



# ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN ÓLEO PIROLÍTICO

Maestria en Engenharia Mecânica – Produção Industrial

MICHAEL OSWALDO CASTRO PARDO

Leiria, septiembre de 2023



# ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN ÓLEO PIROLÍTICO

Maestria en Engenharia Mecânica – Produção Industrial

MICHAEL OSWALDO CASTRO PARDO

Disertación realizada sobre la orientación del Profesor Doctor Nelson Simões  
Oliveira y de la Profesora Master Maria Lizete Lopes Heleno.

Leiria, septiembre de 2023

# **Originalidad y Derechos de Autor**

La presente tesis es original, realizada especialmente para este propósito, ya que se mencionan todos los autores que ayudaron con sus estudios y libros para la elaboración de la presente.

Se autorizarán reproducciones parciales de este documento siempre que se mencione al Autor y se haga referencia al ciclo de estudios en el que se llevó a cabo, a saber, Curso de Maestría en Ingeniería Mecánica, en el año académico 2022/2023, de la Escuela de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, y, también, en el momento de las pruebas públicas destinadas a la evaluación de estos trabajos.

# **Pensamiento**

“Ningún mar en calma hizo experto a un marinero”

**Libreta Inspiradora de Gallardo Laureano**

# Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios por motivar todas mis acciones en mi vida diaria; agradeciendo a mis padres por guiarme en todo lo que hago hoy, mañana y siempre; agradeciendo a mi familia por inspirarme a perseguir mis metas, agradeciendo a mis mentores por darme la conocimiento para lograr cualquier objetivo que tenga en mente.

MICHAEL

# Agradecimientos

Primeramente, le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera profesional, por ser mi fortaleza y acompañarme en los momentos de debilidad, por brindarme una vida llena de aprendizajes y junto con ella haber tenido experiencias y sobre todo felicidad en cada una de las cosas realizadas.

Doy gracias a mis padres, Irma y Marco, por apoyarme en todo momento y estar junto a mí a pesar de todo, por los valores que me han inculcado desde niño, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser ejemplo de vida a seguir.

# Resumen

La pirólisis de plásticos es un proceso termoquímico que implica la descomposición térmica de los plásticos en ausencia de oxígeno. Durante la pirólisis, los polímeros se descomponen en monómeros, oligómeros, gases y sólidos carbonosos. La pirólisis de plásticos es una técnica prometedora para la gestión de residuos plásticos, ya que permite la conversión de residuos plásticos en productos valiosos, como combustibles.

Mediante el presente trabajo se llegó a comprender los métodos y procesos que anteceden y ayudan a la realización de una pirólisis, los mismos que ayudan a obtener un sistema con una mayor fiabilidad y desempeño, durante el proceso de transformación de plásticos en oleo pirolítico, mediante la unión de diferentes procesos térmicos y mecánicos se consiguió diseñar y mejorar la forma convencional de realizarlo.

En cuanto al diseño y estudio del proceso de transformación de plásticos se optó por usar como alimentador un sistema de tornillo sinfín el mismo que se encontrará conectado a un sistema de calentamiento por medio de inducción de tipo abrazaderas, en este sistema se prevé realizar un precalentamiento del material que va a ingresar al reactor para realizar el proceso de la pirólisis. El proceso de precalentamiento fue diseñado con una tolva para el depósito de los plásticos y un tornillo sinfín usado para el transporte de este.

Con referencia al tipo de reactor se optó por uno de tipo batch el cual contiene varias de las características deseadas, es por lo que fue elegido para conseguir realizar el estudio y diseño en base a este. Este tipo de reactor se caracteriza por tener un depósito cubierto por una chaqueta calefactora y en la mayoría de los casos por poseer un dispositivo de agitación.

Para la activación de este proceso se tiene que conseguir atngir temperaturas entre los 300 y 600 °C, logrando así el proceso de descomposición del material plástico y posteriormente convertirlo en gas. Para fines de investigación se eligieron estudiar las zeolitas de tipo HZSM-5 ya que debido a su alta cristalinidad, área superficial y selectividad son muy activos en procesos catalíticos.

Con la unión de estos procesos se puede mejorar los tiempos de descomposición de los plásticos ya que al salir del proceso de precalentamiento entra al reactor el cual consta de calentadores que funcionan por medio de inducción, una vez el material ingresado en el reactor el sistema se cierra herméticamente y este comienza el proceso de pirólisis. Los gases

generados con el aumento de temperatura producen aproximadamente 0.190 kg/s, estos gases son transportados por una tubería hasta llegar a los condensadores los mismos que van a transformar el gas en líquido por las diferencias de temperaturas, el condensador será de tipo espiral y estarán ubicados de forma vertical y horizontal constando cada uno de ellos con una superficie total de 2.5 m<sup>2</sup> para realizar la condensación de gases.

Este proceso es reproducido hasta llegar a tener un compuesto más leve, los gases no aprovechados salen por un conducto y son quemados en la salida del proceso.

**Palabras-clave:** Pirólisis, Plásticos, Condensador, Reactor, Catalizador.

# Abstract

Plastic pyrolysis is a thermochemical process that involves the thermal decomposition of plastics in the absence of oxygen. During pyrolysis, polymers are broken down into monomers, oligomers, gases and carbonaceous solids. Plastic pyrolysis is a promising technique for plastic waste management, as it enables the conversion of plastic waste into valuable products, such as fuels.

Through the present work came to understand the methods and processes that precede and help the realization of a pyrolysis, the same ones that help to obtain a system with greater reliability and performed, during the process of transformation of plastics into pyrolytic oil, through the union of different thermal and mechanical processes it was possible to design and improve the conventional way of doing it.

Regarding the design and study of the plastic transformation process, it was decided to use as a feeder a worm screw system that will be connected to a heating system by means of induction of clamp type, in this system it is planned to preheat the material that will enter the reactor to perform the pyrolysis process. The preheating process was designed with a hopper for the deposit of plastics and an auger screw used for transporting it.

With reference to the type of reactor, we opted for a batch type which contains several of the desired characteristics, which is why it was chosen to carry out the study and design based on this. This type of reactor is characterized by having a tank covered by a heating jacket and in most cases by having an agitation device.

For the activation of this process, temperatures between 300 and 600 ° C must be achieved, thus achieving the process of decomposition of the plastic material, and subsequently converting it into gas. For research purposes we chose to study HZSM-5 type zeolites because due to their high crystallinity, surface area and selectivity they are very active in catalytic processes.

With the union of these processes can improve the decomposition times of plastics since when leaving the preheating process enters the reactor which consists of heaters that work by means of induction, once the material entered the reactor the system closes hermetically, and this begins the pyrolysis process. The gases generated with the increase in temperature produce approximately 0.190 kg / s, these gases are transported by a pipe until

they reach the condensers that will transform the gas into liquid due to temperature differences, the condenser will be spiral type and will be located vertically and horizontally consisting each of them with a total surface of to perform the condensation of gases.  $2.5 m^2$

This process is reproduced until it has a milder compound, the unused gases leave through a duct and are burned at the exit of the process.

**Key words:** Pyrolysis, Plastics, Condenser, Reactor, Catalyst.

# Índice

<b>Originalidad y Derechos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Pensamiento.....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>vi</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de siglas y Acrónimos.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Objetivo General .....	2
1.1.2. Objetivos específicos .....	2
1.1.3. Alcance.....	3
<b>2. Plásticos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Tipos de Plásticos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Tipos de Plásticos Reciclables.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. Clasificación de los Plásticos.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Pirólisis .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Tipo de Pirólisis .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2. Parámetros que influyen en el Proceso de Pirólisis .....</b>	<b>11</b>
3.2.1. Efecto de la Temperatura en la Pirólisis .....	12
3.2.2. Efecto de la Tasa de Calentamiento .....	14

3.2.3.	Influencia del Tiempo de Residencia.....	15
3.2.4.	Cantidad de Muestra y Tamaño de Partícula .....	15
3.2.5.	Densidad y Humedad de la Muestra .....	15
3.2.6.	Tipo de Contacto Material – Catalizador .....	16
3.2.7.	Presión de Funcionamiento .....	16
3.2.8.	Efecto Condensador .....	17
<b>3.3.</b>	<b>Alimentador .....</b>	<b>17</b>
3.3.1.	Técnicas de Extrusión .....	17
3.3.2.	Tipos de Extrusoras.....	18
<b>3.4.</b>	<b>Reactores .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5.</b>	<b>Según el método de Operación .....</b>	<b>20</b>
3.5.1.	Reactor Batch.....	20
3.5.2.	Reactor Semi-Batch .....	20
3.5.3.	Reactores Continuos .....	21
<b>3.6.</b>	<b>Según Disposición del Catalizador.....</b>	<b>23</b>
3.6.1.	Reactor de Lecho Fijo .....	23
3.6.2.	Reactor de Lecho Fluidizado .....	24
<b>3.7.</b>	<b>Catalizadores.....</b>	<b>25</b>
3.7.1.	Catálisis Homogénea y Heterogénea .....	25
3.7.2.	Tipos de Catalizadores .....	26
3.7.2.1.	Zeolitas.....	27
3.7.2.2.	Zeolitas HZSM-5 .....	30
3.7.2.3.	Zeolitas HUSY (HY) .....	31
<b>3.8.</b>	<b>Inhibidores y Retardadores de Polimerización.....</b>	<b>33</b>
<b>3.9.</b>	<b>Resistencias y Tipos Calentamiento para Pirólisis.....</b>	<b>36</b>

3.9.1. Transferencia de Calor en Procesos Químicos .....	36
3.9.2. Calderas de Fluido Térmico.....	37
3.9.3. Calentamiento por Inducción .....	38
<b>3.10. Sistema de Desgasificación.....</b>	<b>39</b>
<b>4. Desenvolvimiento del Reactor de Pirólisis de plásticos.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Consideraciones Generales .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Diseño de la Tolva Para la Entrada del Plástico.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3. Cilindro y Base del Husillo .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4. Calculo y Diseño de un Tornillo Sinfín (Husillo).....</b>	<b>44</b>
4.4.1. Intervalos de Velocidad de Cortadura.....	49
4.4.2. Viscosidad Efectiva.....	50
4.4.3. Relación de Longitud del husillo .....	51
4.4.4. Tolerancias del Tornillo y el Cilindro ( $\delta$ ) .....	52
4.4.5. Cálculo de Números de Filetes del Husillo.....	53
4.4.6. Cálculo de Revoluciones del Husillo .....	53
4.4.7. Cálculo de Relación de compresión (Z).....	54
4.4.8. Cálculo de la potencia requerida .....	54
4.4.9. Variables para la Producción del Tornillo .....	55
4.4.9.1. Flujo de arrastre o fricción .....	56
4.4.9.2. Flujo de Presión .....	57
4.4.9.3. Flujo de Filtración .....	57
4.4.10. Constante Total de la Cabeza del Husillo (k) .....	58
4.4.11. Presión en el tornillo sinfín .....	59
4.4.12. Cálculo de Fuerzas del Husillo .....	59
4.4.13. Cálculo de Momento de Giro.....	60

<b>4.5.</b>	<b>Selección y Comportamiento de los Materiales .....</b>	<b>62</b>
<b>4.6.</b>	<b>Calculo y Dimensionamiento del Reactor .....</b>	<b>68</b>
4.6.1.	Cálculo de Volumen del Cilindro .....	68
4.6.2.	Área o Superficie del Cilindro .....	69
4.6.3.	Cálculo de Condensador .....	70
<b>4.7.</b>	<b>Sistema Eléctrico y Control .....</b>	<b>73</b>
4.7.1.	Selección del Motor .....	74
4.7.2.	Variador de Frecuencia .....	74
4.7.3.	Relé .....	75
4.7.4.	Control de Temperatura .....	76
4.7.5.	Logo Siemens.....	77
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>78</b>
<b>5.1.</b>	<b>Calculo teórico del tornillo.....</b>	<b>78</b>
<b>5.2.</b>	<b>Análisis del Fluido Usando FlowXpres.....</b>	<b>82</b>
<b>5.3.</b>	<b>Análisis del Sistema de Control Con Variador .....</b>	<b>84</b>
<b>5.4.</b>	<b>Análisis del Sistema de Control de Temperatura con Logo Siemens ...</b>	<b>86</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>90</b>
<b>7.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>92</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>93</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>103</b>
	<b>Anexo A - Tolerancias y Parámetros geométricos del husillo/cilindro .....</b>	<b>103</b>
	<b>Anexo B - Tolerancias y Parámetros geométricos del husillo/cilindro .....</b>	<b>104</b>
	<b>Anexo C - Materiales de Construcción y Propiedades de los Materiales para el Husillo.....</b>	<b>105</b>

<b>Anexo D - Propiedades Físicas del Polipropileno (PP)</b> .....	<b>106</b>
<b>Anexo E - Fórmulas para la Selección de Materiales</b> .....	<b>107</b>
<b>Anexo F - Características del Motor - Reductor</b> .....	<b>108</b>
<b>Anexo G - Tolva</b> .....	<b>109</b>
<b>Anexo H - Base de Tornillo</b> .....	<b>110</b>
<b>Anexo I - Cilindro</b> .....	<b>111</b>
<b>Anexo J - Husillo</b> .....	<b>112</b>
<b>Anexo K - Resistencia</b> .....	<b>113</b>
<b>Anexo L - Ensamble Tornillo</b> .....	<b>114</b>
<b>Anexo M - Condensador</b> .....	<b>115</b>
<b>Anexo N - Ensamble Reactor</b> .....	<b>116</b>
<b>Anexo O - Ensamble Total</b> .....	<b>117</b>
<b>Anexo P - Sistema de Control de Temperatura</b> .....	<b>118</b>
<b>Anexo Q - Sistema de Control y Fuerza con Variador</b> .....	<b>119</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Producción de plástico de 1950 a 2020 (en millones de toneladas métricas). .....	4
Figura 2 - Tipos de plásticos. ....	6
Figura 3 - Clasificación de los plásticos por su estructura interna. ....	7
Figura 4 - Variación de los rendimientos de los productos de pirólisis a diferentes temperaturas. ...	13
Figura 5 – Extrusora de un husillo.....	19
Figura 6 - Reactor Batch. ....	20
Figura 7 - Reactor Semi Batch. ....	21
Figura 8 – Reactor CSTR. ....	22
Figura 9 - Reactor de tornillo. ....	23
Figura 10 - Reactor de lecho fijo. ....	24
Figura 11 - Reactor de lecho fluidizado. ....	25
Figura 12 - Estructura de zeolitas en la pirólisis catalítica. ....	27
Figura 13 - Estructura tridimensional de la zeolita ZSM-5. ....	27
Figura 14 - Sitio ácido de brønsted en zeolitas. ....	29
Figura 15 - Sitio ácido de lewis en zeolitas. ....	29
Figura 16 - Sitio ácido de Lewis en zeolitas.....	30
Figura 17 – Representación Esquemática de la Estructura de la zeolita HZSM-5. ....	31
Figura 18 – Representación esquemática de la estructura de la zeolita HY. ....	32
Figura 19 - Inhibidor y Retardo.....	35
Figura 20 - Caldera de Fluido Térmico. ....	37
Figura 21 – Calentamiento por Inducción. ....	39
Figura 22 - Extrusora con sección de desgasificado.....	39
Figura 23 – Esquema del equipo utilizado para la Pirólisis de Plásticos.....	42
Figura 24 - Diseño de la tolva para la entrada de plásticos. ....	42
Figura 25 – Estructura del cilindro para soporte del tornillo. ....	43
Figura 26 - Sistema del cilindro y husillo.....	44
Figura 27 - Tornillo sinfín o husillo. ....	44
Figura 28 – Partes del husillo. ....	45

Figura 29 – Factores de diseño del husillo. ....	45
Figura 30 - Sección de husillo y cilindro del canal a) Vista general, b). ....	47
Figura 31 - Intervalos de velocidad de cortadura. ....	49
Figura 32 - Intervalos de viscosidad.....	50
Figura 33 - Diagrama de velocidades de flujo.....	55
Figura 34 - Diagrama de fuerzas de un husillo.....	60
Figura 35 - Materiales en funcion de la temperatura. ....	65
Figura 36 - Materiales de acuerdo con su módulo y de acuerdo con su costo. ....	66
Figura 37 - Reactor de pirólisis. ....	68
Figura 38 – Cilindro del reactor. ....	68
Figura 39 – Motor tipo MS90L4. ....	74
Figura 40 - ACS150 - micro convertidor de frecuencia. ....	75
Figura 41 – Sistema de control del motor ON- OFF. ....	76
Figura 42 – Logo Siemens.....	77
Figura 43 – Ensemble de Componentes Diseñados Para la Pirolisis. ....	82
Figura 44 – Análisis de Temperatura en el Sistema. ....	83
Figura 45 – Análisis de la Presión en la Salida del Sistema. ....	84
Figura 46 – Sistema de control con variador de frecuencia.....	85
Figura 47 – Sistema de control de Temperatura. ....	87
Figura 48 – Sistema de enfriamiento.....	88
Figura 49 – Error en el sistema.....	89

## Lista de tablas

Tabla 1 - Tipos de pirólisis.....	9
Tabla 2 - Rendimientos (líquidos, sólido y gas) en función del tipo de proceso termoquímico.....	11
Tabla 3 – Características de los procesos de pirólisis.....	12
Tabla 4 – Parámetros usados en la producción máxima de los productos en la pirólisis. ....	14
Tabla 5 - Propiedades físicas de las zeolitas.....	32
Tabla 6 - Distribución de los productos obtenidos de la pirólisis. ....	33
Tabla 7 - Porcentaje en peso de los combustibles obtenidos. ....	33
Tabla 8 – Variables para el diseño del husillo.....	46
Tabla 9 - Tabla de materiales posibles y que cumplen los estándares para la construcción. ....	67
Tabla 10 - Calores específicos de vapores de pirólisis con su potencia por unidad de temperatura..	71
Tabla 11 - Calculo teórico del husillo. ....	78
Tabla 12 - Variables de Construcción del husillo.....	79
Tabla 13 - Producción del Tornillo. ....	79
Tabla 14 - Presiones en el Tornillo Sinfin.....	79
Tabla 15 – Análisis de Costos de Materiales.....	80
Tabla 16 – Volumen del Reactor.....	81
Tabla 17 - Área del Reactor.....	81
Tabla 18 – Calculo Condensador. ....	81
Tabla 19 – Variables de Control.....	86

## Lista de siglas y Acrónimos

CADe_SIMU	Software simulador de circuitos eléctricos.
CSTR	Continuous stirred tank reactor. (Reactor continuo)
HDPE	Poliétileno de alta densidade.
HUSY	Zeolita HY ultraestable.
HZSM-5	MFI (Zeolite Socony Mobil-five).
LDPE	Poliétileno de baja densidade.
Logo - Siemens	Módulo lógico programable.
PP	Polipropileno.
PS	Poliestireno.
PVC	Policloruro de vinilo.
PET	Tereftalato de polietileno.
rpm	Revoluciones por minuto.
rps	Revoluciones por segundo.

## 1. Introducción

Los plásticos son materiales sintéticos que se han vuelto ampliamente utilizados en todo el mundo debido a su versatilidad, durabilidad y bajo costo. Se utilizan en una gran variedad de productos, desde envases de alimentos y bebidas hasta componentes de automóviles y electrónicos. Sin embargo, el uso de plásticos también ha planteado preocupaciones ambientales, ya que muchos tipos de plásticos son difíciles de reciclar y pueden tardar siglos en descomponerse en la naturaleza (Acurio, 2018).

Los plásticos también pueden liberar sustancias químicas tóxicas durante su fabricación y descomposición. Una de las soluciones a este problema se considera muy importante evitar y aprovechar las propiedades químicas de los plásticos. Con la llegada de las nuevas tecnologías, uno de los usos más viables de los plásticos es la pirólisis, que convierte los residuos plásticos en aceite de pirólisis (Vilca, 2020).

La pirólisis de plástico es un proceso termoquímico en el que los polímeros se descomponen térmicamente en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, los plásticos se calientan a temperaturas elevadas, lo que hace que se rompan los enlaces químicos que mantienen unidas las moléculas de los polímeros. Como resultado, esto descompone el plástico en sus componentes básicos, que pueden usarse para fabricar nuevos productos o generar energía. (Mendoza, 2015).

Los procesos de pirólisis de plástico son una alternativa prometedora para la gestión de residuos plásticos, ya que pueden convertirse en materiales útiles en lugar de simplemente eliminarlos en los vertederos. Además, la pirólisis produce gas de síntesis y otros productos que pueden utilizarse como combustible, lo que la convierte en una fuente potencial de energía renovable (Mendoza, 2015).

La pirólisis es una técnica de reciclaje en la que la descomposición térmica de polímeros se produce en ausencia de oxígeno o con cantidades limitadas de oxígeno, normalmente a temperaturas entre 300 y 600 °C. Dependiendo de la temperatura a la que se produce la pirólisis y otras condiciones operativas del proceso (presión, caudal, entrada de materia prima, velocidad de calentamiento, tiempo de exposición, etc.), se pueden

obtener mezclas de sólidos, líquidos y otros productos así como también gases de diferentes proporciones y diferentes composiciones (Mendoza, 2015).

La pirólisis de plásticos tiene el potencial de ser una tecnología útil para la gestión de residuos y la producción de energía, pero aún quedan grandes desafíos por abordar. Por ejemplo, es necesario desarrollar técnicas eficientes y económicas para separar los componentes básicos de los productos de pirólisis, y también se debe adoptar un enfoque cuidadoso para la gestión de los gases de escape y otros subproductos tóxicos producidos durante el proceso (Mendoza, 2015).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Estudiar y optimizar un proceso de transformación de residuos plásticos en oleos pirolíticos mediante el diseño y simulación del proceso con la ayuda de la herramienta CAD, para contribuir disminuir el índice de contaminación por plásticos en el mundo.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Mediante el presente estudio se provee mejorar la forma convencional de realizar el proceso de pirólisis para lo cual fue adecuado plantear una serie de objetivos específicos que ayudaran a el desempeño y la eficacia de este proceso. Entre los objetivos de carácter más innovador, de este trabajo tenemos:

- Caracterizar los parámetros de diseño del sistema de transformación de plásticos, para el uso en diferentes polímeros.
- Diseñar los componentes del equipo para la pirólisis de plásticos a través de un software CAD.
- Modular adecuadamente los componentes de la máquina de pirólisis con respecto a (cantidad y volumen), a través de la simulación en simulador CAD.

### **1.1.3. Alcance**

Realizar el estudio y mejoramiento de diseño de una máquina de transformación de plástico en oleo pirolítico mediante el uso de la técnica de pirolisis, analizando cada uno de los componentes de diseño para así garantizar el correcto funcionamiento durante el proceso de obtención de combustibles. Mediante el uso de esta técnica se podrá ayudar a la disminución de la contaminación en el planeta, así como también usar las técnicas de economía circular.

Se diseñará un prototipo de una máquina de pirolisis de plásticos usando como base un reactor de tipo Batch que será descrito en páginas posteriores, así como también un tornillo sinfín el mismo que se encargará de realizar un precalentamiento de nuestro material base (plásticos). Mediante este trabajo se realizará el cálculo de cada uno de los componentes mecánicos que serán necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Este trabajo se encuentra distribuido en 5 capítulos. En el primer capítulo se presentaran los objetivos generales y específicos de este trabajo. En el segundo capítulo se desenvolverá un marco teórico sobre los plásticos y sus clasificaciones. El tercer capítulo se refiere a la pirolisis y sus efectos en la transformación de este con algunas características necesarias para conseguir tener un resultado óptimo. En este capítulo se abordará aspectos de gran relevancia como son alimentadores de plásticos, reactores catalizadores, inhibidores y su sistema de calentamiento este capítulo es de gran relevancia ya que a partir de aquí empezaremos a desarrollar el capítulo 4.

En el capítulo 4 se realizara el cálculo de cada uno de los elementos constitutivos de la maquina y el capítulo 5 se referirá a cada uno de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. En los capítulos 6 y 7 son mencionadas las conclusiones de trabajo, así como las recomendaciones propuestas para un trabajo en el futuro. En los anexos se encontrará el diseño del equipamiento, así como algunas características usadas para realizar y diseño de los elementos.

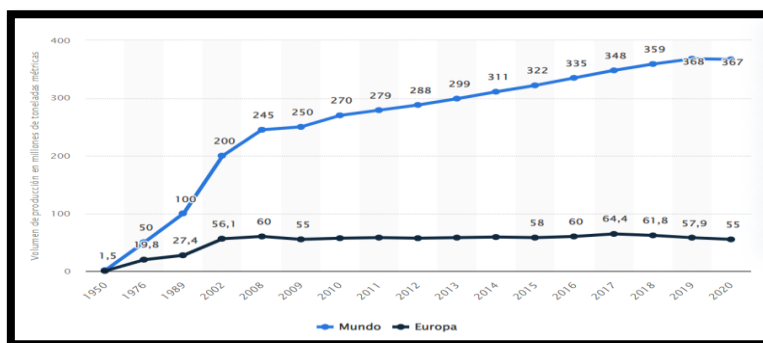
## 2. Plásticos

Los plásticos son sustancias orgánicas formadas por macromoléculas llamadas polímeros. Estos polímeros son grandes agrupaciones de monómeros unidos mediante un proceso químico llamado polimerización (Gutiérrez, 2015).

La acumulación de plástico no biodegradable es un problema ecológico de gran magnitud que puede provocar daños irreversibles e irreparables, tales como la destrucción de especies marinas, además de la generación de cantidades de desperdicio que cada vez son mucho más complicados de controlar y contener en tiraderos urbanos (Gutiérrez, 2015).

