisis generando graficas de presión, velocidad y temperatura y un tiempo de estabilización estimado.
- Se estableció que mediante los datos obtenidos por la simulación las condiciones de operación, para el tiempo de estabilización es 1 h y 56 min con una temperatura de extrusión de  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  considerando unas resistencias que alcanzan un valor máximo de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además, las rpm estipuladas fueron 350 tanto para la simulación como para los datos teóricos conseguidos del equipo.
- Para flujos de alimentación de 1 kg, 1.5 kg y 2.5 kg se obtuvieron valores de presión que se encuentra dentro de los rangos de 36100.03 Pa a 71652.46 Pa, temperaturas de  $124 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $181 \text{ }^\circ\text{C}$  y velocidad de 1.21 m/s a 72.34 m/s considerados desde la zona de alimentación hasta la zona de descarga. Con los resultados obtenidos se pudo evidenciar que cuando el flujo del PP aumenta las variaciones que presenta en cada una de las variables de análisis no varían de manera significativa, pero si se debiesen considerar si se desea tener un análisis más minucioso.

## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda que el equipo tenga un precalentamiento para que el proceso de extrusión se desarrolle de manera efectiva, es decir hasta que el panel de control muestre una estabilización en sus temperaturas con las que se desee trabajar.
- Verificar que las medidas de la extrusora tipo husillo sean las mismas con las que se diseñe en el Software Computacional.
- Se recomienda que la geometría de la extrusora sea diseñada en los planos adecuados, para que al momento de la revisión de las figuras se pueda efectuar los cortes de alzado para las diferentes vistas del equipo.
- Para la simulación del proceso del precalentamiento se recomienda utilizar como fluido aire atmosférico para que los resultados obtenidos sean más exactos.



## BIBLIOGRAFÍA

**ARTEAGA, Ana.; & RAYMONDE, Nicole.** “Propiedades reológicas del polipropileno en flujos elongacionales y de cizallamiento”. *Scientia et Technica*, vol. 36, (2007), (Colombia), pp. 397-400.

**BELTRAN CÁCERES, Marta.; & MARCILLA GUERRERO, Ana.** *Tecnología de Polímero*. 1<sup>ra</sup> ed. Madrid-España: Reverté, 2012, pp. 79-83.

**CAICEDO, C; et al.** “Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento”. Scielo [en línea], 2017, (México) 18(3), pp. 247-251. [Consulta: 20 Diciembre 2019]. ISSN 1405-7743. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000300245](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300245).

**CEDILLO SARMIENTO, José Andres, & MARÍN LAZO, Juan Pablo.** Estudio experimental y computacional mediante cfd ansys del flujo de aire a través de techo de edificaciones usando un tunel de viento (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. 2015. pp. 21-25.

**DURÁN VINUEZA, Luis Felipe.** Análisis y desarrollo de la simulación termo-hidráulica de flujo multifase en CFD con ANSYS fluent (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Politécnica De Madrid, Madrid – España. 2017. pp. 44-48.

**GUAMÁN CONDOR, María Gillermina.** Determinacion de perfiles de temperatura para el proceso de extrusion de polipropileno virgen y polipropileno reciclado (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba – Ecuador. 2017. pp. 12-16.

**KOTSCHKINA, Alan J.; & GRELL, Martha D.** “Determination of the Isotacticity of Polypropylene by Infrared Spectroscopy”. Wiley Online Library, vol. 16, n° 7 (2014), (Estados Unidos) pp. 5-9.

**LÓPEZ SÁNCHEZ, Carlos.** *Estudio de la fluencia térmica de PET reciclado utilizando el proceso de termoformado* [blog]. [Consulta: 15 Noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/262914575\\_Estudio\\_de\\_la\\_fluencia\\_termica\\_de\\_PET\\_reciclado\\_utilizando\\_el\\_proceso\\_de\\_termoformado](https://www.researchgate.net/publication/262914575_Estudio_de_la_fluencia_termica_de_PET_reciclado_utilizando_el_proceso_de_termoformado)

**MONTERO, Gabriel.** “Pirólisis para el tratamiento de diferentes tipos de Biomasa y Polimeros”. *Investiga.TEC*, vol. 14, (2015), (Costa Rica), pp. 18-20.

**NONATO, Renato C.; & BONSE, Baltus C.** “A study of PP / PET composites : Factorial design, mechanical and thermal properties”. *ScienceDirect*, n°56 (2016), (Ecuador) pp. 167-173

**NTE INEN-ISO 1183-1.** “*Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos*”.

**RAMOS VALLE, Luis.** *Extrusion de plasticos : Principios básicos.* 2<sup>da</sup> ed. México DF–México: Limusa, 2012, pp. 128-130.

**SEYMOUR, Raimond.; & CARRAHER, Charles.** *Introducción a la química de los polímeros.* 3<sup>ra</sup> ed. Florida-Estados Unidos: Reverté, 1995, pp. 75-77.

**TORRES JARA, Paul.; & LEONIDIYNA NAIDIUK, Olena.** *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys.* 1<sup>ra</sup> ed. Quito-Ecuador: Abya-Yala, 2018, pp. 47-56.

**TRIPATHI, Devesh.** *Practical Guide to Polypropylene.* 1<sup>ra</sup> ed. Kiv-Ucrania: Rapra, 2002, pp. 9-16.

**TUBÓN VÉLEZ, Edwin Orlando, & CARILLO SINCHE, Byron Fabricio.** *Diseño y construcción de un extrusor de tornillo para la obtención de pellets* (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba – Ecuador. 2014. pp. 31-43.