Según (Gutiérrez, 2015), la producción anual de polímeros se estima en unas  $270 \times 10^6$  ton/año, de las cuales al menos un 50% son termoplásticos commodities de las familias de las poliolefinas, poliestirenos y poli(etilen-tereftalato) que son algunos de los polímeros producidos en mayor volumen a nivel mundial. Se estima que desde 1950 hasta 2020 se han acumulado más de  $1 \times 10^9$  ton de plástico en el ambiente (figura 1), las cuales tardarán cientos de años en degradarse (Gutiérrez, 2015).

Aunque se han hecho enormes esfuerzos por reciclar este tipo de materiales, la capacidad de reciclaje es limitada, ya sea por causas logísticas o por sus limitadas técnicas tanto de los procesos como de los materiales mismos que después de varios ciclos de reciclaje presentan una disminución de sus propiedades mecánicas (Gutiérrez, 2015).



**Figura 1 - Producción de plástico de 1950 a 2020 (en millones de toneladas métricas).**

**Fuente: (Research Department, 2022).**

Dentro del grupo de las poliolefinas, los materiales plásticos básicos son el polietileno (PE) y el polipropileno (PP). Entre los plásticos, éstos se encuentran en un lugar destacado en el mundo, con respecto a términos de volumen de producción, estos no tienen olor ni sabor, no son tóxicos, no son solubles en agua, son químicamente resistentes, de fácil procesamiento, ligeros y muy económicos (Gutiérrez, 2015).

Con la excesiva cantidad de plásticos que existen y el aumento de tecnologías en el reciclaje, la pirolisis es una de las soluciones más prometedoras ya que al descomponerse generan cadenas hidrocarbonadas cuyas estructuras corresponden a alcanos lineales, ramificados y aromáticos (sobre todo en el caso de que la materia prima sea poliestireno, aunque hay evidencia experimental de que algunos catalizadores convierten polietilenos en compuestos aromáticos) que van desde C<sub>2</sub> hasta C<sub>40</sub> aproximadamente, mismas que tienen aplicación y mercado como combustible (Gutiérrez, 2015).

Los combustibles que resultan de esta separación son parecidos a los obtenidos en la refinación de petróleos crudos y tienen un valor elevado e importante dentro del mercado (en especial las gasolinas). Este tipo de procesos han sido estudiados desde los años 1990, pero en los últimos años ha conseguido tener mucha más importancia al convertirse en procesos económicamente más viables, actualmente existen procesos comerciales exitosos operando en varios países (Gutiérrez, 2015).

## **2.1. Tipos de Plásticos**

Los distintos tipos de plástico que existen se los puede identificar con un número del 1 al 7 ubicado en el interior del signo de reciclado (triángulo de flechas) como se muestra en la figura 2. Cada uno de los tipos de plásticos tiene una denominación y característica propia, misma que se presentan a seguir (Gestores de Residuo, 2020):

1. El PET (Tereftalato de polietileno) se lo usa para fabricar envases de bebidas recicladas, estas fibras se pueden utilizar en sacos de dormir, tapetes, tapetes y almohadas.
2. HDPE (Polietileno de alta densidad) normalmente es usado en recipientes de leche, aceite para motor, detergente, entre otros.

3. PVC (Cloruro de polivinilo) generalmente es utilizado en botellas de champú, botellas de aceite, utensilios de comida rápida, etc, botes de basura y contenedores de ropa. PVC reciclable como tubería de riego.
4. LDPE (Polietileno de baja densidad) se encuentra en fundas de compras, de pan, plástico para envolver.
5. PP (Polipropileno) y se usa en muchos recipientes para leche, pajitas, tapas de botellas, etc. El PP reciclado se puede utilizar como bolsas de plástico, escaleras y cajas para baterías de automóviles.
6. PS (Poliestireno) se los puede encontrar en vasos desechables para bebidas calientes y bandejas para carne. El PS se puede reciclar en vigas de plástico, cajas de casetes, macetas, etc.
7. Otros. Generalmente indica que es una mezcla de dos o más plásticos.

## 2.2. Tipos de Plásticos Reciclables

Hoy en día existen muchos tipos de plástico, pero no todos se pueden reciclar y en algunos casos, incluso si lo son, es posible que no se acepten en los centros de reciclaje. Para identificar y clasificar los plásticos reciclables, la Asociación Estadounidense de la Industria del Plástico ha desarrollado códigos estándar (Figura 2).

El código, suele estar ubicado en el fondo del recipiente de plástico y consta de tres flechas en el sentido de las agujas del reloj, formando un triángulo con esquinas redondeadas, como se muestra en la Figura 2 (Rocha, 2018).



**Figura 2 - Tipos de plásticos.**

**Fuente: (Rocha, 2018).**

### 2.3. Clasificación de los Plásticos

Los plásticos se definen según el código de clasificación de plásticos, este es un método utilizado por la industria alrededor de todo el mundo para diferenciar el contenido de resina de los envases de otros productos plásticos. Esto se hizo para facilitar el reciclaje y hacerlo más eficiente (Acurio, 2018).

Su comportamiento frente al calor y otras propiedades dependen de la estructura interna del polímero. Se pueden dividir en las siguientes categorías (Castells, 2009):

- **Termoplásticos** - Está formado por cadenas débilmente conectadas. Se ablanda y puede moldearse cuando se expone al calor y conserva su nueva forma incluso cuando se enfría. Este proceso se puede repetir tantas veces como sea necesario (figura 3).
- **Termoestables** - Consiste en cadenas fuertemente conectadas en diferentes direcciones. A medida que aumenta el calor, se vuelve más duro y no puede deformarse una vez calentado. La superficie es dura y extremadamente duradera (figura 3).
- **Elastómeros** - Este tipo de plástico se obtiene por vulcanización. Consiste en cadenas conectadas horizontalmente y dobladas como una bola (Figura 3). Cuando se aplica una fuerza, la cadena se estira y vuelve a su forma original cuando la fuerza deja de actuar sobre ella. Estos materiales se caracterizan por una excelente elasticidad, adherencia y dureza.



**Figura 3 - Clasificación de los plásticos por su estructura interna.**

**Fuente: (Castells, 2009).**

### 3. Pirólisis

La pirólisis o craqueo es una técnica de reciclaje a través de la cual los polímeros orgánicos se descomponen con el aumento de la temperatura y los transforman en elementos que tienen un menor peso molecular en forma de gases combustibles, aceites y desechos sólidos en ausencia de oxígeno. Se clasifican en tres tipos principales de craqueo: hidrocrqueo, craqueo o pirólisis térmicos y craqueo catalítico (Canteros, 2014).

- **Hidrocrqueo:** Se caracteriza por la adición de hidrógeno a alta presión y el fraccionamiento de cadenas de hidrocarburos con ayuda de catalizadores como metales de transición (Pt, Ni, Fe, etc.), los mismos que se encuentran en sólidos ácidos como zeolitas, alúmina, silicatos de alúmina, etc. El trabajo se realiza habitualmente en un reactor de tipo Batch (Canteros, 2014).
- **Pirólisis térmica:** Conocida como pirólisis no catalítica, es un proceso endotérmico de alta energía que requiere temperaturas que oscilan entre 350 a 900 °C dependiendo del polímero a descomponer, no utiliza un catalizador y permite trabajar con mezclas de plásticos (Canteros, 2014; Olivares, 2013).
- **Pirólisis catalítica:** Este tipo de pirolisis es lo contrario de la anterior ya que esta pirólisis utiliza un catalizador. Dependiendo de las características del catalizador va a depender el rendimiento y calidad de los productos pirolíticos a obtener (Canteros, 2014).

Mediante el uso de catalizadores se aumenta la conversión y la calidad del combustible el mismo que se obtiene de la degradación la cual requiere menos cantidad de energía (temperatura) y tiempo de reacción comparado con la pirólisis térmica. De la misma forma, este tipo de proceso se realiza con la circulación de un gas inerte el cual conduce al oxígeno presente en el reactor la cual evita la formación de dioxinas por lo que reduce la emisión de monóxido y dióxido de carbono (Vilca, 2020).

#### 3.1. Tipo de Pirólisis

Los distintos tipos de procesos de pirólisis se pueden clasificar de acuerdo con: el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y la temperatura final, estos a su vez

se subclasifican en varios tipos de pirolisis entre ellos están: carbonización, pirolisis convencional, pirolisis rápida, pirolisis flash de gases y líquidos, pirolisis ultra rápida, pirolisis a vacío, hidro-pirolisis y metano pirolisis (tabla 1) (Guerrero, 2016).

La investigación de los tipos de pirolisis se realizó entorno a la relevancia y aporte en el ámbito de desenvolvimiento del presente trabajo para lo cual se eligió estudiar tres procesos muy importantes dentro de la pirolisis, sin embargo, en la tabla 1 se presentan valores de los restantes tipos de pirolisis.

Entre las pirolisis que serán abordadas en este subcapítulo están:

- Pirólisis Convencional;
- Pirólisis Rápida;
- Pirólisis Flash o Pirólisis Ultra-Rápida.

**Tabla 1 - Tipos de pirolisis.**

**Fuente: (Guerrero, 2016).**

Proceso	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura (°C)	Productos
<b>Carbonización</b>	Días	Muy lenta	400	Bio-sólido
<b>Convencional</b>	5-60 min	Lenta	600	Gas, liq., sol.
<b>Rápida</b>	0.5-5 s	Rápida	< 650	Bioaceites
<b>Flash (liq.)</b>	< 1 s	Rápida	< 650	Bioaceites
<b>Flash (gas)</b>	< 1 s	Rápida	< 650	Quím y gas
<b>Ultra rápida</b>	< 0.5 s	Muy rápida	1000	Quím y gas
<b>Vacío</b>	2-30 s	Media	400	Bioaceites
<b>Hidro pirolisis</b>	< 10 s	Rápida	< 550	Bioaceites
<b>Metano pirolisis</b>	< 10 s	Rápida	< 700	Químicos

- **Pirólisis Convencional o Lenta**

La pirolisis convencional es realizada con velocidades de calentamiento lentas, atingiendo gamas de temperaturas máximas que van desde los 500-600 °C. Cumpliendo con cada una de estas condiciones, se obtienen tres tipos de productos entre los principales

tenemos: sólidos, líquidos y gases, cada una de ellas en proporciones significativas. Este tipo de pirolisis se da a velocidades muy bajas que van desde ( $\sim 0.1-1$  °C/s).

Los gases volátiles tienen un tiempo de residencia que varía entre 5 y 60 minutos, los materiales que se encuentran en estado gaseoso continúan interactuando entre si hasta formar un producto el cual podría encontrarse en estado sólido y líquido. Para el caso de la biomasa la misma que es calentada aproximadamente a 500 °C y usa tamaños de partícula entre 5-50mm. Estas condiciones permiten obtener productos líquidos, sólidos y gaseosos en porcentajes similares (32-38 %w de sólido, 28-32 %w de líquido y 25-29 w% de gas) (Guerrero, 2016).

- **Pirólisis Rápida**

Este es un proceso en el que los materiales se calientan rápidamente a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (650 °C) es utilizado en mayor parte para la producción de bioaceites ya que el rendimiento en peso de esta fracción es mucho mayor que el obtenido con la pirólisis convencional (Guerrero, 2016).

Cuando la velocidad de calentamiento es demasiado elevada y tiene un enfriamiento rápido provoca la fracción líquida condensada reaccione sin llevar a cabo el craqueo de los compuestos que tienen un mayor peso molecular, los mismos que formarían parte de los gases sin condensar. A escala comercial, esto sólo se ha logrado con reactores de lecho fluidizado, con plantas piloto dentro de la Unión Europea (Guerrero, 2016).

- **Pirólisis Flash o Pirólisis Ultrarrápida**

Si la temperatura del proceso es alta (1000 °C) y el tiempo de residencia son mucho más bajos, se le denomina pirólisis ultrarrápida o pirolisis de tipo flash.

En este caso la mayor parte de gases generados corresponden a el rendimiento que se da en este proceso. No en tanto, la pirolisis de tipo flash es una ruta prometedora en términos de producción de biopetróleo.

En la tabla 2 se describen cada uno de los rendimientos de acuerdo con el tipo de proceso termoquímico y su rendimiento en sólido, líquido y gas.

**Tabla 2 - Rendimientos (líquidos, sólido y gas) en función del tipo de proceso termoquímico.**

**Fuente: (Guerrero, 2016).**

Proceso	Rendimiento (%)		
	Líquido	Sólido	Gas
Pirolisis Rápida	75	12	13
Pirolisis Convencional	50	20	30
Carbonización	30	35	35
Gasificación	5	10	85

Por tanto, la pirólisis es un proceso flexible que puede facilitar la producción de gases, líquidos o aceites y sólidos utilizando técnicas adecuadas (Guerrero, 2016).

### 3.2. Parámetros que influyen en el Proceso de Pirólisis

Existen varios parámetros que ayudan al mejoramiento e intervención en el proceso de la pirólisis entre los más importantes están:

- Efecto de la temperatura;
- Efecto de la tasa de Calentamiento;
- Influencia del tiempo de residencia;
- Cantidad de muestra y tamaño;
- Densidad y humedad de la muestra;
- Tipo de contacto material – catalizador;
- Presión de funcionamiento.

En la tabla 3 se puede observar cada uno de los parámetros que influyen en el proceso del pirólisis, así como también el tipo de pirólisis.

**Tabla 3 – Características de los procesos de pirólisis.**

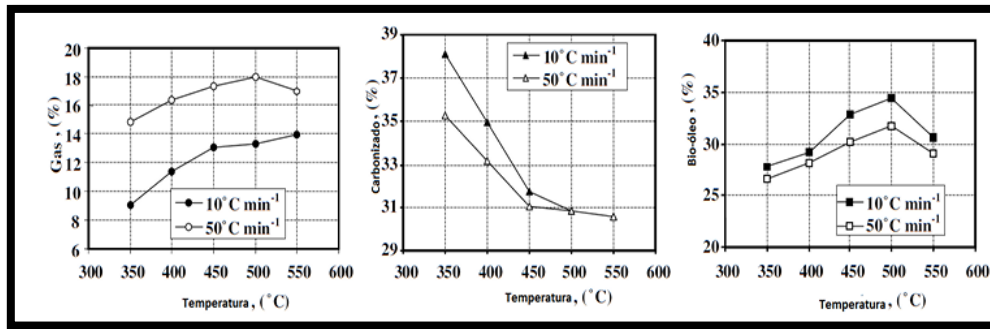
**Fuente: (Mendoza, 2015).**

	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Velocidad de calefacción</b>	<b>Temperatura máxima (°C)</b>	<b>Producto mayoritario</b>
<b>Pirólisis suave</b>				
Carbonización	Horas-días	Muy baja	400	Sólido
Convencional	5-30 min.	baja	600	Gas, líquido y sólido
<b>Pirólisis rápida</b>				
Rápida	0,5-5 s.	Bastante alta	650	Líquido
Flash-líquido	< 1 s.	alta	< 650	líquido
Flash-gas	< 1 s.	Alta	> 650	Gas
Ultra	< 0,5 s.	Muy alta	1000	gas
Vacío	2-30 s.	media	400	líquido
<b>Pirólisis reactiva</b>				
Hidropirólisis	< 10 s.	alta	< 500	Líquido
Metanopirólisis	< 10 s.	alta	> 700	líquido

### 3.2.1. Efecto de la Temperatura en la Pirólisis

La temperatura en la pirólisis es determinante para que se produzca la reacción y se formen los productos deseados, unos en mayor cantidad que otros. Por lo tanto, para que ocurra la reacción, las partículas se someten a una temperatura, llamada temperatura de pirólisis, debido a que esta temperatura afecta el rendimiento de los productos deseados (Silva, 2016).

Con la aparición de bajas temperaturas se produce una mayor cantidad de carbonización, mientras que con altas temperaturas la producción de carbonización es menor. En el caso de los plásticos, existe una temperatura óptima para maximizarla y varía entre (450 – 500 °C). Cuanto mayor es la temperatura los gases se forman en mayor cantidad. Estas afirmaciones se pueden confirmar a través de la figura 4 (Silva, 2016).



**Figura 4 - Variación de los rendimientos de los productos de pirólisis a diferentes temperaturas.**

**Fuentes: (Şensöz, Demiral, & Gerçel, 2006).**

Según (Mendoza, 2015), refiere que la temperatura es una de las variables más importantes del proceso de pirólisis. Generalmente, en la pirólisis, a medida que aumenta la temperatura, disminuye la proporción de productos líquidos y aumenta la proporción de gases y sólidos.

Con el aumento de temperatura no solo ayuda a las reacciones secundarias de los productos de pirólisis, sino que también aumenta la aparición de productos más pequeños, lo cual automáticamente genera el aumento de las reacciones terciarias que son el resultado de la condensación de los productos y a su vez la deposición de sólidos carbonosos. Se los puede diferenciar en tres intervalos de temperatura los mismo que son presentado a seguir (Mendoza, 2015).

- Cuando la temperatura esta entre 330 y 450 °C la parte líquida consigue rendimientos importantes, mientras que la producción de compuestos gaseosos es mucho menor (Mendoza, 2015).
- Las temperaturas superiores a 500 °C provocan un mayor craqueo de los plásticos pirolíticos, lo que mejora aún más el rendimiento de la fracción gaseosa (Mendoza, 2015).
- A partir de 700 °C el contenido de sólidos comienza a tener un peso específico importante, e incluso existe una relación directamente proporcional entre el rendimiento del gas y el contenido de sólidos (Mendoza, 2015).

### 3.2.2. Efecto de la Tasa de Calentamiento

El efecto de la tasa de calentamiento, por sí mismo, no define los productos de la pirólisis, pero este parámetro es de gran importancia, ya que un calentamiento rápido hasta la temperatura de pirólisis podrá generar más gases volátiles, por consecuencia, más líquido (dependiendo de la temperatura final) y si el calentamiento es más lento generará más cantidad de carbonización. Estas afirmaciones se pueden confirmar con la tabla 4 (Silva, 2016).

Algo tan importante como la tasa de calentamiento es el tiempo de residencia de los vapores en el interior del reactor. Al parecer los parámetros a los que se somete el plástico se ajustan según lo que se quiera obtener como producto final. Se pueden describir tres hipótesis para maximizar la producción de dióxido de carbono, biopetróleo y gases, como se puede observar en la tabla que está a continuación (Silva, 2016).

**Tabla 4 – Parámetros usados en la producción máxima de los productos en la pirólisis.**

**Fuente: (Basu, 2013)**

<b>Producto</b>	<b>Tasa de Calentamiento</b>	<b>Temperatura final</b>	<b>Tempo de residencia</b>
<b>Carbonizado</b>	Lento	Lento	Lento
<b>Líquido</b>	Baja	Baja	Baja
<b>Gases</b>	Larga	Larga	Larga

La velocidad de calentamiento dentro de la pirolisis es uno de los factores más importantes con respecto a la distribución los productos resultantes. Dependiendo de la velocidad de calentamiento utilizada, se pueden distinguir dos tipos de procesos de pirólisis como son: pirólisis lenta y pirólisis flash.

En una pirólisis lenta, la velocidad de calentamiento se encuentra entre unidades o decenas de °C/min. En la pirólisis flash las velocidades de calentamiento son mucho

más elevadas que 250 °C/s los mismos que forman productos líquidos y gaseosos (Mendoza, 2015).

### **3.2.3. Influencia del Tiempo de Residencia**

En el proceso de pirólisis una de las variables más destacable es el tiempo de residencia en el interior del reactor de los compuestos volátiles generados, durante el cual ocurren reacciones secundarias y terciarias, las mismas alteran la distribución de productos generados en la primera etapa de la descomposición del polímero (Mendoza, 2015).

De forma simplificada se puede decir que con el aumento del tiempo de residencia se va a disminuir el rendimiento de los líquidos y aumentar el rendimiento a productos sólidos y gases. Así, de esta forma (Hernández, García, Gómez, Agulló, & Marcilla, 2006) quienes realizaron algunos estudios acerca de la influencia del tiempo de residencia en los productos generados mediante la pirólisis de plásticos, concluyendo que el aumento de tiempo de residencia provoca que aumenten en proporción los gases en detrimento de líquidos (Mendoza, 2015).

### **3.2.4. Cantidad de Muestra y Tamaño de Partícula**

La cantidad de muestra y el tamaño de partícula son factores que afectan fundamentalmente a la transferencia de materia y a la transmisión de calor en el reactor, ya que las partículas grandes no se calientan rápidamente como las pequeñas.

En (Mendoza, 2015) se evaluó el efecto del tamaño de partícula sobre los productos obtenidos en los procesos de pirólisis del poliestireno, en el cual se obtuvo como resultado que cuanto menor es el tamaño de la partícula degradada menor será la cantidad producto sólido obtenido, en cuanto que la producción de gases y líquidos es mayor.

### **3.2.5. Densidad y Humedad de la Muestra**

Con una muestra de alta densidad a pirolizar se va a provocar la captura de los productos como alquitranes llevándolo a una mayor degradación y por tanto un descenso

de producción de la fracción sólida e hidrocarburos pesados. Además, si la muestra tiene un alto contenido de humedad, parte del calor aportado para descomponer este material se consume en el secado de la muestra, y su descomposición se produce a una temperatura inferior a la nominal, favoreciendo la formación de la fracción sólida y líquida (Mendoza, 2015).

Hay trabajos que evalúan el calor necesario para secar determinados materiales. Este es un claro ejemplo de cómo la humedad en la muestra puede provocar un aumento de la energía utilizada para la pirólisis (Mendoza, 2015).

### **3.2.6. Tipo de Contacto Material – Catalizador**

El tipo de contacto que se da entre la muestra a degradar y el tipo de catalizador utilizado puede alterar la actividad del catalizador y por ende modifica la cantidad de productos obtenidos. La bibliografía incluye trabajos y ensayos en los cuales se evalúa la influencia de esta variable. Así en (Chiu & Cheng, 1999) quienes estudiaron la degradación del PET utilizando dos tipos de mezclas: una en la que el polímero y el catalizador se mezclaban en estado sólido hasta obtener una distribución uniforme de ambos (mezcla física) y otra en la que el polímero era impregnado con el catalizador que se encontraba en solución acuosa (impregnación) (Mendoza, 2015).

Demostraron que la exposición de ambos materiales mediante impregnación podría aumentar el craqueo del polímero, lo que redujo el tiempo necesario para que se produjera el craqueo (Mendoza, 2015).

### **3.2.7. Presión de Funcionamiento**

La presión de funcionamiento es un parámetro primordial para el diseño mecánico del reactor, ya que a través de este parámetro se podrá establecer un valor máximo a soportar por este, así como también cada uno de los elementos usados para la pirólisis. El efecto de la presión en la pirólisis del plástico se da con presiones en un rango de 0.1-0.8 MPa donde la presión tiene mayor impacto en el tiempo de residencia a una temperatura más baja. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta ( $T > 430$  °C), el efecto de la presión sobre el tiempo de residencia es menos evidente (Hernandez, 2007).

### **3.2.8. Efecto Condensador**

Para la elección del condensador son necesarios algunos requisitos. Es necesario, condensar los gases producidos por las reacciones de pirólisis. Estos gases generados después de ser condensados forman el óleo pirolítico. Este oleo pirolítico tiene una alta viscosidad y por lo tanto es necesario que no se acumule en las paredes del condensador. Para eso, el condensador tendría que ser vertical en la salida principal del gas, pudiendo los restantes estar de forma horizontal y estar construido con uno o más tubos (Silva, 2016).

Por estas tuberías pasan los vapores formados durante la pirólisis y por el condensador el fluido refrigerante. Como ya se mencionó, el óleo es muy viscoso y su depósito en los tubos dificulta la transferencia de calor. En este caso, será necesario diseñar un sistema de limpieza de tuberías, que se utilizaría en un intervalo de tiempo determinado en función de la suciedad y su uso (Silva, 2016).

## **3.3. Alimentador**

El sistema de alimentación de los reactores consiste en un sistema de tornillo sinfín, el mismo permite alimentar de forma continua el reactor para de esta manera conseguir mayor eficiencia en el proceso de la pirólisis (Mariano, 2011).

Un tornillo sinfín es un tipo de tornillo alargado, conocido también como husillo, hecho de hierro el mismo que se usa para transmitir el movimiento de manera continua. Esta herramienta tiene diferentes diámetros los mismos que pueden ser diseñados de acuerdo con el uso que se le da o al tipo de material a transportar (Mariano, 2011).

Gracias a las investigaciones sobre el comportamiento del flujo de los polímeros, el tornillo sinfín ha estado en constante evolución desde la creación y expansión de la industria plástica, se han convertido en la tecnología más avanzada en extrusoras (Mariano, 2011).

### **3.3.1. Técnicas de Extrusión**

La clasificación general de las distintas técnicas para extrusión de polímeros son las siguientes (Acurio, 2018):

- Extrusión con un sólo husillo:
  1. Extrusores convencionales o típicos;
  2. Extrusores con ventilación (o venteo) o desgasificación;
  3. Extrusores co-mezcladores.
- Extrusores sin husillo:
  1. Bombas;
  2. Extrusores de discos.
- Extrusores de husillo múltiple:
  1. Extrusores de doble husillo;
  2. Husillos que engranan y no engranan
  3. Rotación en el mismo sentido;
  4. Rotación en sentido inverso;
  5. Extrusores con más de dos husillos.

### 3.3.2. Tipos de Extrusoras

Las extrusoras monohusillo son las más comunes. El husillo normalmente tiene una cuerda, pero también puede tener dos formando canales entre los espacios de los hilos y el centro del tornillo, manteniendo el mismo diámetro desde la parte externa del hilo y en toda la longitud del husillo (Acurio, 2018).

#### Extrusoras de un sólo husillo

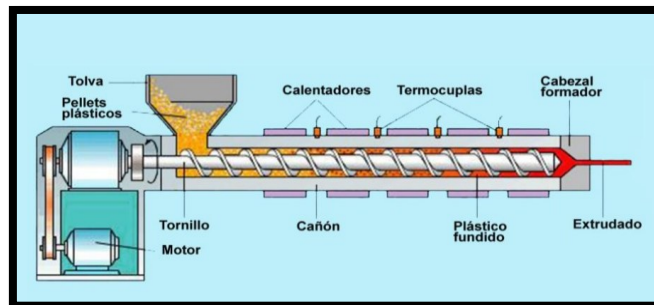
Esta es la división más común de las extrusoras de monohusillo y consta de cuatro zonas desde la alimentación hasta la salida por la boquilla (figura 5) esta se divide en (Acurio, 2018):

- **Zona de alimentación:** Aquí es donde ocurre el transporte de plásticos sólidos y comienza la elevación de temperatura del material.
- **Zona de compresión:** En esta parte, las partículas de polímero se comprimen y se someten a tensiones de fricción y esfuerzos cortantes para lograr una fusión efectiva.
- **Zona de distribución:** Aquí se homogeneizan y mezclan los materiales fundidos.

- **Zona de mezcla:** Esta parte opcional implica una mezcla intensiva del material. A menudo esto no se recomienda ya que puede provocar la degradación del polímero.

Los tornillos sin fin pueden tener también dentro de algunas de sus zonas principales elementos dispersivos y elementos distributivos (Acurio, 2018):

- **Distribución:** Asegura que todos los materiales de la muestra estén en proporciones iguales.
- **Dispersión:** Esto asegura que los componentes no se aglomeren y formen partículas lo más pequeñas posibles.



**Figura 5 – Extrusora de un husillo.**

**Fuente: (Tecnología de los Plásticos, 2011).**

### 3.4. Reactores

La selección del tipo de reactor a usar en la pirólisis de plásticos es muy importante para el proceso, ya que condiciona en muchos casos los niveles de las variables que se pueden emplear y por tanto la distribución de productos obtenidos.

En la bibliografía existe una gran cantidad de trabajos sobre pirólisis de materiales plásticos, tanto térmica como catalítica, donde se describen diferentes tipos de reactores, por lo tanto, a los reactores se los dividió en dos grupos de acuerdo con la relevancia y aportación de ellos en el presente trabajo (Mendoza, 2015). Estos dos grupos se los dividió por el método de operación y en cuanto a la disposición del catalizador entre los más importantes están:

- Reactores según el método de operación: batch, semi-batch, reactores continuos;

- Reactores por disposición del catalizador: Reactor de lecho fluidizado e Reactor de lecho fijo.

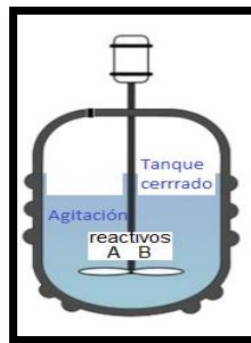
### 3.5. Según el método de Operación

#### 3.5.1. Reactor Batch

Un reactor de tipo batch es caracterizado por tener un cilindro rodeado por un sistema de calentamiento, en algunos de los casos, por tener un dispositivo de agitación (figura 6), este tipo de reactor se caracteriza por la ausencia de un flujo de gas inerte para desplazar los volátiles liberados por la reacción (Basu, 2013; Lechuga, 2008).

Debido a esto se dan reacciones secundarias (como lo son aromatizaciones o ciclaciones) que interfieren en el correcto desempeño del equipo, obteniendo productos indeseados. Este tipo de reactor fue el que más se acoplaba a este proyecto ya que tiene algunas ventajas las cuales ayudan a obtener resultados mucho más visibles entre las ventajas más importantes de este reactor tenemos:

- Puede ser usado a nivel de laboratorio, tiempo de pirólisis que se desee, fácil control de variables durante el proceso y también su fácil diseño (Obando, 2015).



**Figura 6 - Reactor Batch.**

**Fuente: (Obando, 2015).**

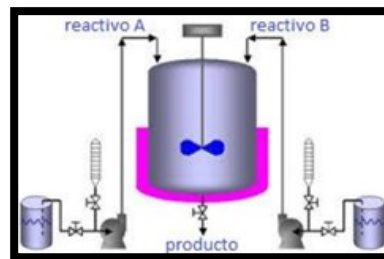
#### 3.5.2. Reactor Semi-Batch

Un reactor semi-batch es un equipo muy parecido al reactor batch, este tipo de reactor permite adicionar o extraer un producto a lo largo del tiempo (figura 7).

Normalmente, tanto los reactores batch, como los semi-batch son elegidos por su fácil diseño e implementación, lo que se traduce en una fabricación a un bajo costo (Obando, 2015).

Existen diversos investigadores que han abordado el reactor semi-batch como lo son (Lee, Noh, Shin, & Seo, 2002) quienes estudiaron la degradación catalítica de diversos plásticos Poliestireno (PS), Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y Polipropileno (PP) en un reactor batch encontrando que las selectividades a combustibles líquidos superaron el 80% en todos los ensayos. Estos combustibles se encontraban dentro del rango de la gasolina (entre C5 y C10), circundando el C8. Dentro de los resultados se encontró una gran gama de productos (Garrido, 2013).

Por su parte (Sio, 1997) estudió el cracking catalítico del PEAD, PEBD y del PP, mezclados con tres distintas zeolitas, encontrando conversiones cercanas al 50% y con una selectividad aproximada al 50% en el rango del C5-C12 en algunos casos para el PEAD (Garrido, 2013).



**Figura 7 - Reactor Semi Batch.**

**Fuente: (Obando, 2015).**

### **3.5.3. Reactores Continuos**

Este tipo de reactor se denomina así porque produce un flujo continuo de reactivo dentro del recipiente y una descarga continua de reactivo o residuo. En los reactores industriales que funcionan de forma continua, las propiedades de las sustancias no cambian con el tiempo (figura 8) ( Grupo Acura, 2022).

Son los preferidos por las industrias a gran escala porque aumentan la calidad del producto y la consistencia de las condiciones de reacción, y permiten el control

automático para reducir los costos de mano de obra. Para realizar este tipo de procesos se utilizan reactores tubulares y de tanque agitado. Inicialmente, la reacción ocurre en fase gaseosa y parte reacciona en fase líquida. Además, también son muy populares para realizar reacciones catalíticas ( Grupo Acura, 2022).

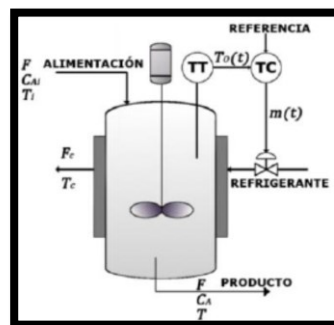
- **Reactor de Tipo CSTR**

Este tipo de reactor, también conocido como CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), consta de varios tanques que aseguran que la mezcla de reactivos en los tanques no cree gradientes de temperatura o concentración (Villarreal & García, 2021).

Para los reactores CSTR que utilizan catalizadores sólidos, hay que tener en cuenta que las partículas del catalizador deben estar suspendidas de forma homogénea. Esto no siempre es posible debido a la diferencia de densidad entre sólidos y líquidos, especialmente suspensiones (Villarreal & García, 2021).

En los reactores CSTR que utilizan catalizadores sólidos hay que tener en cuenta que las partículas del catalizador deben estar suspendidas de forma homogénea. Esto no siempre es posible debido a la diferencia de densidad entre sólidos y líquidos, especialmente suspensiones (Villarreal & García, 2021).

El reactor CSTR admite reacciones exotérmicas  $A \rightarrow B$ , para disipar el calor generado por la reacción, el reactor está rodeado por una camisa por la cual fluye un líquido refrigerante, como se muestra en la Figura 8 (Cargua, 2018).



**Figura 8 – Reactor CSTR.**

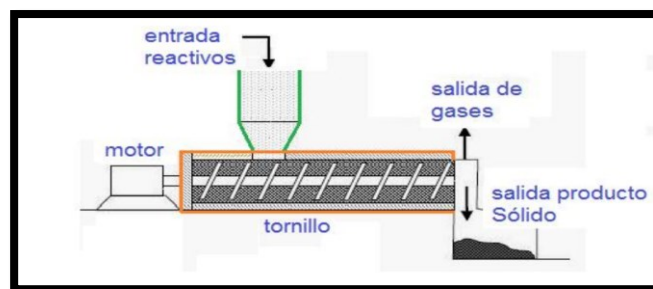
**Fuente: (Cargua, 2018).**

- **Reactor Tipo Tornillo**

Un reactor de tornillo es un dispositivo que consta básicamente de una tolva que se encuentra ubicada en la entrada del proceso a través del cual los reactivos fluyen hacia el tornillo, transporta las materias primas a través de un barril donde se llevan a cabo reacciones de conversión, es muy similar a una extrusora de polímeros (figura 9).

Los reactores de tornillo son una tecnología relativamente nueva en comparación los reactores mencionados anteriormente. Una característica especial es que el tiempo de residencia puede controlarse mediante la velocidad del tornillo (Obando, 2015).

Por otro lado, los reactores de tornillo, al igual que el resto de los reactores mencionados anteriormente, son una opción que permite un funcionamiento continuo sin problemas evidentes de escala, lo que los convierte en una alternativa interesante desde el punto de vista industrial (Obando, 2015).



**Figura 9 - Reactor de tornillo.**

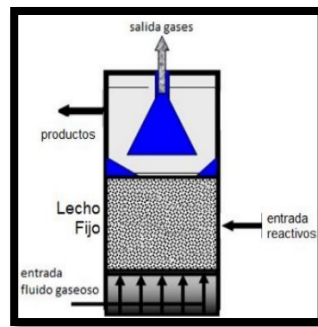
**Fuente: (Obando, 2015).**

### **3.6. Según Disposición del Catalizador**

#### **3.6.1. Reactor de Lecho Fijo**

Los reactores de lecho fijo consisten en un tipo de equipo en el que el catalizador se coloca en una posición fija respecto al reactor y no se mueve, como se muestra en la Figura 10. Los reactivos que circulan a través de este lecho en forma líquida o gaseosa, provocando su descomposición. de reactores dentro de la capa.

Este tipo de dispositivo se utiliza ampliamente en muchas reacciones catalíticas heterogéneas. Sin embargo, también tiene desventajas como, baja transferencia de calor, efecto de tamaño plástico (preferiblemente pequeño), pequeña área de contacto con el catalizador y reacción de pirólisis de desechos orgánicos (Basu, 2013; Arbeláez, y otros, 2013; Bermejo, 2013).



**Figura 10 - Reactor de lecho fijo.**

**Fuente: (Obando, 2015).**

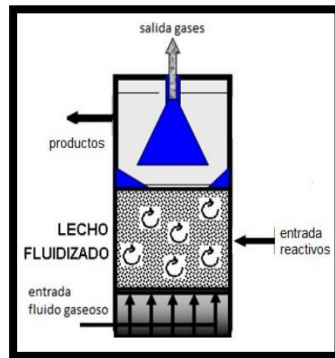
### 3.6.2. Reactor de Lecho Fluidizado

A diferencia de un reactor de lecho fijo, donde el flujo de reactivos no provoca movimiento en el lecho fijo, un reactor de lecho fluidizado tiene una corriente ascendente que dispersa las partículas por todo el lecho, mejorando la transferencia de calor y masa en el lecho. (Figura 11) (Flores, 2007; Arauzo, Bimbela, Ábrego, Sánchez, & Gonzalo, 2014; Vásquez, Zapata, & Vélez, 2013).

La ventaja decisiva de este sistema frente a los lechos fijos es precisamente que estos fenómenos se producen con relativa facilidad y que las operaciones de pirólisis continua son posibles sin problemas. Por tanto, ha demostrado ser una alternativa atractiva desde el punto de vista industrial por la posibilidad de funcionamiento continuo. Por ejemplo, la pirólisis no tiene que lidiar con problemas de lecho fijo que dificultan el escalonamiento (Obando, 2015).

Este tipo de dispositivo se caracteriza por un lecho que se mueve cuando el peso aparente de las partículas es menor que la fuerza de arrastre debida al caudal del gas portador. En este sentido, el coeficiente de velocidad de fluidización cobra importancia y

es un parámetro importante que determina la distribución del tiempo de residencia de los productos obtenidos en el reactor (Obando, 2015).



**Figura 11 - Reactor de lecho fluidizado.**

**Fuente: (Obando, 2015).**

### **3.7. Catalizadores**

Los catalizadores son sustancias químicas que aceleran las reacciones químicas, reducen el tiempo de residencia y la temperatura de reacción, mejoran la calidad del aceite en el caso de la pirólisis de polímeros y aumentan la eficiencia del proceso (Miandad, Barakat, Aburiazaiza, Rehan, & Nizami, 2016).

Los catalizadores utilizados en procesos de pirólisis deben tener las siguientes propiedades principales (Sharuddin, Abnisa, Daud, & Aroua, 2016):

- Presencia de centros ácidos de Lewis y Brønsted. La combinación de estos sitios permite que existan diferentes vías de reacción en la degradación del polímero.
- Propiedades físicas del catalizador, como área de superficie, tamaño de poro y volumen de poro (Domènech, 2012).

#### **3.7.1. Catálisis Homogénea y Heterogénea**

La catálisis homogénea es un proceso altamente selectivo que es útil a escala industrial para procesos exotérmicos donde se prefiere la distribución calórica. Los mecanismos de reacción incluyen la hidrogenación de alquenos, la formación de compuestos de coordinación y reacciones de inserción (Brown, 2005).

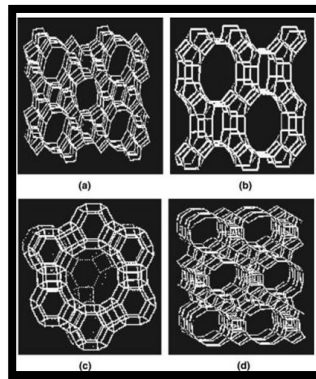
En comparación, la catálisis heterogénea utiliza un número limitado de catalizadores que deben soportar temperaturas y presiones elevadas. No requieren aislamiento del catalizador por separado como lo requiere la catálisis homogénea; La catálisis se produce entre reactivos con una gran superficie de contacto (que pueden ser líquidos o gaseosos e incluso suspendidos en un medio electrónico) y un catalizador (Brown, 2005).

Los catalizadores muestran una excelente selectividad geométrica porque actúan como un tamiz molecular cuando interactúan las moléculas que intentan ingresar al espacio cristalino. Este es el principio básico de muchos procesos de refinación petroquímicos e industriales que requieren la separación selectiva de isómeros. Esta catálisis tiene importantes beneficios económicos a escala industrial (Brown, 2005).

### **3.7.2. Tipos de Catalizadores**

Para descomponer los plásticos existen varios catalizadores, como zeolitas, aluminosilicatos, arcillas y materiales mesoporosos. Actualmente, el catalizador más utilizado en este campo es la zeolita, estos compuestos son materiales cristalinos pertenecientes a la familia de los aluminosilicatos con grandes canales y dimensiones moleculares porosas, que conducen a una mayor selectividad en las reacciones de los compuestos petroquímicos (Garrido, 2013).

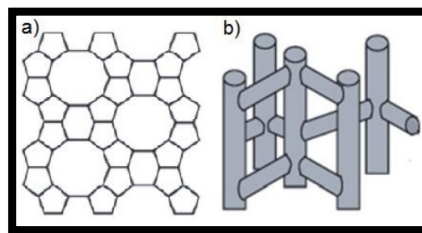
Una de las características de degradación plástica más importantes de las zeolitas es la presencia de sitios ácidos. Estos sitios son centros que promueven la transferencia de hidrógeno, que en última instancia implica la ruptura de enlaces débiles carbono-carbono (Garrido, 2013).



**Figura 12 - Estructura de zeolitas en la pirólisis catalítica.**  
**(a) H-ZSM-5; (b) H-Mor (Mordenita); (c) H-Y o HUS-Y; (d) H-Beta.**  
**Fuente: (Garrido, 2013).**

### 3.7.2.1. Zeolitas

Entre los catalizadores mayormente usados se tiene las zeolitas naturales y sintéticas, tales como, ZSM-5, HUSY, H $\beta$  y HMOR. Son aluminosilicatos cristalinos que al deshidratarse forman en el cristal una estructura porosa y con capacidad de ser un intercambiador iónico (figura 13) (Sharuddin, Abnisa, Daud, & Aroua, 2016).



**Figura 13 - Estructura tridimensional de la zeolita ZSM-5.**  
**a) Estructura de ZSM-5; b) Representación de poro. Fuente: (Lee, 2012).**

Es muy activo en procesos catalíticos debido a su alta cristalinidad, superficie y selectividad. La relación Si/Al determina la reactividad de la zeolita. La presencia de átomos de silicio y aluminio contribuye a la acidez de las zeolitas, lo que afecta a los productos finales de la pirólisis (Sharuddin, Abnisa, Daud, & Aroua, 2016; Olivares, 2013).

Los sitios ácidos favorecen las reacciones de craqueo de hidrocarburos, por lo que las proporciones bajas de Si/Al indican una alta acidez en la zeolita (Sharuddin, Abnisa, Daud, & Aroua, 2016). Sin embargo, la alta acidez y los poros grandes pueden desactivar rápidamente el catalizador. Por lo tanto, es mejor degradar térmicamente las poliolefinas en presencia de un catalizador de larga duración y poco ácido (Almeida & Marques, 2016).

Las cavidades contienen cationes metálicos intercambiables ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , etc) y puede acomodar moléculas invitadas extraíbles e intercambiables. La fórmula general de las zeolitas es:  $\text{M}_{x/n} [(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot z\text{H}_2\text{O}$  donde M es un catión de valencia n, z el número de moléculas de agua y la suma de  $x + y$  indica el número de tetraedros por celda unidad (Gutiérrez, 2015).

Las zeolitas son capaces de realizar intercambio iónico (mediante intercambio total o parcial de cationes  $\text{M}^{+n}$ ), y se utilizan en muchas aplicaciones industriales como procesos de adsorción y separación, desecantes, aditivos para productos de limpieza y procesamiento de energía nuclear. como desechos y desperdicios, suplementos nutricionales para animales y aditivos para el suelo.

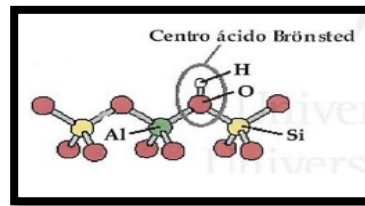
Sin embargo, las aplicaciones más interesantes de estos materiales están relacionadas con el catalizador, debido a que son ampliamente utilizados como catalizadores en la industria petrolera, principalmente en los procesos de craqueo catalítico, alquilación e isomerización de hidrocarburos, por lo que son materiales de gran interés tecnológico (Gutiérrez, 2015).

Las razones de su uso generalizado en catálisis están relacionadas con las siguientes propiedades de las zeolitas:

- Su sistema de canales tiene una gran superficie (alrededor de 1000 m<sup>2</sup>/g) y una alta capacidad de adsorción.
- Tiene propiedades adsorbentes que se pueden ajustar a un sólido hidrófilo o hidrófobo.
- Se pueden formar sitios ácidos en la red cristalina y su fuerza y concentración se pueden adaptar para una aplicación específica.

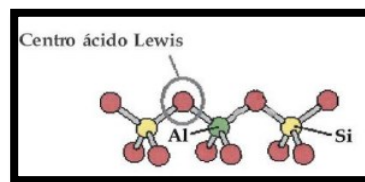
- Las dimensiones de los canales y cavidades (3 – 13 Å) están en el rango típico de dimensiones de las moléculas orgánicas, lo que permite su uso como redes moleculares para la separación de hidrocarburos y otras moléculas.
- Tienen selectividad de forma de reactivos, productos y/o estados de transición debido a sistemas de canales, lo que minimiza la formación de subproductos no deseados.
- Tienen buena estabilidad hidrotermal, química y mecánica y pueden ser reciclados en procesos químicos (Gutiérrez, 2015).

Las principales unidades estructurales de las zeolitas son los tetraedros  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  y  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  conectados a través de vértices comunes para formar puentes de oxígeno no lineales, lo que da como resultado una amplia variedad de estructuras. La actividad catalítica de las zeolitas en procesos catalíticos ácidos se debe principalmente a la presencia de sitios ácidos de Bronsted y ácidos de Lewis, como se muestra en las Figuras 14 y 15 respectivamente (Gutiérrez, 2015).



**Figura 14 - Sitio ácido de brønsted en zeolitas.**

**Fuente: (Gutiérrez, 2015).**

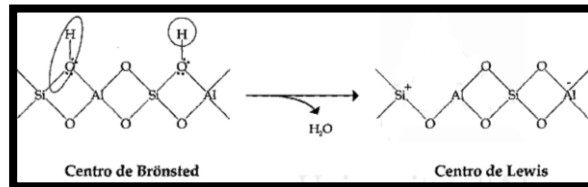


**Figura 15 - Sitio ácido de lewis en zeolitas.**

**Fuente: (Gutiérrez, 2015).**

El centro ácido de Brønsted está asociado con la estructura de aluminio de la zeolita. Estos centros se crean mediante la introducción de protones (la forma ácida de la zeolita) que compensan la carga negativa neta de los átomos de aluminio incrustados en

la estructura de la zeolita. En estos centros se incorporan protones a la estructura de la zeolita (figura 16) (Gutiérrez, 2015).



**Figura 16 - Sitio ácido de Lewis en zeolitas.**

**Fuente: (Gutiérrez, 2015).**

Sin embargo, estos centros de Lewis son particularmente inestables a altas temperaturas y con presencia de vapor de agua, lo que provoca que el aluminio se separe de la estructura, y de esta manera se dé la formación de diversos tipos de óxidos e hidróxidos, que también son centros de Lewis.

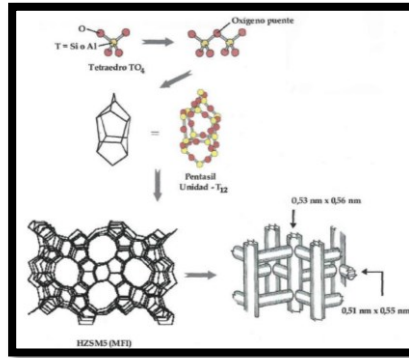
El uso de estos materiales puede mejorar el rendimiento de algunos productos industriales valiosos y aumentar el valor no sólo de los compuestos producidos, sino también del proceso de reciclaje. Además, el uso de catalizadores puede reducir la temperatura requerida para el proceso de pirólisis (You & Kim, 2000).

### 3.7.2.2. Zeolitas HZSM-5

La zeolita HZSM-5 tiene una topología MFI (Zeolite Socony Mobil-five) y se caracteriza por una alta proporción de silicio, lo que da como resultado una relación Si/Al superior a 17 (llamada pentasil debido al alto contenido de Si/Al). aluminio).

Su estructura resulta de la combinación de los ciclos de las cinco cadenas en forma de tetraedro que conectan las láminas constituyentes interconectadas, dando como resultado la estructura característica de este tipo de zeolitas, como se muestra en la Figura 17. La unión de varias laminas se da de forma que exista una relación de inversión entre el centro de la síntesis y todas las láminas que se encuentran cercanas (Gutiérrez, 2015).

La estructura resultante es tridimensional, con simetría ortorrómbica y representa dos sistemas de canales elípticos que se cruzan: uno rectilíneo y otro sinusoidal. Ambos canales ingresan a través de aberturas formadas por un anillo de 10 átomos de oxígeno de casi 6 Å de diámetro (Gutiérrez, 2015).



**Figura 17 – Representación Esquemática de la Estructura de la zeolita HZSM-5.**

**Fuente: (Gutiérrez, 2015).**

La zeolita Pentasil ofrece un excelente potencial de aplicación en las industrias petroquímica y de química fina debido a su tamaño de poro, alta resistencia térmica e hidrotérmica y alto contenido de ácido.

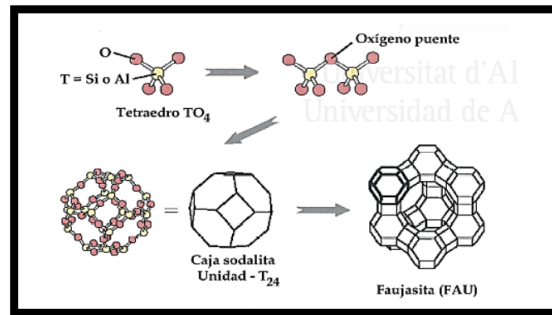
A diferencia de las zeolitas HY(HUSY), no presentan cavidades, sino solo puntos de intersección donde existe una cantidad mínima de espacio libre adicional correspondiente al tamaño del poro mismo (Gutiérrez, 2015).

### 3.7.2.3. Zeolitas HUSY (HY)

La zeolita HY(HUSY) es una zeolita sintética isomórfica cuya topología pertenece al grupo FAU (Faujasite) y cuya relación Si/Al está entre 3 y 6. La fórmula empírica por celda unitaria se muestra a continuación:  $\text{Na}_{56}[(\text{AlO}_2)_{56}(\text{SiO}_2)] \cdot 250\text{H}_2\text{O}$  el cual contiene 192 tetraedros por cada una de las celdas.

La unidad estructural básica de esta zeolita es la sodalita, que está compuesta de octaedros truncados compuestos por 24 tetraedros de silicio y/o aluminio dispuestos para producir seis ventanas de cuatro miembros y ocho ventanas de seis miembros. Las conexiones entre diferentes unidades de sodalita se producen a través de puentes de

oxígeno a través de la superficie con ventanas de seis miembros, lo que da como resultado la estructura que se muestra en la Figura 18 (Gutiérrez, 2015).



**Figura 18 – Representación esquemática de la estructura de la zeolita HY.**

**Fuente: (Gutiérrez, 2015).**

La zeolita HY tiene una gran cavidad central (12Å) conectada tridimensionalmente a las siguientes unidades mediante canales de incidencia limitada de doce átomos con un espacio libre de 7,4 Å. Cuando la zeolita HY es sometida a diversos tratamientos de eliminación y estabilización de aluminio, se convierte en zeolita HUSY (zeolita HY ultraestable) (Gutiérrez, 2015).

Según (Lee, 2012) quien realizó un estudio sobre los efectos de tres tipos de zeolitas en la pirólisis de residuos plásticos en la planta Dongmyong RPF Co. (Corea del Sur), utilizando un reactor comercial de tipo horno rotatorio (Lee, 2012). Las zeolitas utilizadas fueron la HZSM-5, zeolita Y (HY) y mordenita (HM), siendo estas, de tipo comercial. Las propiedades físicas de las zeolitas se presentan en la tabla 5 (Lee, 2012).

**Tabla 5 - Propiedades físicas de las zeolitas.**

**Fuente: (Lee, 2012).**

Zeolita	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (proporción en peso)	Área de superficie (m <sup>2</sup> /g)
HZSM-5	30	400
HY	80	780
HM	6.44	-

La pirólisis se lleva a cabo en un reactor utilizando zeolita a 450 °C durante 1 h, produciendo productos líquidos, gaseosos y sólidos. La tabla 6 muestra la distribución del producto.

**Tabla 6 - Distribución de los productos obtenidos de la pirólisis.**

**Fuente: (Lee, 2012).**

<b>Zeolita</b>	<b>Líquido (%W)</b>	<b>Gas (%W)</b>	<b>Sólido (%W)</b>
<b>HZSM-5</b>	47.18	51.07	1.78
<b>HY</b>	66.98	28.95	4.08
<b>HM</b>	82.59	15.11	2.3

Luego, el producto líquido debe destilarse para producir combustibles como gasolina (hidrocarburos C5-C10), mezclas de queroseno y diésel (hidrocarburos C11-C20) y petróleo pesado (hidrocarburos C21 y superiores) que pueden craquearse. Se muestran en la imagen. Productos enumerados en la Tabla 7.

**Tabla 7 - Porcentaje en peso de los combustibles obtenidos.**

**Fuente: (Lee, 2012).**

<b>Zeolita</b>	<b>Gasolina (%W)</b>	<b>Diésel + Queroseno(%W)</b>
<b>HZSM-5</b>	86.22	13.78
<b>HY</b>	82.92	14.27
<b>HM</b>	39.87	13.90

Con lo cual encontró que la zeolita HZSM-5 es la mejor opción para la obtención de gasolina a partir del producto líquido de la pirólisis de desechos plásticos, con un 86.22%w, seguido de la HY con 82.92 %w y por último la HM con 39.87 %w donde (%w) es porcentaje en peso.

### **3.8. Inhibidores y Retardadores de Polimerización**

La adición de determinadas sustancias puede impedir la polimerización de monómeros y resinas insaturadas. Estos agentes actúan reaccionando con radicales

iniciadores y/o propagadores, convirtiéndolos en no radicales o radicales con muy baja reactividad con radicales iniciadores y/o propagadores. En la polimerización, las sustancias añadidas a las reacciones en cantidades muy pequeñas provocan una rápida disminución de la velocidad de polimerización, que se puede clasificar en dos tipos según su eficacia: inhibidores y retardadores (Ramis, 1994).

Los inhibidores neutralizan todos los radicales libres, independientemente de si proceden del iniciador, del centro activo de las cadenas o del monómero. La polimerización se detiene hasta que se agota el inhibidor. Los retardadores son mucho menos eficaces que los inhibidores y neutralizan sólo algunos de los radicales. En este caso, la polimerización puede ocurrir, pero mucho más lenta (Ramis, 1994).

Algunos investigadores atribuyen el mecanismo responsable de la inhibición a la desactivación de los centros de iniciación o a una reducción en el ritmo de su generación, mientras que el retraso se considera una interrupción de la progresión de la cadena (Ramis, 1994).

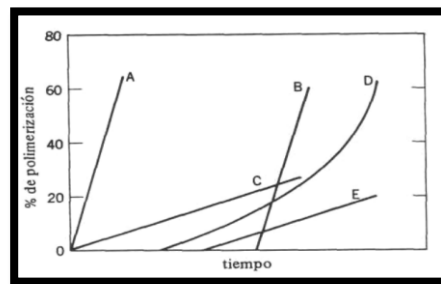
Dependiendo de la concentración, las sustancias de la misma clase pueden actuar como inhibidores, retardadores o ambas cosas al mismo tiempo. La diferencia entre inhibidores y retardadores es la magnitud, no cómo se produce la inhibición o el retraso. Por lo tanto, las sustancias que actúan como inhibidores o retardadores suelen agruparse bajo el término general inhibidores. En general, la adición de un inhibidor detiene la polimerización y la adición de un retardador ralentiza la velocidad de polimerización (Ramis, 1994).

La Figura 19 idealiza el grado de polimerización e ilustra los fenómenos de bloqueo y retardo. En la curva A se muestra una polimerización típica. La curva B representa la inhibición ideal y muestra cómo la polimerización se detiene por completo durante el período o tiempo de inducción. Al final de este período, cuando el inhibidor se ha consumido por completo, la polimerización avanza al mismo ritmo que sin el inhibidor (Ramis, 1994).

La curva C representa el retraso ideal y muestra cómo la polimerización comienza al mismo tiempo que sin retraso, pero a un ritmo más lento. La curva D representa una inhibición no ideal, donde la polimerización comienza después de un período de inducción, pero ocurre a una velocidad diferente que cuando no hay inhibidor presente.

La curva E muestra inhibición y luego retraso. En este caso, la inhibición ocurre inicialmente y la polimerización comienza solo cuando se usa una cierta cantidad de inhibidor, luego la polimerización ocurre con un retraso (Figura 19).

Los inhibidores y retardadores ideales eliminan los radicales libres sin reiniciar la polimerización ni producir elementos que luego puedan reaccionar con otros radicales libres. De esta forma, no existe interacción entre la cadena de crecimiento y las semillas formadas durante el proceso de inhibición y frenado (Ramis, 1994).



**Figura 19 - Inhibidor y Retardo.**

**Fuente: (Ramis, 1994).**

En el caso más simple, el inhibidor puede ser un radical libre muy estable, como para iniciar una cadena. En este caso, el mecanismo de inhibición es, simplemente, la unión o desproporción de radicales. En cuanto el inhibidor es una molécula, la química de la inhibición es mucho más compleja y, posiblemente, el producto formado sea un radical demasiado estable para iniciar una cadena (Ramis, 1994).

Existen varias sustancias que pueden actuar como inhibidores o retardadores, mediante un proceso de transferencia de cadena entre el inhibidor y la cadena que se propaga. Existe la opción de modificar la estructura molecular de los polímeros y, como resultado modificar la química de descomposición de estos. Las de sustancias que se pueden utilizar como inhibidores de la polimerización es muy amplia, las empresas al realizar la elección de un inhibidor específico, se basa en consideraciones de rendimiento y rentabilidad del reactivo (Levchuk, 2010).

Sin embargo, existen requisitos comunes a todos los inhibidores de polimerización: buena solubilidad en hidrocarburos, alto rendimiento de inhibición, bajo costo y disponibilidad (Levchuk, 2010).

### **3.9. Resistencias y Tipos Calentamiento para Pirólisis**

Existen diferentes tipos y formas de calentamiento para la pirólisis entre las más usadas para el calentamiento están los siguientes:

- Circuitos de calefacción;
- Transferencia de calor en procesos químicos;
- Calderas de fluido térmico;
- Calentamiento por inducción.

#### **3.9.1. Transferencia de Calor en Procesos Químicos**

La transferencia de calor de un líquido a otro está involucrada en todos los procesos químicos, ya sea calentar las piezas antes de que comience una reacción química, obtener el producto final o enfriar los químicos después de que se forman durante la reacción (Pirobloc S.A, 2022).

Maximizar la eficiencia de los sistemas de transferencia de calor en los procesos químicos es de vital importancia ya que la transferencia de calor en muchos procesos químicos consume mucha energía por lo que puede aumentar innecesariamente los costos de fabricación si no se prioriza la eficiencia (Pirobloc S.A, 2022).

Esto nos lleva hacia el conocimiento de algunas variables muy importantes dentro del proceso productivo, tales como:

- Las propiedades físicas y la composición química de los fluidos;
- Caudales del proceso;
- Temperaturas y presiones del sistema;
- Caída de presión admisible.

La corrosión de algunos productos químicos es otro aspecto para considerar, ya que el equipo debe fabricarse con aleaciones resistentes a la corrosión. Esto es particularmente relevante para elementos como los intercambiadores de calor (Pirobloc S.A, 2022).

### 3.9.2. Calderas de Fluido Térmico

Una aplicación importante en diversos campos de la química es el calentamiento de reactores, que se logra mediante carcasas "semicirculares", placas calefactoras dobles o bobinas dentro del reactor (Figura 20). Los reactores se utilizan no sólo en la industria química, sino también en otros sectores, como por ejemplo en la industria alimentaria. Sin embargo, aquí se puede encontrar una amplia gama de aplicaciones, incluyendo química, química fina, cosmética, farmacéutica y pinturas (Pirobloc S.A, 2022).

Estas aplicaciones y usos pueden requerir el calentamiento de otros consumidores como intercambiadores de calor, columnas de destilación, evaporadores y tanques. La calefacción de cada consumidor se puede controlar por separado con válvulas que controlan el flujo de gasóleo para calefacción a través del sistema (Pirobloc S.A, 2022).

Las calderas de termofluido tienen importantes ventajas para la industria, ya que ofrecen temperaturas entre  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que permite calentar y enfriar. Esta versatilidad es importante para el control gradual de la temperatura de reacciones exotérmicas o procesos de producción, donde el sistema puede controlar con mucha precisión todos los cambios de temperatura en el reactor. En términos de mantenimiento y operación, las calderas de aceite térmico son más fáciles de gestionar que otros sistemas, ya que el riesgo de corrosión y formación de incrustaciones se puede evitar con un mantenimiento sencillo (Pirobloc S.A, 2022).



**Figura 20 - Caldera de Fluido Térmico.**

**Fuente: (Pirobloc, 2022).**

### **3.9.3. Calentamiento por Inducción**

La máquina de recipiente del reactor de calentamiento por inducción consta de cuatro componentes principales: fuente de alimentación, bobina de trabajo, sistema de enfriamiento y sistema de control de temperatura (Figura 21). La fuente de alimentación genera corriente alterna (CA) que se envía a la bobina de control. El serpentín de operación consta de tubos de cobre que forman una espiral alrededor de la vasija del reactor. Cuando una corriente alterna fluye a través de la bobina operativa, induce un campo magnético que interactúa con la vasija del reactor (Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda, 2020).

La inducción tiene muchas ventajas que no se pueden lograr con otros métodos, y la ausencia de pérdidas significativas de calor al medio ambiente garantiza una mayor eficiencia en la producción de dispositivos y mejores condiciones de trabajo. El sistema es especialmente adecuado para procesos de reacción estrictamente controlados, como la producción de resinas sintéticas en zonas potencialmente explosivas (Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda, 2020).

Existen innumerables beneficios al utilizar el calentamiento por inducción. Una de las cosas más importantes es que existe contacto físico entre la bobina de inducción y la pared del recipiente calentado, lo que permite un uso más eficaz del calor. Sus características importantes son el inicio y parada rápidos del funcionamiento y la ausencia de inercia térmica (Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda, 2020).

Tiene un calentamiento uniforme, altamente eficiente, amigable con el medio ambiente, que tiene bajos costos de operación, tiene la capacidad de trabajar a altas temperaturas, es fácil de usar y se puede decir que tiene un mantenimiento mínimo, por lo que podemos decir, que el calentamiento por inducción es uno de los procesos más adecuados en la planta de pirólisis (Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda, 2020).



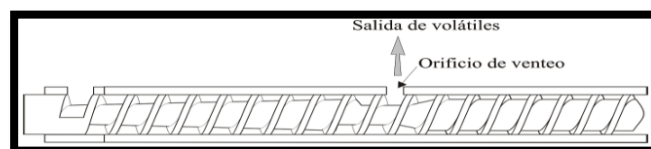
**Figura 21 – Calentamiento por Inducción.**

**Fuente: (Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda, 2020).**

### **3.10. Sistema de Desgasificación**

La desgasificación sólo es necesaria en plásticos con muchos componentes volátiles o materiales muy higroscópicos como las poliamidas. También se utiliza en extrusoras utilizadas en líneas de mezcla. Los materiales con una humedad de equilibrio muy elevada se pueden secar antes de pasar al extrusor, aunque el proceso de secado es lento (puede tardar entre 4 y 40 horas), por lo que se suele desgasificar directamente en el extrusor, siendo así una forma más rápida (Beltrán & Marcilla, 2012).

La desgasificación se realiza a través de las ventilaciones del cilindro. Las extrusoras equipadas con una zona de ventilación deben tener un diseño de tornillo especial, de modo que la presión en esta zona sea igual a la presión del aire y así el material no pueda filtrarse a través de la ventilación. En este tipo de extrusora, los pellets de plástico pasan por una zona de alimentación y transferencia donde son recogidos, transportados y fundidos (figura 22) (Beltrán & Marcilla, 2012).



**Figura 22 - Extrusora con sección de desgasificado.**

**Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)**

El material fundido y desgasificado se recomprime en una nueva zona de transición, como se muestra en la Figura 22. Estos tornillos deben estar adecuadamente diseñados para que la zona de desgasificación esté siempre parcialmente llena y el material no se escape por el orificio de ventilación. Además, aumenta el rendimiento de bombeo de la segunda sección del tornillo. (tras el orificio de venteo) debe ser superior a la de la primera (Beltrán & Marcilla, 2012).

## 4. **Desarrollo del Reactor de Pirólisis de plásticos**

### 4.1. **Consideraciones Generales**

Para que el proceso de pirólisis de plásticos sea eficiente y se obtenga los resultados esperados y beneficiosos, debemos tomar en cuenta que el volumen de los plásticos que van a ser insertados en el reactor.

En el inicio del proceso de la pirólisis se incrementó un sistema de alimentación que se encargara de recibir el plástico a través de una tolva y sucesivamente el transportarlo, este se lo llevara a cabo por medio de un tornillo sinfín. Durante el transporte realizara de modo paralelo un proceso de precalentamiento del material antes de entrar a su descomposición en el reactor. Será necesario realizar varios cálculos para el diseño de cada una de las partes de este sistema, los mismos que tendrán que cumplir con ciertas especificaciones para así poder obtener un proceso mucho más eficaz.

Cuando el material haya cumplido con su precalentamiento pasara hacia el siguiente proceso que es la entrada al reactor, cuando el reactor llegue a su volumen máximo el sistema se cerrara herméticamente para proceder al calentamiento del reactor estas temperaturas a la que estará expuestas varían entre los 400 °C y 500 °C.

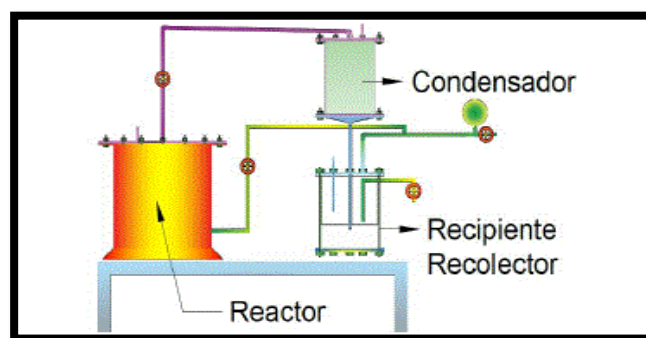
El tipo de reactor utilizado es de tipo Bach, ya que es uno de los más conveniente al tener un sistema de calentamiento mediante una chaqueta se consigue realizar un control de temperatura mucho más preciso, de menor costes en su fabricación, un fácil control de las variables, así como un tiempo de pirólisis indeterminado.

El método de calentamiento se lo realizará por inducción para mejor aprovechamiento de calor y de esta manera le proceso de pirólisis sea más eficiente, así se podrá aprovechar al máximo todo el calor generado ya que al estar en contacto con el reactor este tiene un mayor eficiencia, por ende, una menor perdida de calor. Se realizará un sistema de control de la temperatura mediante sensores y así poder monitorear el incremento de calor en las celdas.

Después de este proceso el plástico se convierte en gas y este es transportado por varias tuberías pasando por condensadores hasta convertirse en líquido. Los condensadores serán el método de refrigeración del proceso de la pirólisis, el plástico al

descomponerse forma gases los mismo que tiene que ser condensados para convertirlo en oleo pirolítico.

Se realizo un diseño esquemático del proceso de pirólisis en donde desglosan los procesos y diseños de estos para consecuentemente proceder a la simulación y diseño de este prototipó con la ayuda de un asistente CAD (figura 23), cada uno de los cálculos realizados en capítulos consecuentes están basados en algunos artículos científicos asi como también en documentos referentes a estos temas, algunas de las fórmulas usadas fueron tomadas de (Gomez & Bedoya, 2007).

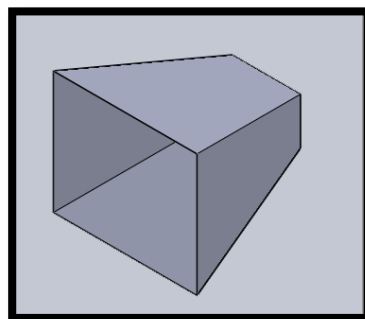


**Figura 23 – Esquema del equipo utilizado para la Pirólisis de Plásticos.**

**Fuente: (Rejas, Bicma, Maribel, Lilian, & Milena, 2015)**

#### **4.2.Diseño de la Tolva Para la Entrada del Plástico**

De acuerdo con el análisis realizado para el prototipo de la máquina de pirólisis de plásticos se llegó a determinar que el diseño de la tolva será dimensionado bajo las consideraciones de medidas y geometría de los diferentes tipos de plásticos (figura 24).



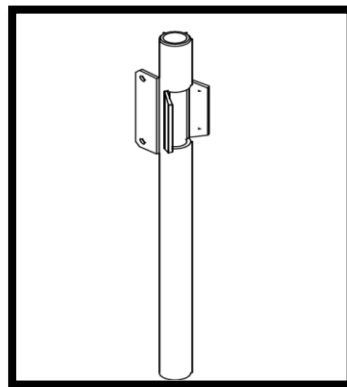
**Figura 24 - Diseño de la tolva para la entrada de plásticos.**

Para la construcción de la tolva se seleccionó tol galvanizado debido a que su principal característica evitar la oxidación y corrosión producida por la humedad y contaminación ambiental, también porque es fácil de encontrarlo y a un costo bajo.

### 4.3. Cilindro y Base del Husillo

Se llama así al cuerpo de la máquina que, junto con el tornillo de extrusión, forma las cámaras de fusión y presurización del extrusor. es decir, un cilindro que rodea el tornillo, como se muestra en la Figura 25. El cilindro debe ser compatible y duradero con el material que se está procesando. Fabricado en metal con la dureza necesaria para minimizar el desgaste (Acurio, 2018).

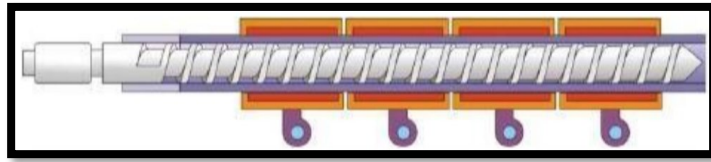
El tornillo se instala en el interior del cilindro, su superficie debe ser muy rugosa para resistir la fuerza de corte del material a lo largo del extrusor, y en el exterior la resistencia eléctrica se encuentra distribuido. en toda su longitud para que la transferencia de calor sea suficiente para derretir el plástico (Acurio, 2018).



**Figura 25 – Estructura del cilindro para soporte del tornillo.**

**Fuente: (Acurio, 2018).**

El propio cilindro soporta el peso del eje y debe estar fabricado de acero duradero para que no haya problemas de aumento de temperatura durante el transporte del plástico. También está rodeado por una resistencia eléctrica circular distribuida en toda su longitud, como se muestra en la Figura 26.



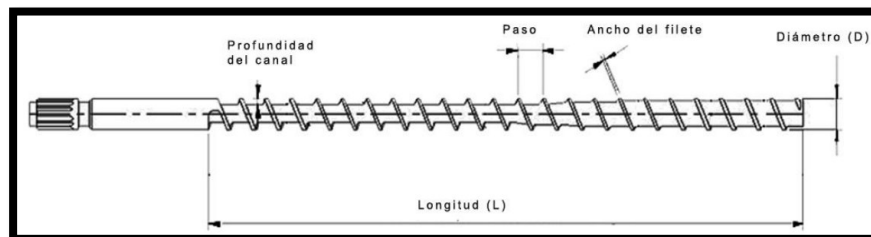
**Figura 26 - Sistema del cilindro y husillo.**

**Fuente: (Acurio, 2018).**

Las resistencias de inducción son el método de precalentamiento que tendrá el sistema y esta se encuentran divididas en tres partes a lo largo de su longitud, cada una de ellas con su respectivo control.

#### **4.4. Calculo y Diseño de un Tornillo Sinfin (Husillo)**

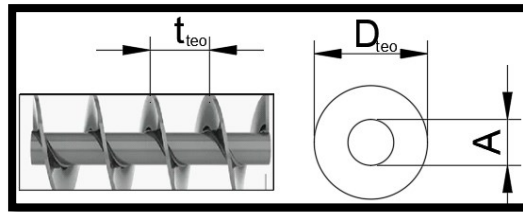
Para la creación del husillo se debe tener en cuenta varios factores como son su longitud ( $L$ ), diámetro ( $D_{teo}$ ), el ángulo del filete ( $\varphi$ ) y el paso de rosca ( $t_{teo}$ ) (figura 27) estos valores serán tomados de la tabla del anexo A.



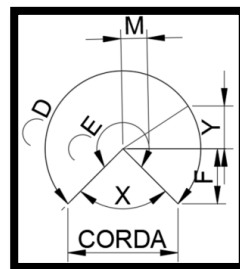
**Figura 27 - Tornillo sinfin o husillo.**

**Fuente: (Tecnología de los Plasticos, 2011)**

Antes que nada, será necesario realizar los cálculos teóricos del helicoidal, estos valores servirán como referencia para diseño del tornillo, para fines de cálculo se escogió un tipo de material a pasar por el tornillo sinfin en este caso se escogió el PP (polipropileno) (ver anexo B) en este anexo encontraremos las características de los materiales plásticos. En la figura 28 y 29 encontramos varios de los parámetros referenciales para realizar el cálculo teórico de un tornillo sinfin.



**Figura 28 – Partes del husillo.**



**Figura 29 – Factores de diseño del husillo.**

De acuerdo con los valores del anexo A se tiene que  $D_{teo} = 25.50$  mm y según Savgorodny quien afirma que el diámetro del tubo es semejante o aproximado a el paso del husillo  $t=D$  por tanto la helicoide fue diseñada respetando este principio, mientras que en el caso del diámetro interior se lo realizo em bases al anexo en mención restando la profundidad del canal con respecto a la base obtenido el valor de 16.1mm.

Para los siguientes análisis de cálculos se procedió a tomar valores teóricos tomados de la tabla del anexo A y posteriormente a demostrarlos con los valores prácticos usados en su construcción, entre las variables más importantes tenemos  $D_{teo}$ ,  $t_{teo}$  e  $A$  donde:

$D_{teo}$  - Diámetro exterior del helicoide.

$t_{teo}$  - Paso del Husillo.

$A$  - Diámetro interior del tubo.

De acuerdo con los valores dados en la tabla del anexo A se procede al cálculo de valores faltantes los cuales son muy importantes para el diseño del sistema de transporte de plásticos (husillo) entre las variables más importantes a calcular tenemos (ver tabla 8).

**Tabla 8 – Variables para el diseño del husillo.**

**Fuente: (Fábrica do Projeto, 2017).**

<b>Variable usada</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Numero de Ecuación</b>
$P_{mayor}$	Perimetro Mayor	$P_{mayor} = \sqrt{(D_{teo} * \pi)^2 + t_{teo}^2}$	(Ecuación 1)
$P_{menor}$	Perimetro Menor	$P_{menor} = \sqrt{(A * \pi)^2 + t_{teo}^2}$	(Ecuación 2)
$F$	Lado	$F = \frac{D_{teo} - A}{2}$	(Ecuación 3)
$X$	Grados	$360 - \left( \frac{360 * (P_{mayor} - P_{menor})}{2 * \pi * F} \right)$	(Ecuación 4)
$Y$	Radio Mayor	$Y = \frac{(P_{mayor} * P_{menor})}{(P_{mayor} - P_{menor})}$	(Ecuación 5)
$M$	Radio Menor	$M = \frac{P_{menor} * F}{(P_{mayor} - P_{menor})}$	(Ecuación 6)
<i>Cuerda</i>	<i>Cuerda</i>	$Cuerda = 2 * Y * \text{sen} \frac{X}{2}$	(Ecuación 7)

Los valores encontrados anteriormente son valores teóricos, en el presente trabajo se usaron valores aproximados para que de esta manera procedamos a su diseño mediante la herramienta CAD.

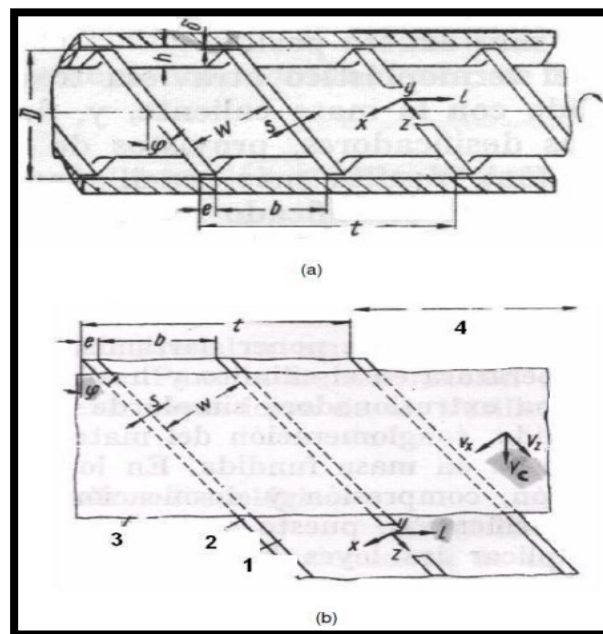
Para el diseño del husillo se usaron algunos de los valores encontrados mediante el uso de las ecuaciones de la tabla 8 tomando en cuenta cada una de las variables como rozamiento, viscosidad del material a transportar, así como variables de tamaño de material cada uno de los valores encontrados cumplen con el principio de construcción de un husillo respetando cada uno de los pasos de su diseño.

Para la realización de los cálculos de los elementos del tornillo sinfín se usó como referencia ciertos valores y normativas referidos en los capítulos siguientes los mismos que serán aplicados durante su diseño.

En términos matemáticos el trabajo de una extrusora puede obtenerse aplicando las ecuaciones de acuerdo con las leyes de la conservación de la masa, energía y número de movimientos, con las cuales se describe el estado físico de un líquido a presión (en este caso, plástico fundido). En la figura 30 se muestra esquemáticamente un cilindro con husillo monocanal (Gomez & Bedoya, 2007).

En el husillo se obtienen unas direcciones positivas en los ejes X, Y, Z del sistema de coordenadas fijas y los ejes auxiliares (L) vienen indicadas con flechas (figura 31). El eje (Y) es perpendicular al plano seccionado, (Z) se dirige en sentido longitudinal y (X) es transversal al canal helicoidal; (L) va dirigido de manera longitudinal al husillo (Gomez & Bedoya, 2007).

El ángulo en espiral del canal del tornillo aumenta desde un valor mínimo en el diámetro exterior hasta un valor máximo en el núcleo del tornillo. Este ángulo está determinado por la Ecuación 8 (Gomez & Bedoya, 2007).



**Figura 30 - Sección de husillo y cilindro del canal a) Vista general, b).**

**Fuente: (Gomez & Bedoya, 2007).**

Para encontrar el ángulo de helicoides se lo puede realizar mediante el uso de la ecuación 8. Según el análisis tenemos que  $t = D$  obteniendo así el valor correcto de este del ángulo de la helicoides.

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t_{teo}}{\pi * D_{teo}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Esto se puede aplicar para cualquier tipo de diámetro cumpliéndose que  $t = D$ . De la figura 30 (a), donde se muestra el ángulo de inclinación de la hélice se tiene que:

$h$  - Profundidad del canal.

$V$  - Velocidad de cualquier partícula de la masa del canal en el punto X y.

$W$  - Anchura del canal.

$V_z$  - Componente de la velocidad tangencial o circunferencial a lo largo del canal.

$V_c$  - Velocidad circunferencial del cilindro con relación al husillo.

$L$  - Distancia en la dirección del eje en el punto considerado.

$e$  - Anchura de la cresta.

Para simplificar los cálculos, sólo se considera el valor mínimo del ángulo de hélice correspondiente al diámetro exterior de la rosca. Esto se debe a que, en el caso de tornillos con ranuras de poca profundidad, este ángulo cambia muy poco (Gomez & Bedoya, 2007).

Independientemente de la curvatura del canal, el canal se puede desplegar en un plano, como se muestra en la Figura 30(b). En este caso, el cilindro está representado en forma de un plano infinito 3 y se mueve en dirección perpendicular al eje 4 delante del canal 1 del husillo y de la rosca desarrollada 2. La velocidad circunferencial del cilindro,  $V_c$ , se puede descomponer en dos componentes verticales entre  $V_z$  y  $V_x$ , que están orientadas longitudinal y lateralmente con respecto al canal del husillo. La velocidad de la masa fundida en cada punto del canal se caracteriza por los componentes analógicos  $V_z$  y  $V_x$  (Gomez & Bedoya, 2007).

La masa fundida se mueve en la dirección Y con velocidad  $V_y$ , manteniendo la velocidad  $V_x$  un flujo continuo. Esta velocidad es mayor en las paredes delantera y trasera del canal donde la masa fundida que fluye lateralmente cambia la dirección del flujo.

Dado que el componente  $V_y$  surge sólo del cambio en la velocidad  $V_x$  debido al flujo cruzado, su efecto sobre la producción de  $V_x$  es insignificante. Por lo tanto, asumiremos  $V_y = 0$  de ahora en adelante (Gomez & Bedoya, 2007).

Siguiendo con el cálculo y diseño del tornillo sinfin se tiene los siguientes subcapítulos los mismos que contienen ecuaciones que ayudaran a calcular características y condiciones de diseño de este.

#### 4.4.1. Intervalos de Velocidad de Cortadura

Experimentalmente, se ha descubierto que la mayoría de los plásticos fundidos exhiben algún grado de comportamiento reológico pseudoplástico. En la Figura 31, se puede verificar que a medida que el espacio aumenta, la pendiente se convierte en una curva más suave, por lo que se cree que el rango de velocidad de corte " $log \dot{\gamma}$ " al que se puede aplicar el método de extrusión es limitado. Este diagrama muestra el rango utilizable y la velocidad de corte varía según el tipo de reómetro. Para plastómetros de extrusión de varios tipos de procesamiento (Acurio, 2018).

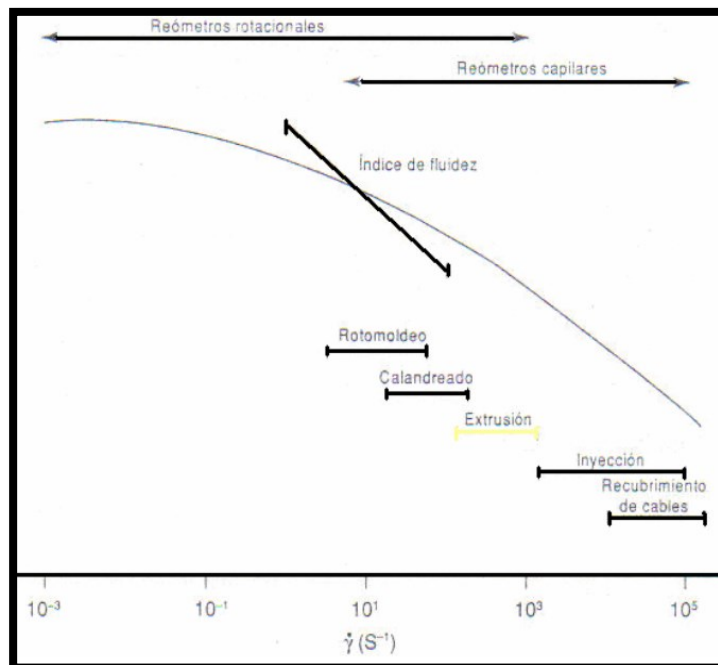
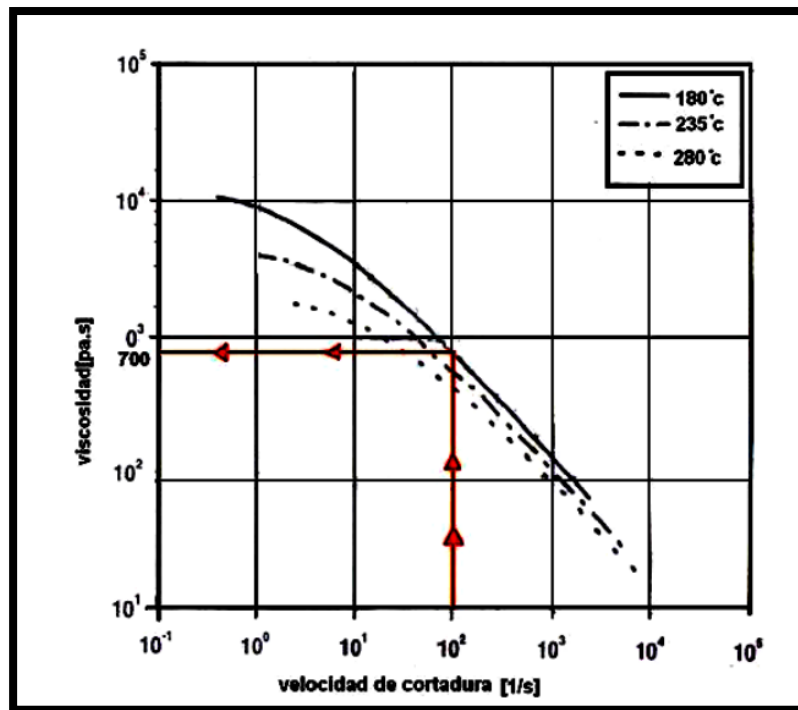


Figura 31 - Intervalos de velocidad de cortadura.

Fuente: (Gomez & Bedoya, 2007).

#### 4.4.2. Viscosidad Efectiva

La viscosidad efectiva se determina en función de la velocidad de corte utilizando diagramas dibujados para diferentes materiales en función de la temperatura. Esto se debe a que la viscosidad de los termoplásticos depende de este coeficiente y peso molecular. El peso molecular disminuye a medida que el material se calienta, lo que resulta en una disminución del peso molecular. disminuir. Los datos para la velocidad de corte ( $\gamma$ ) de  $100 \text{ s}^{-1}$  se tomaron de las Figuras 31 y 32, y la viscosidad efectiva ( $\mu$ ) y la temperatura de funcionamiento fueron de aproximadamente  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esto da como resultado un valor de viscosidad efectivo de  $700 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (Figura 32) (Gomez & Bedoya, 2007).



**Figura 32 - Intervalos de viscosidad.**

**Fuente: (Gomez & Bedoya, 2007).**

Para entender de mejor manera de el por qué se escogió los valores de diámetros y longitudes en el diseño del tornillo sinfín se realizó el análisis y posteriormente el cálculo de los restantes elementos.

#### 4.4.3. Relación de Longitud del husillo

El tornillo es la parte de trabajo más importante de la extrusora. La fabricación y el funcionamiento de la extrusora dependen del diámetro del tornillo y de la relación longitud/diámetro (L:D), la velocidad y geometría del canal en espiral, el perfil de la rosca y la punta del cabezal y el número de correas, etc (Mariano, 2011).

Normalmente, para la transformación plástica se utilizan extrusoras de tornillo con un diámetro de 9-500 mm, con una relación (L:D) = (6 ÷ 40): 1, pero una relación (L:D) = (20-25): 1 es más común dependiendo del material que se esté procesando y dependiendo del extrusor del objetivo, la máquina se diseña a escala de laboratorio y por lo tanto se construye con un solo canal (Mariano, 2011).

La longitud del husillo es muy importante ya que afecta la productividad y el coste de la máquina. Al alargar el tornillo y alargar la extrusora, se mejorará la capacidad de plastificante así como la productividad de la máquina (Mariano, 2011).

Otro aspecto que se mejora al aumentar la longitud es la calidad de la mezcla y homogeneización del material, por lo que una extrusora pequeña tiene suficiente longitud para eventualmente fundir el material, lo que resulta en una mala mezcla del plástico. En las mismas condiciones, el extrusor más grande funde el material antes de que llegue al final y continúa mezclando hasta quedar homogéneo en el resto del espacio. Esto es importante cuando se trabaja con materiales pigmentados o cuando se utilizan rellenos y aditivos de mezcla base que deben incorporarse completamente al producto (Mariano, 2011).

En este trabajo se eligió aplicar una longitud de 620 mm el mismo que será implementado en el diseño ya que después de analizar lo antes dicho la longitud del husillo es directamente proporcional al diámetro del husillo por lo cual tenemos que el diámetro es de 25.5 mm y su longitud de 620 mm estos valores serán tomados de referencia para el cálculo de elementos del husillo.

Se toma como medida para el diámetro 25.5 mm ya que esta medida corresponde al diámetro interior de la camisa tomada inicialmente como base para el diseño. En el Anexo A se presentan en forma tabulada los parámetros geométricos del husillo, sin embargo, a continuación, se comprueban estos valores por medio de las ecuaciones 9 y 10, presentadas por Savgorodny.

- **Paso del Husillo (t)**

Mediante la ecuación 9 se puede comprobar de manera teórica el valor que el dado en el cuadro del anexo A es semejante al calculado mediante la ecuación que es presentado a continuación.

$$t_{teo} = \pi * D_{teo} * tg\theta \quad (Ecuación 9)$$

Donde el diámetro teórico es el valor que base que se obtiene del diámetro externo del husillo el mismo que a su vez será multiplicado por pi ( $\pi$ ) y por la tangente del ángulo el mismo que fue calculado mediante la ecuación 8.

- **Ancho del filete (e)**

Para calcular el ancho de filete según Savgorodny se lo debe de hacer mediante la ecuación 10.

$$e = 0.12 * D_{teo} \quad (Ecuación 10)$$

donde el diámetro externo del husillo se debe multiplicar por la constante de 0.12 obteniendo así el valor correspondiente a la tabla del anexo en mención.

#### 4.4.4. Tolerancias del Tornillo y el Cilindro ( $\delta$ )

Hace referencia a la medida del espacio entre el pico del filete del husillo y la superficie interna del cilindro tiene una gran importancia en la elaboración y diseño de un sistema de tornillo sinfín, pues si el espacio es mayor la mezcla del material tendrá una mejor efectividad, pero el avance disminuye del mismo por agrandar el flujo inverso del material. Por lo general se emplea un husillo con diámetro constante, manteniendo un espacio entre el cilindro y el husillo de  $0.002 * D$ . Por motivos de cálculo se aceptó este valor que es el más cercano de acuerdo con las especificaciones de nuestro diseño (Gomez & Bedoya, 2007).

$$\delta = 0.002 * D_{teo} \quad (Ecuación 11)$$

#### 4.4.5. Cálculo de Números de Filetes del Husillo

Para el cálculo de número de filetes es necesario realizarlo por medio de la relación de longitud diametral que está comprendido por el diámetro del husillo y el número de filetes, este se puede obtener mediante el uso de la ecuación 12.

$$filetes = \frac{L}{D_{teo}} \quad (Ecuación 12)$$

donde:

$L$  - Longitud del husillo.

$D_{teo}$  – Diámetro del husillo.

Desarrollando la ecuación 12 se puede obtener la cantidad de filetes que se necesita para su respectivo diseño.

#### 4.4.6. Cálculo de Revoluciones del Husillo

Para realizar el cálculo de las revoluciones que va a tener el husillo en cuanto al transporte de material es necesario basarse en la fórmula de la velocidad de cortadura la cual tiene para este caso un valor de  $100 \text{ s}^{-1}$  (figura 31). Mediante la ecuación 13 y 14 se puede usar la relación de variables para encontrar este valor.

$$\gamma = \frac{\pi * D_{teo} * \eta}{h_2} \quad (Ecuación 13)$$

Donde:

$\gamma$  - Velocidad de cortadura (figura 31).

$\eta$  - Revoluciones del husillo (rps).

$h_2$  – Altura de canal (ver anexo A).

Despejando la formula inicial tenemos que las revoluciones totales del husillo son dadas de acuerdo con la ecuación 14 la misma que en su valor final deberá ser expresada en revoluciones por minuto (rpm).

$$\eta = \frac{\gamma * h_2}{\pi * D_{teo}} \quad (Ecuación 14)$$

#### 4.4.7. Cálculo de Relación de compresión (Z)

El término relación de compresión se usa más comúnmente en el diseño de tornillos porque ayuda a calcular la profundidad de la ranura y la degradación asociada con la rotación a alta velocidad. La ecuación numero 15 nos ayuda a encontrar la relación de compresión que se produce en el tornillo, este valor se calculó en base a la estructura del tornillo con valores de  $h_1 = 4.76$  mm y  $h_2 = 1.5$  mm (ver anexo A) (Gomez & Bedoya, 2007).

$$Z = \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{Ecuación 15})$$

#### 4.4.8. Cálculo de la potencia requerida

La potencia determina la velocidad a la que se realiza una acción porque se puede expresar como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo (potencia = trabajo/tiempo). Si se conoce los conceptos básicos de física, sabrás que trabajo = fuerza \* distancia, lo que equivale a una unidad de par.

Se sabe que la velocidad del motor se mide en rpm (rotaciones por minuto), sin embargo, si multiplicas el par por la velocidad del motor, obtienes  $F \times D / 60$  segundos, que es exactamente lo mismo que potencia. Según Savgorodny, el factor de proporcionalidad del plástico es ( $fp = 66,7$ ). Considerando el diámetro y la velocidad de rotación del husillo, la potencia exacta requerida se puede obtener mediante la ecuación 16 (Gomez & Bedoya, 2007).

$$\eta = \frac{fp^2 * N}{\pi * D_{teo}^3} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

$N$  - Cálculo de Potencia.

$\eta$  - Numero de Revoluciones.

$fp$  - Factor de Proporcionalidad este valor es dado por Savgorodny.

Desarrollando la ecuación 16 podemos llegar a obtener la potencia total requerida para la maquina esta se obtendrá mediante la ecuación 17.

$$N = \frac{\eta * \pi * D_{teo}^3}{fp^2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

#### 4.4.9. Variables para la Producción del Tornillo

El flujo volumétrico (Q) se expresa como producción de tornillo, que es el resultado de tres tipos de flujo diferentes. El flujo de arrastre ( $\alpha$ ) es el componente más grande causado por la rotación del tornillo. El flujo de presión ( $\beta$ ) es un componente que se opone al flujo y al flujo del filtro (y) en el sistema, reduciendo así la pérdida de material que ocurre entre los espacios del tornillo-barril (Gomez & Bedoya, 2007).

Por lo tanto, la producción en la zona de dosificación corresponde a la producción total del tornillo, en la figura 33 se muestra un esquema del diagrama de velocidades de flujo.

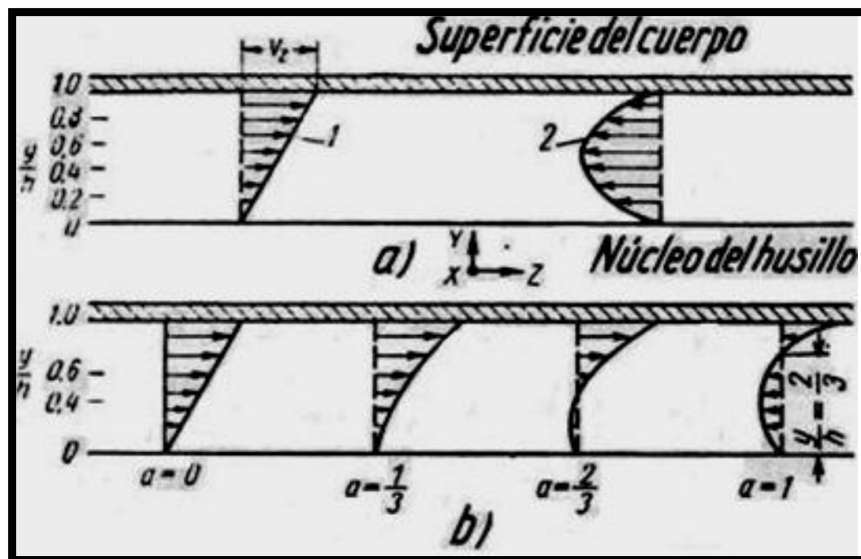


Figura 33 - Diagrama de velocidades de flujo.

Fuente: (Gomez & Bedoya, 2007).

Según Savgorodny, el flujo volumétrico Q se puede determinar de la siguiente manera:

$$Q = \left( \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} \right) * \eta \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

$\alpha$  - Flujo de arrastre o fricción.

$\beta$  - Flujo de Presión.

$\gamma$  - Flujo de filtración.

$k$  - Constante de la Cabeza.

$\eta$  - Revoluciones del husillo.

$m$  - Numero de Canales (teniendo de base 1) dicho en párrafos anteriores ya que el tornillo es de un único canal (figura 30).

Para la realización del cálculo de este flujo volumétrico es necesario encontrar ciertas variables para así encontrar el valor correcto entre los valores más importantes tenemos el flujo de arrastre ( $\alpha$ ), flujo de filtración ( $\gamma$ ), flujo de presión ( $\beta$ ) y constante total de la forma de la cabeza perfiladora ( $k$ ). Antes de realizar los análisis de las ecuaciones es necesario entender las variables que van a ser usadas para encontrar estos valores ya que algunas de ellas fueron mencionadas y calculadas mediante las ecuaciones anteriores (Gomez & Bedoya, 2007).

#### 4.4.9.1. Flujo de arrastre o fricción

Este flujo se da cuando el material transportado genera rozamiento entre él mismo y la máquina, es de mucha importancia ya que aquí se podría controlar la producción a la salida del tornillo.

$$\alpha = \left( \frac{\pi * m * D_{teo} * h_1 \left( \frac{t_{teo}}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 19})$$

donde:

$h_1$  - Profundidad del canal en la zona de borde (ver anexo A)

$\varphi$  - Angulo de hélice

$e$  - Ancho de la cresta.

$t_{teo}$  - Paso.

#### 4.4.9.2. Flujo de Presión

$$\beta = \left( \frac{m * h_1^3 * \left( \frac{t_{teo}}{m} - e \right) \sin\varphi * \cos\varphi}{12 * L} \right) \quad (\text{Ecuación 20})$$

donde:

$L$  - Longitud del husillo

Mediante esta variable se consigue verificar que el flujo de plásticos que pasa a través del tornillo sea el deseado y de esta verificar que no existan presiones en contra o algunos contratiempos dentro del proceso.

#### 4.4.9.3. Flujo de Filtración

Este flujo es calculado mediante la ecuación 21.

$$\gamma = \left( \frac{\pi^2 * D_{teo}^2 * \delta^3 * \tan\varphi}{10 * L * e} \right) \quad (\text{Ecuación 21})$$

donde:

$\delta$  - Holgura del Filete.

Esto generalmente se hace desarrollando la ecuación de filtración, que es más interesante ya que esta sirve para observar el desgaste de filete, pero no se incluye en los cálculos, aunque aún así se puede incluir un control por pérdidas en la producción.

De acuerdo con la figura 33 (a) la velocidad varía en forma lineal con la profundidad del canal helicoidal mientras que en la figura 32 (b) la velocidad varía según una ley parabólica. Sumando ambos diagramas se logra la velocidad real en cualquier punto cuando sale libremente el material  $a = 0$ ; y cuando está cerrada la salida  $a = 1$ .

#### 4.4.10. Constante Total de la Cabeza del Husillo (k)

Según Savgorodny, para determinar la constante k (coeficiente de la forma de la cabeza) esta se divide convencionalmente en sucesivas zonas de diferente configuración, estableciendo para cada una de estas zonas la constante (k) (Acurio, 2018).

Como en este caso vamos a tener un canal cilíndrico se le va a realizar el cálculo de la constante de la cabeza utilizando la siguiente fórmula que fue planteada por Savgorodny la misma que necesitara algunos valores ya calculados anteriormente.

$$k = \left( \frac{\pi * D_{teo}^4}{128 * L} \right) \quad (\text{Ecuación 22})$$

donde:

$k$  - Constante de la Cabeza.

$D_{teo}$  - Diámetro del canal del dado.

$L$  - Longitud del canal.

Regresando a la ecuación 18 para obtener el flujo volumétrico resulta oportuno emplear los valores calculados anteriormente y una velocidad de 112 rpm calculados mediante la ecuación número 14 ya que el plástico al ser un material a degradarse tenemos que tener una velocidad pequeña para que el proceso de descomposición funcione por esta razón se decidió tomar como un valor de partida, para cálculo del flujo volumétrico para en el tornillo procedemos al reemplazar los valores en nuestra ecuación principal así tenemos.

Según Savgorodny, de esta ecuación se puede obtener la producción del tornillo sinfin a la salida del, pero para obtener una consistencia dimensional se exige que los datos se presenten en kg/h. Siendo la densidad específica de los plásticos en una media de 0.00095 kg/cm<sup>3</sup> (anexo D) se tiene que:

$$prod = (Q) * densidad \quad (\text{Ecuación 23})$$

donde:

$Q$  - Flujo Volumétrico.

$densidad$  - Densidad de los plásticos.

*prod* - Producción.

Este valor será el material que encontremos aproximadamente a la salida de nuestro tornillo sinfín el mismo que será colocado en el reactor esto suponiendo que la velocidad es de 112 rpm (revoluciones por minuto).

#### 4.4.11. Presión en el tornillo sinfín

En relación con la presión que se va a realizar siempre va a ser en la parte delantera por la cual va a pasar a salir el material después del proceso, pues de aquí se derivan algunos cálculos para la construcción de dicha máquina.

- **Presión Máxima**

Según (Savgorodny, 1978) la presión máxima de la maquina se la calcula a través de las siguientes ecuaciones donde para efectos de cálculo no hay flujo de arrastre así que se toma a  $Q = 0$  y la viscosidad efectiva de 700 Pa\*s (figura 32), de esta manera y con la ayuda de la ecuación 24 se puede obtener el valor de la presión máxima que puede soportar a máquina.

$$P_{max} = \frac{6 * \pi * D_{teo} * L * \eta * \mu}{h_2^2 * \tan\theta} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

$P_{max}$  - Presión máxima.

$\mu$  - Viscosidad efectiva.

$N$  - Potencia.

#### 4.4.12. Cálculo de Fuerzas del Husillo

Se realizaron cálculos de resistencia para confirmar las dimensiones encontradas anteriormente para el husillo y determinar la fuerza máxima permitida (flecha). El husillo tiene una fuerza axial (P), el momento de giro (Mg) y una carga uniformemente



construcción. A continuación de este valor será necesario calcular la relación entre los diámetros del husillo para ello empleamos la fórmula 26 para posteriormente realizar el cálculos de fuerzas que sean de prioridad para el cálculo de este.

$$R_{diam} = \frac{A}{D_{teo}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

$A$  - Diámetro interno.

$D_{teo}$  - Diámetro externo.

$R_{diam}$  - Relación de diámetros del husillo.

El siguiente cálculo involucra la determinación la superficie transversal del husillo (F) el mismo que es seccionado por A-A como se presenta en la figura 34:

$$F = \frac{\pi * D_{teo}^2}{4} * (1 - R_{diam}^2) \quad (\text{Ecuación 27})$$

A su vez se calcula el momento de inercia (I) de la sección transversal A-A de la figura 34 mediante el empleo de la ecuación 28.

$$I = \frac{\pi * D_{teo}^4}{64} * (1 - R_{diam}^4) \quad (\text{Ecuación 28})$$

Después de realizar cada uno de los cálculos mediante el uso de las ecuaciones anteriormente mencionadas se pueden obtener los valores iniciales para el cálculo de fuerzas en el husillo, estas se determinan fácilmente mediante la siguiente fórmula:

$$P = F * P_{max} \quad (\text{Ecuación 29})$$

Donde:

$F$  - Superficie de la sección transversal del husillo.

$P_{max}$  - Presión máxima soportada.

$P$  - Presión específica.

Seguido de esta ecuación se puede realizar el cálculo de la sección tangencial sobre la superficie del husillo este está dada por la ecuación 30.

$$\tau = \frac{16 * Mg}{\pi * D_{teo}^3 * (1 - R_{diam}^4)} \quad (\text{Ecuación 30})$$

De acuerdo con que las tensiones normales van a ser provocada por una fuerza axial P y una carga repartida dada por q, las tensiones máximas van a surgir en el apoyo del husillo para lo cual se aplica la ecuación 31 y se consigue determinar las cargas repartidas a lo largo del husillo.

$$q = \frac{\text{peso del tonillo}}{L} \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

q - Cargas repartidas en el husillo

Para fines de cálculos y de acuerdo con (Gomez & Bedoya, 2007) el peso de un husillo de características similares al de este trabajo es de 3.44 kg por lo tanto em bases este valor se realizará el cálculo de las cargas y demás cálculos a futuro. Siguiendo con el cálculo se tiene que el momento de flexión máximo es dado por la ecuación 32.

$$Mf = \frac{q * L^2}{2} \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde:

Mf - Momento Flector.

Con estos valores ya definidos podremos ir a escoger el tipo de material y verificar el material más resistente y menos costoso que se encuentra en el mercado esto será abordado en el siguiente subcapítulo.

#### 4.5. Selección y Comportamiento de los Materiales

Para efectos de cálculos y simulaciones será necesario usar el valor calculado mediante la ecuación 29 la cual es la carga específica que soportara el husillo, así como también la presión máxima que fue calculado mediante la ecuación 24. Teniendo en cuenta los parámetros anteriores y sabiendo que la temperatura estará entre los 97 °C la mínima y 500 °C de máxima. Con estas características procedemos a escoger un material

que sea bajo en costo y tenga alto desempeño esto mediante el uso de las ecuaciones de la 33 a la 39.

$$costo = cm * \rho * L * Ar \quad (Ecuación 33)$$

donde:

*costo* – Costo total del material.

*cm* – costos por material.

$\rho$  – densidad de material.

*Ar* – Área de la barra circular.

*L* - Longitud de la barra circular.

Con esta ecuación partimos para desglosarla y encontrar las variables que nos sirven para encontrar el mejor costo y material para la construcción. En la ecuación 34 se desglosa el área de la barra circular esta nos servirá para incluirla en nuestra ecuación 33.

$$Ar = \pi * r^2 \quad (Ecuación 34)$$

Donde:

*r* – radio.

Para este cálculo se toma como referencia la tolerancia de tornillo la misma que fue calculada mediante la ecuación 11 la misma dándonos como resultado 0.05 mm, este valor será nuestra tolerancia máxima de radio. Continuando con las variables necesarias tenemos que el cálculo de la resistencia mecánica se lleva a cabo por medio de la ecuación 35 y la inercia por medio de la ecuación 36, estas ecuaciones son fundamentales para despejar nuestra variable principal (*r*) la misma que se encuentra presentada en la ecuación 37.

$$\sigma = \frac{F * L * r}{4I} \quad (Ecuación 35)$$

donde:

*F* - Carga Máxima.

*I* – Inercia de una Viga Circular Sujeta a Flexión.

$\sigma$  - Resistencia Mecánica.

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$r = \left( \frac{F * L}{\pi * \sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ecuación 37})$$

Una vez encontrada la ecuación que nos ayuda a encontrar el valor del radio se procede a reemplazarla en la ecuación principal en este caso en la ecuación 33 obteniendo de esta manera la ecuación 38, la misma que ayudara a encontrar el índice de desempeño del material.

$$\text{costo} = cm * \rho * L * \pi * \left( \frac{F * L}{\pi * \sigma} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Ecuación 38})$$

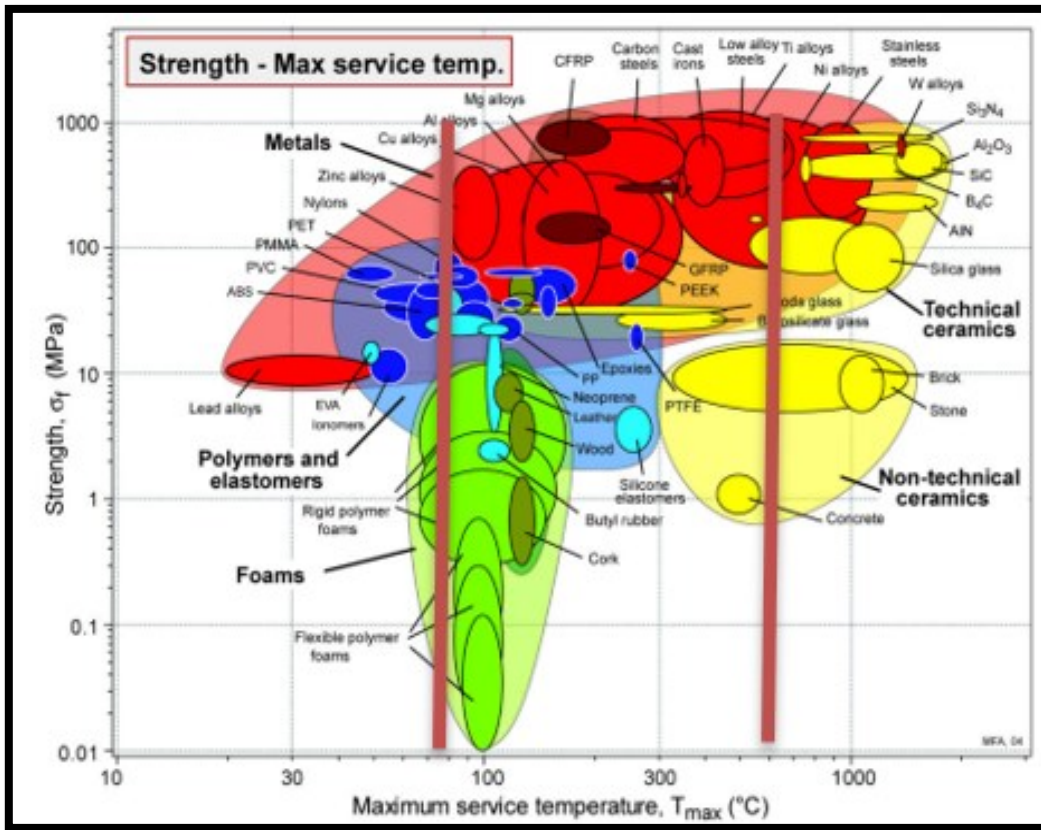
En la ecuación 38 se procede a eliminar las variables que conocemos y a su vez al resultado de esta ecuación se le realiza la inversa obteniendo de esta manera el índice de desempeño el cual es de suma importancia para elegir los materiales todo esto se lo realiza a través de la ecuación 39.

$$M = \frac{\sigma^{\frac{2}{3}}}{\rho * cm} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Donde:

$M$  – índice de desempeño.

Todos esta ecuaciones anteriormente mencionadas fueron necesarias para realizar la selección del material las mismas que se encuentran en el anexo E, siguiendo con el sistema de cálculo y selección de materiales tenemos las tablas que nos ayudan a seleccionar materiales que cumplan con el proceso y resistan a las variables de construcción. Así Vamos a la tabla y vemos los posibles materiales (figura 35, 36 y37).



**Figura 35 - Materiales en función de la temperatura.**

**Fuente: (Mike Ashby, 2010).**

Sabiendo que las temperaturas están entre 97 y 500 °C se procede a descartar aquellos materiales que no estén cumpliendo con estas especificación como se puede ver en la figura 35 todos los materiales que están en el rango de temperatura pueden ser una opción sin antes olvidarnos que existen más factores que deben cumplir.

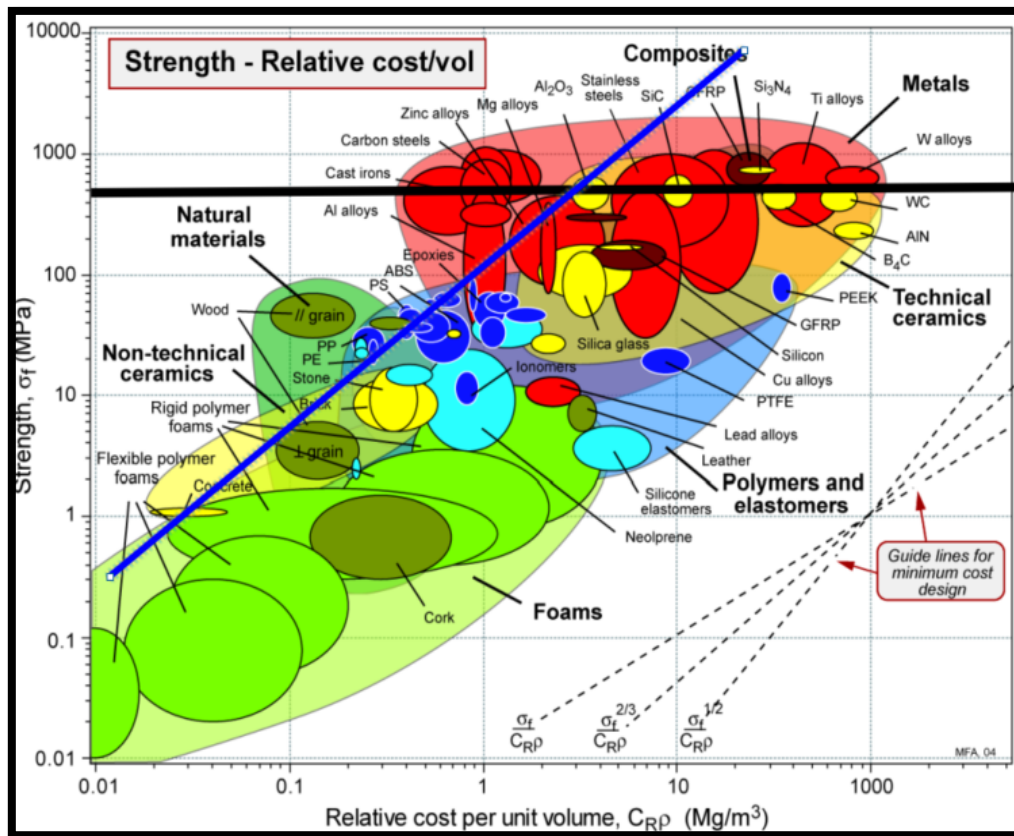


Figura 36 - Materiales de acuerdo con su módulo y de acuerdo con su costo.

Fuente: (Mike Ashby, 2010).

Para continuar a descartar materiales nos basamos en la figura 36 la misma que nos ayuda a tomar valores que estén dentro del índice de desempeño deseado (línea azul), y a su vez descartar valores que estén por debajo de la presión deseada para de esta manera tomar los elementos que se encuentran en este rango.

Este es el último filtro (línea negra) ayuda a descartar todos los materiales que su presión máxima este por debajo de la requerida en este caso menores a 545 MPa, en la figura 36 se muestra los materiales que podrían ser usados en la fabricación de este tornillo. Estos valores fueron basados de acuerdo con el documento de (Ashby, University, Department, & Desig, 2016) donde encontramos estos valores para su posterior cálculo.

Para la selección del material del husillo tenemos que tomar en cuenta el tipo de trabajo a realizar, el tipo de químico con el cual se va a tratar y los factores mecánicos

que podrían afectar a la pieza, ya que este soportara una temperatura entre 97 °C a 500 °C. Pues para esto se ha optado en elegir un acero 4140 (ver anexo C), ya que este cuenta con los factores necesarios para el tipo de trabajo a realizar.

**Tabla 9 - Tabla de materiales posibles y que cumplen los estándares para la construcción.**

<b>Material</b>	<b><math>\sigma_y</math>(Pa)</b>	<b>cm</b>	<b><math>\rho</math> (<math>\frac{kg}{m^3}</math>)</b>
Al alloys	265x10 <sup>6</sup>	4.40	5400
Cu alloys	265x10 <sup>6</sup>	7.45	8900
Ni Alloys	585x10 <sup>6</sup>	18	8900
Carbon steels	605x10 <sup>6</sup>	0.55	7850
Cast Iron	465x10 <sup>6</sup>	0.57	7200
<b><u>Low Alloys Steel</u></b>	<b><u>950x10<sup>6</sup></u></b>	<b><u>0.59</u></b>	<b><u>7850</u></b>

Para escoger el mejor material se pudo observar que el acero de baja aleación (Low Alloys Steel) es una de las mejores opciones garantizando su resistencia a las altas temperaturas así como también a elevadas presiones a las que van a estar expuestas. Pues en la industria este material se lo utiliza para tornillo, perforadoras, válvulas, ruedas dentadas, etc.

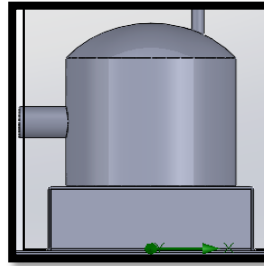
El acero 4140 que hace parte de los aceros de baja aleación tiene un alto soporte sobre la corrosión por lo que contiene Cromo, por lo tanto, tiene un buen valor de dureza, otra característica fundamental de este es que puede soportar hasta temperaturas de 540 °C que sería ideal para la máquina ya que este puede trabajar a un ritmo enorme de trabajo con altas temperaturas sin perder sus propiedades.

- **Maquinabilidad**

Para la maquinabilidad de este acero se utiliza acero AISI 1213. Como puede ver en el Anexo C, existen varios tipos de acero y tipos de acero para la fabricación de husillos. Con las características de este anexo se puede ver que la mejor opción es el acero 4140.

## 4.6. Calculo y Dimensionamiento del Reactor

Para el dimensionamiento y construcción del reactor se tuvo realizo una serie de cálculos para saber las características necesarias que debe tener nuestro reactor y así tener valores acertados durante su funcionamiento. En la figura 37 se puede observar el diseño de un reactor de pirólisis de tipo batch el mismo que es usado en este trabajo.

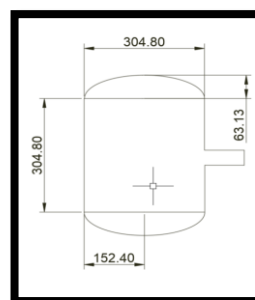


**Figura 37 - Reactor de pirólisis.**

Para poder obtener las características de construcción del cilindro se procedió a realizar los cálculos del volumen y el área, y así poder es la capacidad del tanque, estas componentes serán calculados mediante las ecuaciones de la 41 a la 44.

### 4.6.1. Cálculo de Volumen del Cilindro

Sabiendo los datos iniciales de diseño se procede a calcular el volumen cumpliendo con los datos que se encuentran en la figura 38.



**Figura 38 – Cilindro del reactor.**

Partiendo de las medidas obtenidas de la figura anterior con las cuales se va a diseñar nuestro reactor se procede a realizar el cálculo mediante el uso de las siguientes ecuaciones.

el volumen del cilindro se lo calcula mediante la siguiente ecuación.

$$V = \pi * r^2 * h \quad (\text{Ecuación 40})$$

Donde:

$V$  - volumen del cilindro.

$r$  - radio.

$h$  - altura del cilindro sin contar con los cascos.

Los cascos del cilindro son calculados mediante la siguiente ecuación.

$$V_c = \frac{\pi * h * (3r^2 + h^2)}{6} \quad (\text{Ecuación 41})$$

Donde:

$V_c$  - volumen de los cascos.

$r$  - radio.

$h$  - altura de los cascos.

Como tenemos un solo cuerpo sumamos los volúmenes obtenidos tanto de los cascos como del cilindro y así obtener volumen total del cilindro.

#### 4.6.2. Área o Superficie del Cilindro

Para el análisis de superficie del objeto tenemos que dividirlos en diferentes áreas con respecto a la construcción del cilindro así tenemos, tal y cual fue realizado para el volumen del reactor. El área de la base, el área lateral del cilindro y el área de la semiesfera los mismos que son calculados mediante las siguientes ecuaciones.

$$A_{base} = \pi * r^2 \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$A_{lateral} = 2\pi * r * h \quad (\text{Ecuación 43})$$

$$A_{sem} = 2 * \pi * r^2 \quad (\text{Ecuación 44})$$

Donde:

$A_{base}$  – Área de la base.

$A_{lateral}$  - Área lateral del cilindro.

$A_{sem}$  - Área de la semiesfera.

Después de realizar cada uno de los cálculos de área se procede a obtener el área total del cilindro el mismo que permitirá ver cuál es el área máxima del cilindro donde se producirá la pirólisis. También es muy importante saber cuál es la forma de condensación de los gases que se produzcan en el reactor.

#### **4.6.3. Cálculo de Condensador**

Para escoger el condensador, fue necesario varios requisitos principales, entre los más importantes es condensar los gases producidos por la reacción de la pirólisis sabiendo que esos gases al ser condensados se van a convertir en oleo pirolítico con elevada viscosidad por eso es de gran necesidad que el óleo no se quede pegado en las paredes del condensador, para lo cual se pensó en un tipo vertical en la salida del reactor seguidos por otros en forma horizontal para refinar el paso de los gases y al final conseguir obtener un producto con más refinación, para esto fue de utilidad realizar el cálculo de potencia térmica que va a realizar un intercambio de calor (Silva, 2016).

Al dimensionar el condensador, se debe determinar el calor que se debe intercambiar con el gas de pirólisis para capturar el óleo de la pirólisis. Si se sabe que la cantidad de gas de pirólisis es 0.190 kg/s, sólo 0.162 kg/s se condensarán para formar oleo (Silva, 2016).

Por falta de información se utilizaron valores referidos a productos distintos al óleo pirolítico. Los valores utilizados son  $M_{volátiles}$  y  $C_{pvolátiles}$ , la cantidad de gas producida durante la pirólisis es 203.6 J/K, el caudal de oleo es 0.162 kg/s y el calor latente de vaporización es  $3.4 \times 10^5$  J/kg (ver Tabla 11) (Silva, 2016).

**Tabla 10 - Calores específicos de vapores de pirólisis con su potencia por unidad de temperatura.**

Fuente: (Silva, 2016).

	Caudal (kg/s)	Compostos	Cp (J/kmol·K)	MM (kg/kmol)	Cp (J/kg·K)	m·Cp (W/K)
Compostos não condensáveis	2,76×10 <sup>-2</sup>	H <sub>2</sub>	29512,7	2,016	14639,2	1,464
		CH <sub>4</sub>	62083,8	16,04	3870,6	4,354
		CO	31712	28,01	1132,17	9,539
		CO <sub>2</sub>	50686,7	44,01	1151,7	19,92
		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	82887,0	28,05	2955	0,6649
		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	105613,9	30,07	3512,3	0,7025
		C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	126363,9	42,08	3002,9	0,5255
		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	151461	44,09	3435,3	0,1718
		Fração total			Soma	37,346
Compostos condensáveis	0,162	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	80177,4	46,03	1741,9	144,3
		C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	229668	92,14	2492,6	134,3
		C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	274899	136,15	2019,1	25,02
		C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	276440	166,13	1664	21,74
		Fração total			Soma	325,52
				Σm·Cp	362,9	

Teniendo en cuenta estos valores se debe saber también que, la temperatura de salida del gas de pirólisis es de 500 °C y la temperatura a la cual la gasolina hace ebullición es de aproximadamente 97.2 °C, por lo cual las temperaturas de entrada y salida del condensador se estiman que esta entre 500 °C y 97 °C. Para realizar los cálculos necesitamos los valores de algunas de estas variables obtenidos de la Tabla 11. Estos valores se utilizan en la siguiente fórmula:

$$Q_c = \sum(m * Cp)_{volatiles} * (T_{in} - T_{out}) + m_0 * \gamma_{vap} \quad (\text{Ecuación 45})$$

Donde:

$Q_c$  - Calor en el condensador.

$\sum(m * Cp)_{volatiles}$  - Gases volátiles en la pirólisis.

$m_0$  - Caudal de oleo.

$\gamma_{vap}$  - Calor latente de vaporización.

Es necesario conocer estos valores para que los cálculos sean lo más realistas posible. Desarrollando estas ecuaciones, obtenemos el calor producido en el condensador a la salida de la pirólisis. Utilice estos valores para calcular el área de transferencia de calor.

Para determinar el área de transferencia de calor, es necesario utilizar estimaciones del coeficiente de transferencia de calor global normal según (Silva, 2016) el coeficiente

global equivale a 70 Btu/ft<sup>2</sup>·h·°F, de acuerdo con los datos obtenidos de la ecuación anterior la cual nos da el valor de la potencia térmica transferida para los gases de la pirólisis la cual es una variable muy importante para el cálculo del área. Este cálculo del área viene dado por la siguiente expresión (Silva, 2016).

$$Q_c = U * A * \Delta T_{lm} \quad (\text{Ecuación 46})$$

Donde:

$A$  - Área del condensador.

$\Delta T_{lm}$  - Variación de temperatura en el condensador.

$U$  - Calor latente de vaporización.

De acuerdo con el cálculo de la ecuación 45 siendo 201.4 kW la potencia que se intercambia en el condensador según (Silva, 2016) el coeficiente global de transferencia de calor es de 0.397 kW/m<sup>2</sup>\*K teniendo este valor se procede a calcular  $\Delta T_{lm}$ , para ello necesitamos la temperatura del fluido condensante a la salida del condensador. Este valor se puede determinar usando un balance de agua (Silva, 2016).

El balance de agua es dado tal que la potencia intercambiada es 201.3 kW (correspondiente al valor determinado a partir de la Ecuación 45), el caudal de agua utilizado es 1 kg/s, el calor específico del agua es 4.18 kJ/ (kg K), y la temperatura de entrada de agua es de 20 °C (Silva, 2016).

Usando los valores de referencia anteriores tomados de (Silva, 2016) se puede realizar el cálculo de la temperatura del fluido, mientras que para el cálculo de temperaturas se procede a realizarlo mediante las siguientes ecuaciones para ambos casos se lo puede verificar en las ecuaciones a seguir.

$$Q_c = m_{agua} * Cp_{agua} * (T_{aout} - T_{ain}) \quad (\text{Ecuación 477})$$

Donde:

$m_{agua}$  – caudal del agua.

$Cp_{agua}$  – calor específico del agua.

$T_{aout}$  – Temperatura de salida del agua.

$T_{ain}$  – Temperatura de Entrada del agua.

Mediante esta ecuación se debe conseguir despejar la variable faltante que es la temperatura de salida del agua por lo cual despejando esta fórmula tenemos que la temperatura de salida es igual a 68.2 °C, una vez teniendo estos valores podemos emplear la fórmula de diferencias de temperatura que se muestra a seguir (Silva, 2016).

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{in} - T_{aout}) - (T_{out} - T_{ain})}{\ln\left(\frac{(T_{in} - T_{aout})}{(T_{out} - T_{ain})}\right)} \quad (\text{Ecuación 48})$$

Mediante el desarrollo de la ecuación 48 se obtiene la variación de temperaturas, con este valor podemos reemplazar en la ecuación original y así conseguir encontrar el área de transferencia, despejando las variables tenemos la siguiente ecuación.

$$A = \frac{Q_c}{U * \Delta T_{lm}} \quad (\text{Ecuación 49})$$

Este valor calculado a través de la ecuación 49 es el área total del condensador para su diseño. Para efectos de simulación y paso de condensador se optó por diseñar un sistema de condensación en escala manteniendo la misma área optándose por realizar este diseño por espiras y así ayudar a realizar el cambio de temperatura de los gases generados a la salida del reactor (Silva, 2016).

#### 4.7. Sistema Eléctrico y Control

Los dispositivos eléctricos son de gran importancia en el funcionamiento de las máquinas, ya que gracias a estos dispositivos es posible visualizar cantidades eléctricas como resistencia, capacitancia, inductancia, corriente, potencia, carga. Toda la instalación eléctrica es menos visible que el equipo mecánico (Acurio, 2018).

También se encuentran disponibles equipos de control de temperatura para su uso en el proceso de fundición de materiales poliméricos. Para hacer esto, necesitará varios equipos, como resistencias de abrazadera, termopares tipo J y controladores de temperatura. Otro componente importante es el motor reductor que da movimiento a la máquina (Acurio, 2018).

En este trabajo será usado algunos valores encontrados como la potencia necesaria y la fuerza los cuales son necesarios para la selección de algunos materiales para el movimiento del tornillo, mientras que para la selección del sistema de calentamiento

usaremos calentamientos por inducción el mismo que será controlado por sensores para activar y desactivarlos a continuación veremos algunos de los elementos más importantes a considerar para el sistema de control.

#### 4.7.1. Selección del Motor

Gracias a la Ecuación 17, podemos obtener la potencia necesaria para la selección del motor, de acuerdo con el valor encontrado el mismo que es igual a  $1.31 \text{ kW} = 2 \text{ hp}$ , este valor es porque en el mercado no encontramos motores con potencias en específicas, por lo tanto, tomamos un motor que se encuentra disponible para adaptarlo a nuestras necesidades (ver anexo F). Con la ayuda de los datos del anexo F donde se puede verificar cada uno de los valores referenciales de este tipo de motor se optó para adquirir un motor reductor TYPE: MS90L4 como se muestra en la figura 39 cada una de las cara (Electromecanica MM, 2022).



**Figura 39 – Motor tipo MS90L4.**

**Fuente: (Electromecanica MM, 2022).**

#### 4.7.2. Variador de Frecuencia

Para el control de las velocidades del sistema de Tornillo es necesario tener un sistema de control con un variador de frecuencia el mismo que se encarga de controlar la velocidad de un motor eléctrico a velocidades constantes y variables y de esta manera conseguir trabajar a revoluciones constantes durante el paso de los plásticos por el tornillos hasta llegar a el reactor (ABB, 2023).

Con base en los valores de rendimiento y la información técnica, se decidió utilizar un dispositivo del tipo ACS150, el cual está diseñado para ser instalado en diversas

máquinas con velocidades fijas, como mezcladoras, transportadoras, bombas, ventiladores, etc. (Figura 40) (ABB, 2023).



**Figura 40 - ACS150 - micro convertidor de frecuencia.**

**Fuente: (ABB, 2023).**

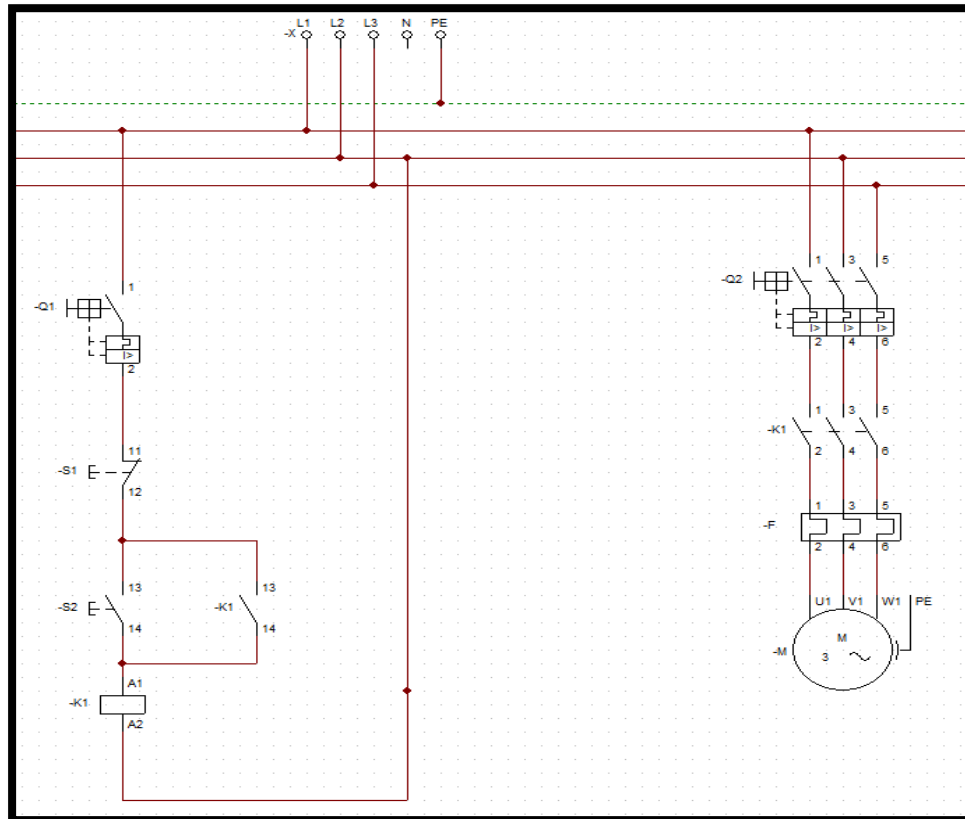
#### **4.7.3. Relé**

Es el elemento que controla el flujo de energía, como un interruptor, y este a su vez es controlado por un circuito eléctrico. Es un dispositivo electromecánico ya que al poseer un electroimán el cual se acciona por medio de contactos los mismos que permiten abrir o cerrar un circuito (Acurio, 2018).

Los relés tienen contactos Normalmente abiertos (NO), Normalmente cerrados (NC) o en algunos casos de conmutación.

- Los contactos normalmente abiertos (NO) conducen corriente sólo cuando el relé está energizado. Para desconectar, el relé debe estar desactivado. Este tipo de contacto se utiliza para operar fuentes de alimentación de alta intensidad (Acurio, 2018).
- Los contactos normalmente cerrados (NC) detienen el flujo de corriente cuando se accionan. Para habilitar esto, debe desactivar el relé. Este tipo de contacto se utiliza cuando se desea que un circuito funcione hasta que se active el relé (Acurio, 2018).
- Los contactos de conmutación estos pueden controlar los dos contactos: los contactos normalmente abiertos (NA) y los normalmente cerrados (NC) con su terminal en común (Acurio, 2018).

Cada uno de los elementos mencionados anteriormente ayudan al control y correcto funcionamiento de los elementos del tornillo, en la figura 41 se puede observar un sistema de control on – off de fuerza y donde serán usados cada uno de los elementos antes mencionados. El diseño de control y esquema eléctrico se lo realizo con la ayuda del programa de simulación CADe\_SIMU, por lo que para la obtención del esquema se tomó en cuenta los elementos eléctricos mencionados para motores eléctricos.



**Figura 41 – Sistema de control del motor ON- OFF.**

#### 4.7.4. Control de Temperatura

El controlador de temperatura mide la temperatura de la sustancia dependiendo de si está conectada o no. Esto se aplica si se pueden medir temperaturas superiores a 300 grados Celsius.

Teniendo en cuenta estas características, seleccionamos el controlador de temperatura de la serie G-XMTD 0-600 Celsius, que es ideal para manejar las altas

temperaturas requeridas para la pirólisis. Este controladore tiene varias características entre las principales tenemos:

- Fácil de instalar e usar.
- Economía de energía
- Seguro e confiable.

Este sistema será encendido y apagado mediante el accionamiento de botones on off teniendo 4 indicadores entre ellos de sistema de encendido, temperatura mínima, máxima y error para así poder tener más control del proceso todo este sistema se lo desarrollo en un PLC Logo siemens con la ayuda del programa CADe\_SIMU.

#### 4.7.5. Logo Siemens

Es un módulo lógico universal para ingeniería eléctrica y electrónica que permite resolver cuestiones cotidianas con mucha mayor facilidad y a bajo costo. Es ideal para solucionar problemas menores de automatización en entornos de instalación donde las máquinas automatizadas parecen excesivas. Toda la programación es fácil usando los 6 botones en el frente. La visualización de programas, estado de entradas/salidas, parámetros, etc. se realiza de forma gráfica en una pequeña pantalla LCD (figura 42).

La corriente continua en los terminales de salida varía según el modelo, pero en todos los casos es inferior a 10 A. Si se requiere una mayor potencia de interrupción, hay disponibles contactores auxiliares de 24-230 V y se pueden conectar directamente hasta 25 A en el raíl del cuadro de protección. En este trabajo se realzo un sistema de control On/ Off para poder visualizar el funcionamiento de los equipamientos.



Figura 42 – Logo Siemens.

## 5. Resultados

### 5.1. Calculo teórico del tornillo

De acuerdo con las ecuaciones 1 a 7 mencionadas en el capítulo anterior y tomando como referencia los valores mencionados en las mismas obtenemos los valores teóricos de construcción de e nuestro husillo, obteniendo como resultados los dispuesto en la tabla 11.

**Tabla 11 - Calculo teórico del husillo.**

<b>CALCULO TEÓRICO DEL HUSILLO</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
D	84.07	mm	Perímetro Mayor	(1)
E	56.64	mm	Perímetro Menor	(2)
F	4.70	mm	Lado	(3)
X	25.65	º	Grados	(4)
Y	14.41	mm	Radio Mayor	(5)
M	9.71	mm	Radio Menor	(6)
cuerda	6.40	mm	Cuerda	(7)

Sin embargo, se precedió a desglosar cada una de estas variables en base a los valores del anexo A, en la tabla 12 mostraremos algunos resultados obtenidos para el diseño del husillo.

Mediante los valores obtenidos de la tabla 12 los cuales son fundamentales para el diseño del tornillo se procede a calcular y obtener la producción total del tornillo estos valores son mostrados en la tabla 13, los valores de las algunas variables usadas están dispuestas en capítulos anteriores.

Después de obtener estos resultados se procede a calcular las presiones y esfuerzos que se van a generar en el tornillo para lo cual usamos las ecuaciones mencionadas en capítulos anteriores obteniendo como resultados (tabla 14).

**Tabla 12 - Variables de Construcción del husillo.**

<b>VARIABLES DE CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
$\varphi$	17.66	° grados	Ángulo de Hélice	(8)
m	1	Mono-canal	Numero de Canales	-
e	3.06	mm	Ancho de la cresta	(10)
$\delta$	0.05	mm	Holgura del Filete	(11)
filetes	24.3	filetes	filetes	(12)
$\eta$	1.87	(rps)	Revoluciones del husillo	(14)
	112	(rpm)		
R_com	3.33	-	Rel. de Compresión	(15)
N	1.32	kW	potencia (N)	(17)

**Tabla 13 - Producción del Tornillo.**

<b>CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DEL TORNILLO</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
Q	429	cm <sup>3</sup> /min	Flujo Volumétrico	(18)
$\alpha$	3.84x10 <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	Flujo de arrastre	(19)
$\beta$	0.090	mm <sup>3</sup>	Flujo de presión	(20)
$\gamma$	1.43x10 <sup>-05</sup>	mm <sup>3</sup>	Flujo de filtración	(21)
k	16.73	mm <sup>3</sup>	Cons.de la Cabeza	(22)
prod	24.43	kg/h	Producción	(23)

**Tabla 14 - Presiones en el Tornillo Sinfín.**

<b>CÁLCULO DE PRESIÓN EN EL TORNILLO SINFÍN</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
p_ máx.	545	MPa	Presión máxima	(24)
Mg	112	N*m	Momento de giro	(25)
R. diámetros	0.63	-	Relación de diámetros	(26)

F	$3.07 \times 10^{-4}$	$m^2$	Superficie Transversal Husillo.	(27)
I	$1.75 \times 10^{-8}$	$m^4$	inercia	(28)
P	$1.67 \times 10^5$	N	Presión específica	(29)
$\tau$	$4.08 \times 10^7$	$N \cdot m^2$	Sección tangencial	(30)
q	5.55	kg/m	Cargas repartidas	(31)
Mf	1.07	N/m	Momento flexión	(32)

Mediante estos resultados obtenidos en la tabla 14 podemos avanzar para la elección de materiales de acuerdo con la necesidad del tornillo por tanto basados en algunos materiales elegidos en capítulos anteriores procedemos a realizar sus cálculos y verificar cual material es el más barato de acuerdo con nuestras especificaciones ver tabla 15.

**Tabla 15 – Análisis de Costos de Materiales.**

**Fuente: (Ashby, University, Department, & Desig, 2016).**

<b>CÁLCULO DE MATERIAL</b>			
material	Índice de desempeño (M)	Radio (r)	Costo total en dólares (USD)
Al alloys	$1.73 \times 10^1$	$5 \times 10^{-2}$	115.54
Cu alloys	6.2	$5 \times 10^{-2}$	322.42
Ni Alloys	4.36	$3.84 \times 10^{-2}$	459.48
Carbon steels	$1.6 \times 10^2$	$3.79 \times 10^{-2}$	12.11
Cast Iron	$1.4 \times 10^2$	$4.14 \times 10^{-2}$	13.72
<b><u>Low Alloys Steels</u></b>	<b><u><math>2 \times 10^2</math></u></b>	<b><u><math>3.26 \times 10^{-2}</math></u></b>	<b><u>9.66</u></b>

De acuerdo con los valores arrojados se eligió trabajar con Acero de baja aleación (Low Alloys Steels) ya que este material cumple con las características deseadas para su futura construcción. Una vez teniendo todos estos resultados se procedió a realizar el análisis del reactor basándonos en los datos anteriormente dados para esto se calculó tanto su volumen como su área (tabla 16 y 17).

**Tabla 16 – Volumen del Reactor.**

<b>VOLUMEN DEL REACTOR</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
V	22.2 x10 <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	volumen del tanque	(40)
Vc	2.4 x10 <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	volumen del casco	(41)
Vt	24.6 x10 <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Volumen total	-

**Tabla 17 - Área del Reactor.**

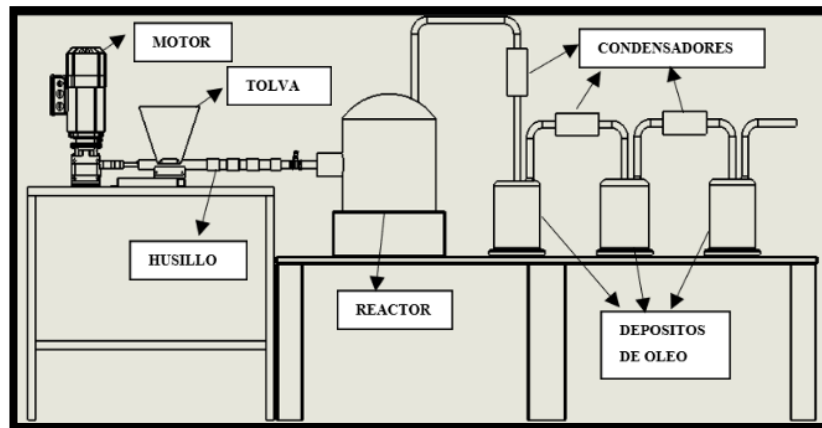
<b>CÁLCULO DE ÁREA</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
A base	729.65	cm <sup>2</sup>	área de base	(42)
A lateral	2.91x10 <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	área lateral	(43)
A semiesfera	1.45x10 <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	área de la semiesfera	(44)
At	5.10x10 <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	Área total	-

Después de realizar estos cálculos se procede a realizar los cálculos de condensadores ya que necesitamos estos valores para poder saber la cantidad de área necesaria para condensar los gases y su consecuente diseño.

**Tabla 18 – Calculo Condensador.**

<b>CÁLCULO DEL CONDENSADOR</b>				
<b>Variable</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b># de Ecuación</b>
Qc	201	kW	Calor en el condensador	(45)
taout	68.1	°C	temperatura de salida del agua	(47)
$\Delta T_{lm}$	205.8	°C	variación de temperaturas	(48)
A	2.46	m <sup>2</sup>	área del condensador	(49)

De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas anteriores se puede proceder al diseño completo del prototipo del proceso de pirólisis en el mismo que se muestra en la figura 43, de acuerdo con esta figura se encuentran todos y cada uno de los elementos mencionados en este trabajo para de esta manera poder acercarnos a un diseño más completo con respecto a la realidad. En el capítulos a seguir se realizará el análisis de fluido usando herramientas CAD.



**Figura 43 – Ensamble de Componentes Diseñados Para la Pirólisis.**

Todos estos diseños de los elementos del sistema de pirólisis se encuentran más a detalle en los anexos G al O.

## **5.2. Análisis del Fluido Usando FlowXpres**

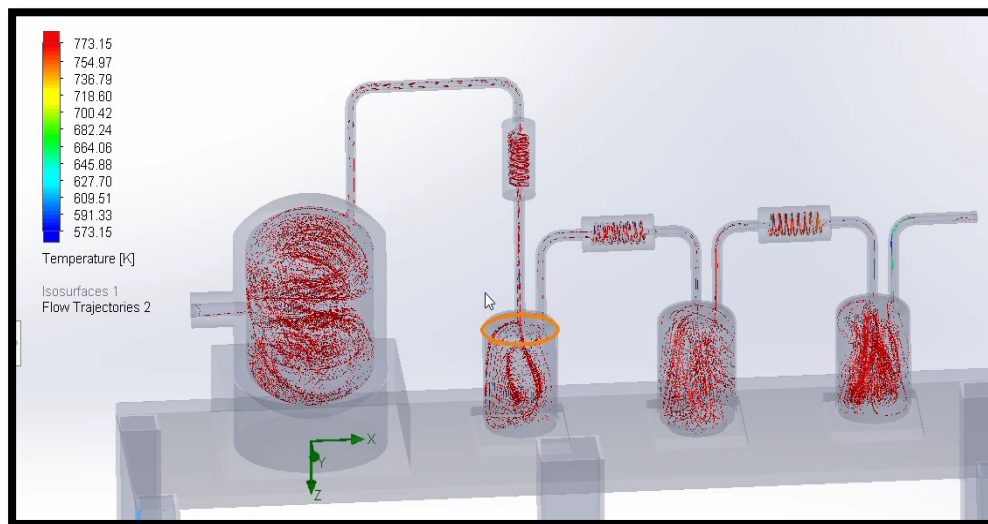
Para mayor percepción de este proceso se realizó un estudio del paso del fluido a través de los diferentes conductos hasta llegar a su condensación lo cual ayuda a saber la cantidad de fluido que se está a generar a través de la pirólisis de plásticos.

Para motivos de cálculo consideró que el fluido a ser usado va a ser el agua por lo cual basándose en las características de pirólisis e los factores a los cuales se deben someterse para motivos de simulación se tomó como valores referentes las temperatura media de 500 °C y una presión máxima de 0.8 MPa.

Mediante la simulación (figura 44) se consideró una velocidad de 0.01 m/s este valor fue calculado de acuerdo con los valores obtenidos del flujo volumétrico y con

respecto al diámetro interno de la tubería el cual fue de 47.6 mm, aplicando formula de la velocidad de un fluido se puede obtener este valor antes mencionado. Con este valor se puede verificar que mediante el paso del tiempo la presión y las temperaturas se mantienen en un valor por debajo de la estipulada a continuación se puede verificar algunas de las imágenes del funcionamiento del sistema de la pirólisis.

Este análisis tiene algunas limitaciones al ser una herramienta para estudiantes, las simulaciones de temperaturas del fluido fueron un poco variables, porque dentro de este análisis no se pueden simular dos temperaturas diferentes tanto en el reactor como en los condensadores y así poder tener una simulación más acertada para el sistema. Para un análisis más detallado se debería usar add-on Flow Simulation, pero por motivos de licencias no fue posible realizarlo.



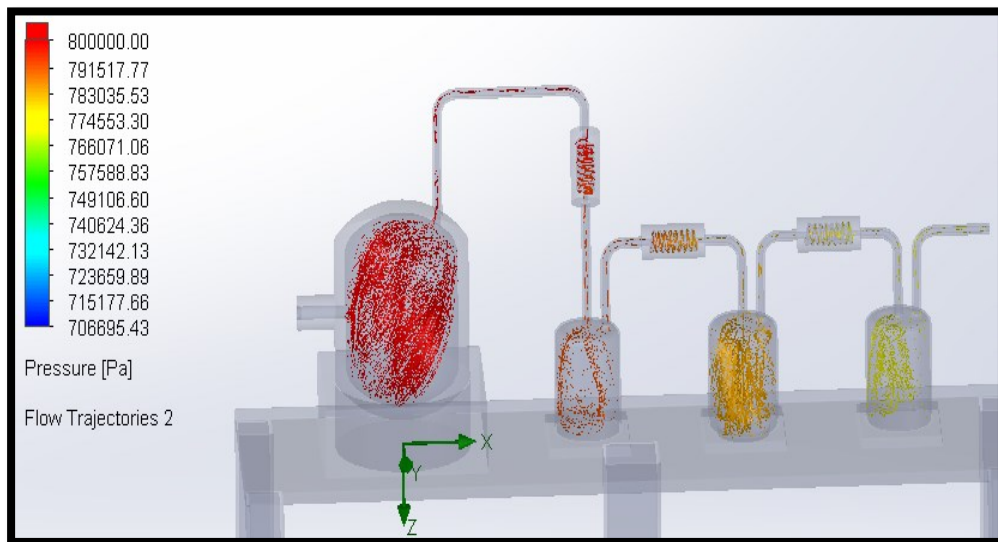
**Figura 44 – Análisis de Temperatura en el Sistema.**

En la figura 44 se puede asimilar que la temperatura dentro del reactor de pirólisis se mantiene en 400 y 500 °C en este caso ya que se está trabajando con el sistema internacional de medidas, la temperatura mostrada en la figura está en Kelvin (°K), para su mayor entendimiento se debe realizar la conversión de grados kelvin a centígrados y de esta manera tener los valores de temperatura antes mencionados.

La temperatura es una variable fundamental dentro de la pirólisis, ya que, con el aumento de esta se va a degradar los residuos de plásticos, es muy importante saber cuáles son las temperaturas internas en el proceso, en la figura 44 se puede ver que la temperatura

varía entre recipientes lo cual es muy importante ya que se sabe que se está realizando una condensación el fluido durante el paso de este por el proceso.

En la figura 45 se puede verificar que la presión existente en la salida del reactor siendo más elevadas en la entrada llegando a ser máximo su valor 0.8 MPa y su mínimo 0.7 MPa, mediante el paso del fluido este se va estabilizando y bajando su presión al pasar por los condensadores de esta manera su disminución de presión es evidente en la salida del sistema.



**Figura 45 – Análisis de la Presión en la Salida del Sistema.**

Mediante la simulación de la presión total del sistema, se puede verificar como este varia en cada una de las partes, verificando ciertas variaciones de presión existentes. Con la ayuda de esta simulación se puede ver de manera más completa el funcionamiento del sistema a partir del reactor.

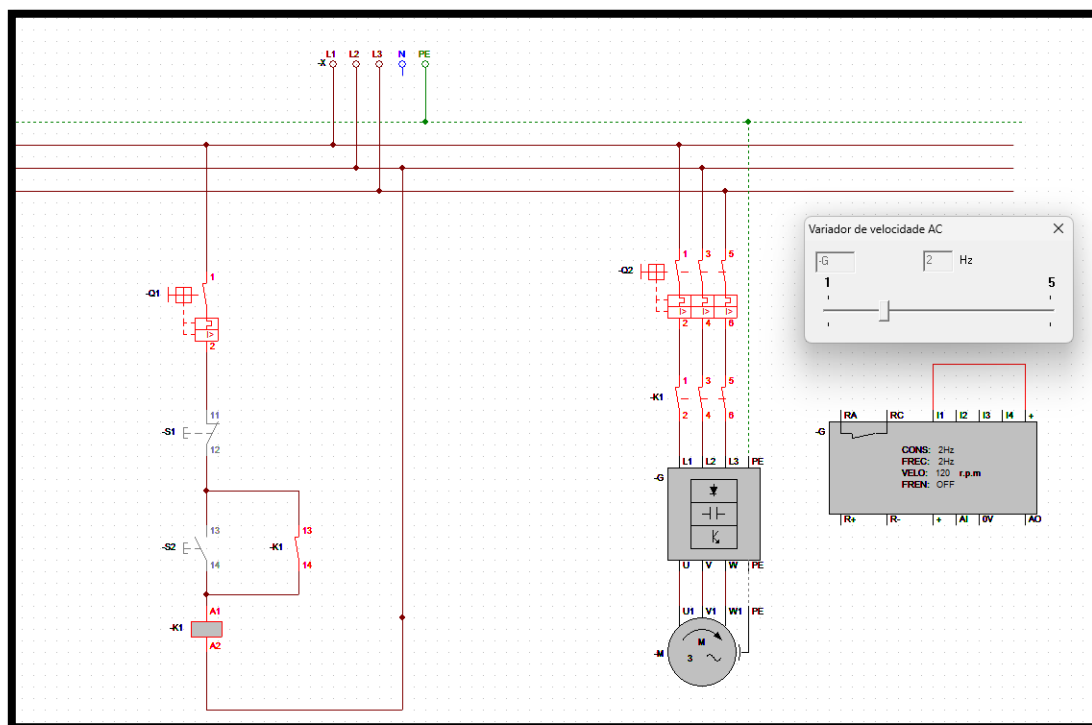
### 5.3. Análisis del Sistema de Control Con Variador

Mediante el uso del programa CADE\_SIMU se consiguió controlar a velocidad do motor usando un variador el mismo que nos permite llegar a conseguir a 112 rpm que fueron calculadas mediante la ecuación 14.

De esta manera es mucho más sencillo el control de las velocidades y así no tener variaciones manteniendo siempre el tornillo a una velocidad constante.

El presente esquema se encuentra representado por dos tipos de control uno de potencia y el otro de control cada uno tiene componentes necesarios tanto de protección como de actuación usando los elementos expuesto en los puntos anteriores.

El sistema que se representa en la figura 46 es un tipo de programación On– Off el cual consta de un botón de inicio y uno de paro de emergencia el inicio del proceso es accionado por un botón para que el sistema tenga inicio siguiendo por una bobina la cual al ser accionada entra en enclavamiento, mientras el sistema de fuerzas es accionado por un botón de inicio y seguido por contactos que serán accionados mediante el sistema de control siguiendo con la activación del variados para después dar la orden del sistema de activar al motor cuando la frecuencia este mayor a 1 Hz.



**Figura 46 – Sistema de control con variador de frecuencia.**

#### 5.4. Análisis del Sistema de Control de Temperatura con Logo Siemens

Todo este sistema se lo desarrolla con ayuda de un logo siemens el mismo que ayudará a la programación de las salidas y entradas de los sensores de temperatura y a su vez permitirá el funcionamiento correcto de nuestros sensores.

Mediante el uso de sensores de temperatura (termostato) se realizó una simulación de un sistema de control on – off de este para así ayudar a tener un control más acertado al momento de elevar temperaturas. Por motivos de diseño de debe tener como referencias base de las temperaturas tanto del tornillo como del reactor por lo cual se optó por mantener las temperaturas de 400 y 500 °C, para el funcionamiento del sistema de calentamiento tanto en el reactor como en el tornillo.

El sistema de control consta de dos variables importantes como son las temperaturas atinjar que están entre los 400 °C y los 500 °C centígrados cuando el sistema llegue a estos valores y los supere este se desactivara así asegurando una temperatura cierta durante su funcionamiento y evitando errores que puedan ocurrir en el sensor durante su funcionamiento.

En la figura 47 se puede observar de qué manera fueron configuradas las entradas y salidas en el logo y así poder realizar la simulación de la temperatura, para mayor entendimiento se creó una tabla con todas y cada una de las variables que fueron usadas para este control on - off con la lógica de programación usada en este proceso (tabla 19).

**Tabla 19 – Variables de Control.**

Siglas	significado
BL	Botón de Encendido
BD	Botón de Apagado (desligado)
T1	T menor a 400 °C
T2	T mayor a 500 °C
I1	Botón de Encendido
I2	Botón de Apagado (desligado)

I3	T° menor a 400 °C
I4	T° mayor a 500 °C
Q1	Calentamiento
Q2	Enfriamiento
Q3	Sistema encendido
Q4	Error en el Sistema

Usando cada una de las variables de la tabla 19 se procedió a realizar una lógica de programación para activar y desactivar el sistema de calentamiento en las figuras siguientes se describe cada una de las lógicas durante el funcionamiento.

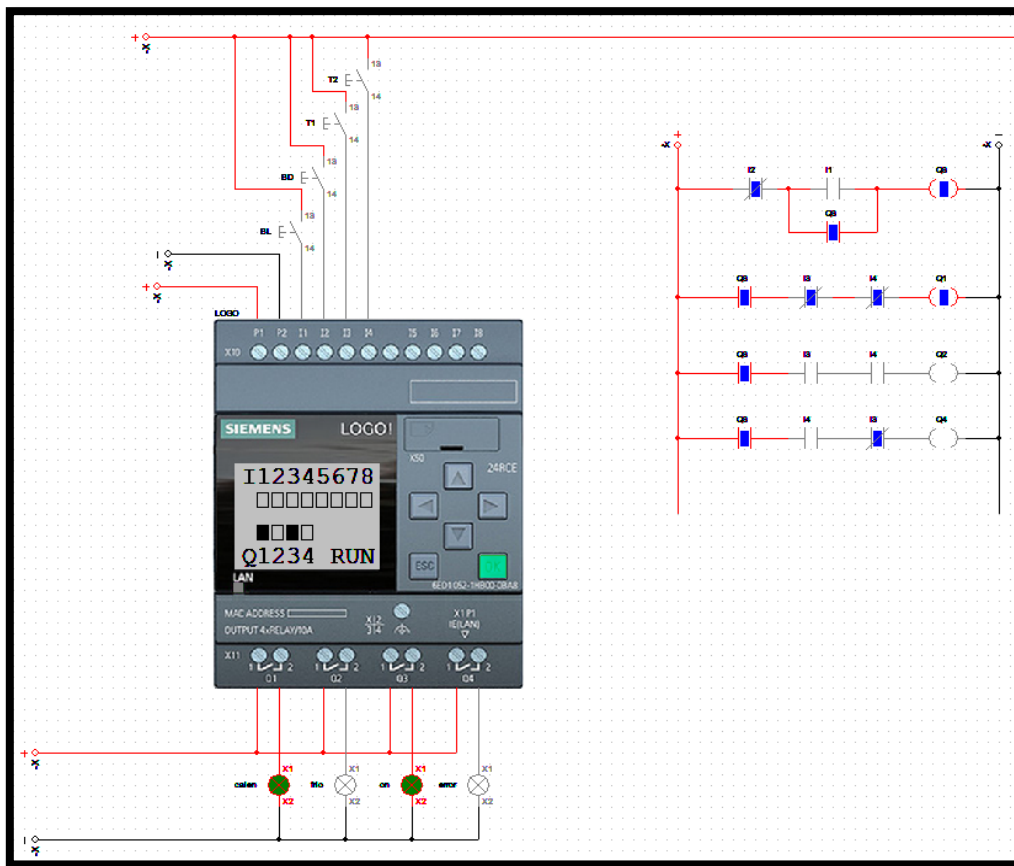


Figura 47 – Sistema de control de Temperatura.

En la figura 47 se puede verificar que nuestro proceso inicia con la pulsación del botón BL que significa conectar el sistema el cual va a comprobar el estado de la temperatura en el reactor y el tornillo sinfín si el sistema se encuentra inferior a las condiciones de entrada este va a encender enseguida el sistema de calentamiento, a su vez se van a encender dos indicadores uno que nos va a mostrar que el sistema esta encendido y el otro que está calentando los equipos.

Mientras que en la figura 47 se puede verificar el encendido del sistema en la figura 48 vamos a describir el sistema después de que ella sobrepasa las temperaturas máximas del circuito, este automáticamente va a desligar el sistema de calentamiento y va a ligar un sistema de enfriamiento para este mantenerse en un rango de calentamiento apto para que la pirólisis de plásticos sea mucho más eficiente y continua, de la misma manera que el calentamiento en el enfriamiento se va a mostrar un indicador de frio y el otro de encendido.

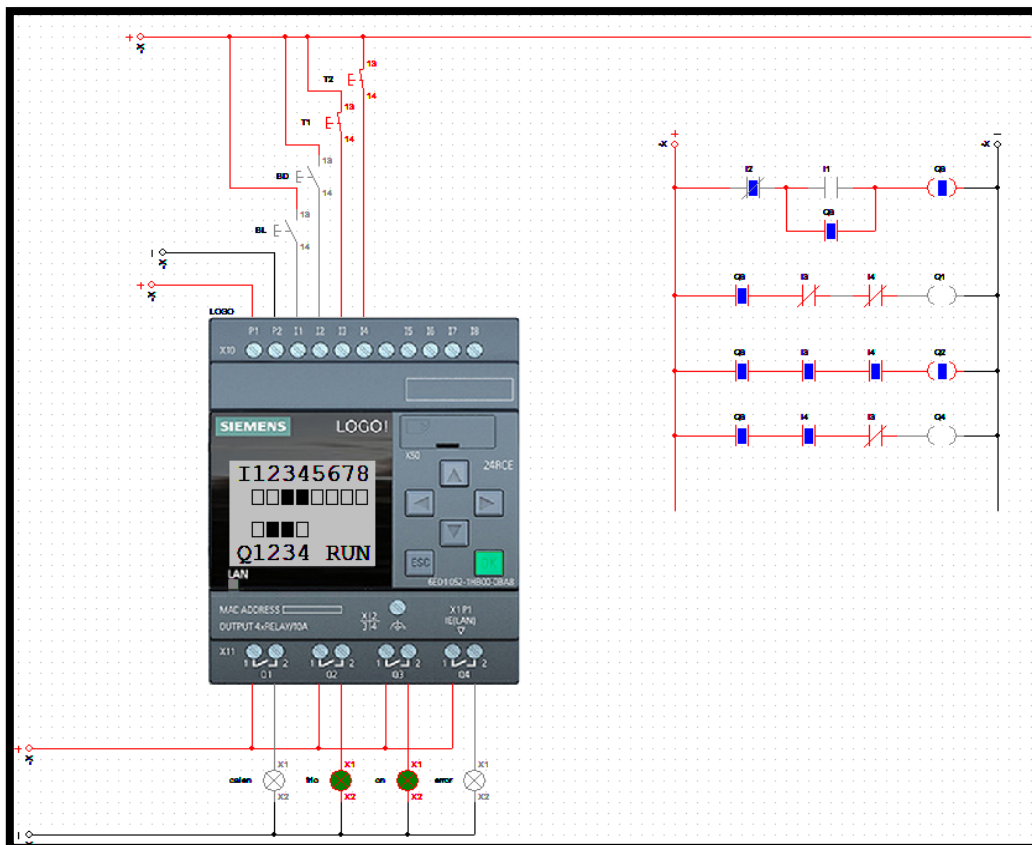
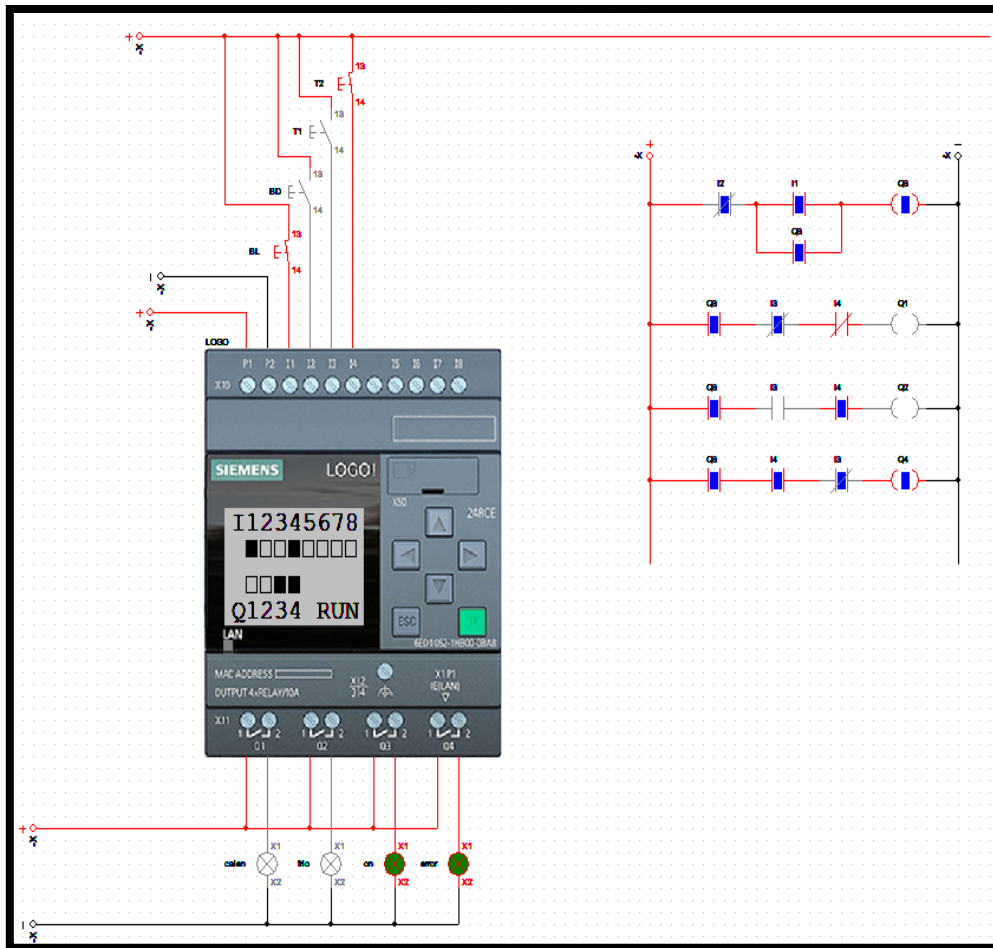


Figura 48 – Sistema de enfriamiento.

La ultima hipótesis que tenemos, cuando por alguna razón existe una falla en el sistema tanto al aumentar como al disminuir la temperatura y quedan encendido tanto la salida del calentador como la del enfriador este automáticamente marcará una falla en el sistema y encenderá una luz de aviso para este ser revisado automáticamente (figura 49).



**Figura 49 – Error en el sistema.**

En los anexos P y Q se puede observar más a detalle este sistema de control tanto para el motor como para la temperatura.

## 6. Conclusiones

Mediante el estudio y diseño de un sistema de pirólisis de plásticos se consiguió optimizar el proceso convencional de transformación de plásticos en oleo pirolítico, se lo pudo realizar mediante el acoplamiento de un sistema de alimentación y transporte del material por medio de una tolva y un tornillo sinfín acoplado a sistema de calentadores por inducción. Con el diseño de cada uno de los elementos que intervienen en el proceso se tuvo que verificar el tipo de materiales que soportan eligiendo un acero de baja aleación 4140 el cual soporta altas temperaturas, presiones y esfuerzos, este tipo de material es uno de los más factibles para este sistema así como también el de menor costo.

A través del diseño de los elementos para el tornillo se tomaron en cuenta varios factores de diseño los mismos que ayudan al correcto funcionamiento y transporte del material por medio del tornillo, aprovechando su máximo potencial durante su funcionamiento. mediante los cálculos realizados se determinó la producción total a la salida del tornillo sinfín será de 24.4 kg/h el mismo que será transportado hasta el reactor.

Se diseñó el reactor batch para el proceso de pirólisis de plásticos con un cilindro de acero con dos cascos los cuales ayudan a cerrar herméticamente nuestro reactor, el sistema de calentamiento fue realizado mediante calentadores por inducción, a la salida del reactor tenemos un sistema de transportes por tubería hasta llegar a un sistema de condensación, aquí es donde se realizará el cambio de temperatura y la transformación del estado gas a líquido, este condensador consta de un sistema en espiras con 2.5 m<sup>2</sup> para que este pueda tener mayor tiempo de transformación, este mismo proceso es replicado por dos ocasiones más hasta obtener un óleo más refinado.

Mediante el modelado computacional se pudo verificar de forma más visible el comportamiento de las presiones y temperaturas del fluido cuando está circulando por los conductos hasta su salida. Se determinó la potencia del motor a través de las ecuaciones propuestas por Savgorodny dándonos una potencia de 1.31 kW y así eligiendo mediante tablas de selección de motores un motor de 2 hp que trabajara juntamente con el sistema de reducción de velocidades garantizando el funcionamiento de este a 112 rpm.

A través del software CADe\_SIMU se diseñó la parte control eléctrico on - off del motor, variador y sistema de calentamiento para que el proceso de pirólisis tenga un

óptimo desempeño y se pueda a provechar cada uno de los recursos en el proceso de transformación de plásticos en oleo pirolítico. El sistema de transformación de plásticos en oleo pirolítico que se presentó ayudara a elevar nivel de producción y aprovechamiento de los plásticos para disminuir la polución en el mundo.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda realizar un sistema de alimentación automático de plásticos este estará acoplado al sistema de transformación de plásticos que se presentó en este trabajo el mismo que ayudara al obtener un proceso continuo y más eficiente.

Es necesario que los materiales plásticos que se van a pirolizar dentro del reactor y en el tornillo hayan pasado por un correcto sistema de limpieza y reciclaje antes de ser introducidas el proceso, se debe tener un sistema de limpieza para el reactor tipo batch ya que al quemar los plásticos quedan materiales no fundidos los cuales deberán ser retirados para la iniciación del otro proceso y así aprovechar el área total del reactor.

En cuanto a los gases que se generan en la salida del proceso o los gases que no son aprovechados podrían ser reutilizados mediante una caldera la misma que generaría energía para autoalimentarse.

## 8. Bibliografía

- Grupo Acura. (Marzo de 2022). *Grupo Acura*. Obtido de <https://grupoacura.com/es/blog/reactores-industriales/>
- ABB. (2023). *ACS150 - microconvertidor de frecuencia*. Obtido de ABB: <https://new.abb.com/drives/es/convertidores-baja-tension-ca/microconvertidores/acs150>
- Acurio, J. L. (Octubre de 2018). *Prototipado de una máquina extrusora de filamento plástico pet, para una impresora 3d*". Obtido de Repositorio Espe: <https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/24541?show=full>
- Ahmed, T. (2018). *Investigation of Ni/Fe/Mg zeolite-supported catalysts in steam reforming of tar using simulated-toluene as model compound*, *Fuel*. doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.051
- Alarcón, & Ubaldo, A. (Noviembre de 2017). *Polimerización In situ de Poliestireno de Alto Impacto en presencia de Nanopartículas de Sílice y Micropartículas de Mg(OH)<sub>2</sub> y su Influencia sobre la Cinética de Polimerización, la Morfología de las Fase Elastomérica y la Retardancia a la Flama*. Obtido de [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/434/1/Tesis%20MTP%20Andres%20Ubaldo%20Alarcon%20Dic%2019%202017.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/434/1/Tesis%20MTP%20Andres%20Ubaldo%20Alarcon%20Dic%2019%202017.pdf)
- Almeida, D., & Marques, M. (2016). *Thermal and catalytic pyrolysis of plastic*. doi:doi:http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100
- Álvarez Medina, C. R. (2015). *Monitoreo estadístico de procesos batch, aplicaciones a reactores de polimerización*. Obtido de Monitoreo estadístico de procesos batch, aplicaciones a reactores de polimerización.: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2018>
- Ambiental Blog. (06 de Noviembre de 2010). *Plásticos Reciclables*. Obtido de <https://ambientalblog2010.wordpress.com/2010/11/06/los-tipos-plasticos-reciclables/>
- Angulo, J. L. (1995). *Caracterización fisicoquímica del polímero*. México D.F: México.

- Arauzo, Bimbela, Ábrego, Sánchez, & Gonzalo. (2014). *Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa*. España: Mariano Esquillor.
- Arbeláez, J., Janna, Gutiérrez, Rentería, Velasco, Blanco, & Chaparro. (2013). *Pirólisis rápida de biomasa*. Colombia.
- Ashby, M., University, C., Department, E., & Desig, G. (Enero de 2016). Material property data for engineering materials. 4, p. 27.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction*. 2nd Ed. ed. Elsevier Inc.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante.
- Bermejo, J. A. (2013). *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. España: Universidad de La Rioja. Obtido de (Doctoral dissertation, Universidad de La Rioja).
- Brown, A. (2005). *Consideraciones sobre el estudio de catálisis homogénea y heterogénea*. Obtido de ICIDCA: <https://www.redalyc.org/>
- Canteros, C. (Enero de 2014). *Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno*. Obtido de Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile.: [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cfcontreras\\_fc.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cfcontreras_fc.pdf?sequence=1)
- Cargua, W. (2018). *Comparación de esquemas de control para reactores químicostipo CSTR*. Obtido de Control Schemes comparison for CSTR chemical reactors: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507557606009/html/>
- Carta, D., Cao, G., & D'Angeli, C. (Noviembre de 2003). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate) (pet) by hydrolysis and glycolysis. *SpringerLink*. Obtido de Environmental Science And Pollution Research,10(6),390-394
- Castells, X. E. (2009). *Reciclaje de residuos industriales*. España: Diaz de Santos.
- Chen, S., Miao, C., Luo, Y., Zhou, G., Xiong, K., Jiao, Z., & Zhang, X. (Enero de 2018). *Study of catalytic hydrodeoxygenation performance of Ni catalysts*. (R. Energy, Ed.) doi:doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.028

- Chiu, S. J., & Cheng, W. H. (1999). *Thermal degradation and catalyst cracking of poly(ethyleneterathalate)*. Obtido de *Polymer Degradation and Stability*: 63(3) (1999) 407-412.
- Concepción, D., Escanavero, M., Ramírez, G., R, B. M., & Osorio, M. (Diciembre de 2015). *Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fin empleando el método de grafos dicromáticos*. Obtido de *Ingeniería Mecánica*: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442015000300001&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442015000300001&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Conesa Ferrer, J. A. (2001). *Diseño de reactores heterogéneo*. Ed., ISBN.
- Corma, A., & Orchille's. (2000). *Microporous and Mesoporous Materials*. 21-30.
- Coronel Aguilar, J. C. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK*. Obtido de *En Reactor Batch*. Universidad Internacional : <hdl.handle.net/123456789/1006>.
- Domènech, P. (2012). *Química Ambiental de sistemas terrestres, CAPÍTULO 4*. Obtido de *Comportamiento y destino de los contaminantes en los sistemas*: <https://books.google.com.ec/books?id=S4bjFOEXRzMC&pg=PA180&dq=X.+Do%02m%C3%A8nech+y+J.+Peral+Comportamiento+y+destino+de+los+contaminantes+en+los+sistemas+terrestres&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjnx8L%02F4K7wAhXDc98KHXJtBXoQ6AEwAHoECAAQA%02g#v=onepage&q=X.%20D>
- Elamri, A., Zdiri, K., Harzallah, O., & Lallam, A. (29 de Septiembre de 2020). *Progress in Polyethylene Terephthalate Recycling*. Obtido de *efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://hal.science/hal-02953197/document*
- Electromecanica MM. (2022). *Motor Electrico Trifasico*. Obtido de *Electromecanica MM*: <https://www.electromecanicamm.com.ar/producto/motor-electrico-trifasico-kaifa-2-hp-1500-rpm/167/>
- Expok Comunicacion de sustentabilidad y RSE. (Octubre de 2018). *Elegir productos plásticos amigables con el ambiente*. Obtido de *Expok*:

<https://www.expoknews.com/elegir-productos-plasticos-amigables-con-el-ambiente/>

Fábrica do Projeto. (Octubre de 2017). *Engenharia, projetos e aplicativos para mecânica e processos industriais*. Obtido de Fábrica do Projeto: <https://www.fabricadoprojeto.com.br/2017/10/planilhas-de-calculo-n2-planificacao-chapa-rosca-helicoidal/>

Flores, P. D. (2007). *Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales*. Medellín: Ed., Medellín.

Garrido, S. P. (Diciembre de 2013). *diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros*. Obtido de [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido\\_ps.pdf?sequence=1](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116265/cf-garrido_ps.pdf?sequence=1)

Gestores de Residuo. (01 de 08 de 2020). *Gestores del residuo*. Obtido de <https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos>

Gomez, J., & Bedoya, J. (Noviembre de 2007). *Diseño de una extrusora para plastico*. Obtido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/145b2ecf-d956-4b4e-b2f5-5406d77c76fe/content>

Guerrero, M. D. (Junio de 2016). *Pirolisis a baja Temperatura de la Pomasa de Manzana para la Producción de Biocombustibles*. Obtido de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/363/1/Tesis%20Mar%C3%ADa%20del%20Rosario%20Baray%20Guerrero.pdf>

Gutiérrez, J. Z. (2015). *Modelado y Simulación de un Proceso de Despolimerización vía Pirólisis Catalítica: Polietileno de alta Densidad (PEAD)*. Obtido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/327/1/Tesis%20MTP%20Jesus%20Zavala.pdf>

Hanindriyo, A. (2017). *Computational Design of Ni-Zn Based Catalyst for Direct Hydrazine Fuel Cell Catalyst Using Density Functional Theory*. Obtido de Engineering, 170, 148-153. doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.007

Hernández, García, A., Gómez, A., Agulló, J., & Marcilla, A. (18 de Noviembre de 2006). *Effect of residence time on volatile products obtained in the HDPE pyrolysis in*

- the presence and absence of HZSM-5*. Obtido de Industrial and Engineering Chemistry Research: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie060728%2B>
- Hernandez, R. (Marzo de 2007). *Evaluación de la Pirólisis Térmica y Catalítica de Polietileno en Lecho Fluidizado como Técnica de Reciclado. Influencia de las Variables sobre los Productos Generados*. Obtido de Universidad de Alicante: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis\\_doctoral\\_hernandez\\_ferez.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4088/1/tesis_doctoral_hernandez_ferez.pdf)
- Hirano, T., & Xu, Y. (2017). *Catalytic properties of a pure Ni coil catalyst for methane steam reforming*. Obtido de International Journal of Hydrogen: 30621-30629. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.135
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). *Plastics recycling: challenges and Opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences*. Obtido de 364(1526):2115-2126
- Huang, S. (2017). *Reductive de polymerization of kraft lignin with formic acid at low temperatures using inexpensive supported Ni-based catalysts*. Obtido de doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.031
- Jin, Z. C. (2017). *Molten waste plastic pyrolysis in a vertical falling film reactor and the influence of temperature on the pyrolysis products*. Obtido de 400-406. doi:10.1016/j.cjche.2017.08.001
- Juan, A. B., & Terol, C. C. (2014). *Reactores químicos y y bioquímicos*. Castelló de la Plana: Publicacions de la Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions.
- Kunwar, B. C. (2016). *Plastics to fuel*. Obtido de Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 421- 428.
- Lechuga, F. T. (2008). *ABC para comprender reactores químicos con*. Reverte.
- Lee. (2012). Effects of the types of zeolites on catalytic upgrading of pyrolysis wax oil. *Journal on Analytical and Applied Pyrolysis*, 99. Obtido de journal of Analytical and Applied Pyrolysis .

- Lee, K.-H., Noh, N.-S., Shin, D.-H., & Seo, Y. (2002). Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst. Em N.-S. N.-H. K.-H. Lee. *Polym. Degrad. Stab.* Obtido de *Polym. Degrad. Stab.*
- Levchuk, A. (2010). *Inhibición de los procesos de polimerización por fenoles de diferentes orígenes en.*
- Mariano. (15 de 03 de 2011). Obtido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- Mariano. (5 de Marzo de 2011). *Codigos de los Plasticos.* Obtido de Tecnología de los Plasticos: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>
- Martinez, D. D. (2009). *S/N.* Obtido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Viga#/media/Archivo:Bending.svg>
- Mendoza, F. R. (Julio de 2015). *Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS.* Obtido de <http://hdl.handle.net/10553/105898>
- Miandad, R., Barakat, Aburiazaiza, Rehan, M., & Nizami. (2016). *Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste.* doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Mike Ashby, E. D. (2010). *Material and Process Selection Charts 2.* Em E. D. Mike Ashby. Granta Material Inspiration.
- Mongua, A., & Moreno, P. (31 de Diciembre de 2012). *Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie. (Tesis (Ingeniero Químico)).* Obtido de Universidad de Cartagena: <http://190.25.234.130:8080/jspui/handle/11227/107>
- Naphtha, P. (1999). *NAPHTHA, PETROLEUM.* Obtido de <https://cameochemicals.noaa.gov/chris/PTN.pdf> (accessed 10.31.16).
- O'Connor, P., Hartkamp, M., & Wijngaards, H. (1990). *The Hydrocarbon Chemistry of FCC Naphta Formation.* p. 54.
- Obando, G. A. (2015). *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos*

- Sólidos (ROS)*. Obtido de [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2590/informe%20final%20trabajo%20investigacion%20Gabriel\\_Obando\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2590/informe%20final%20trabajo%20investigacion%20Gabriel_Obando_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Olah, G. (1994). *Chemistry. Nobel Prize*.
- Olivares, P. (2013). *Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre*. Obtido de Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Óscar González Barceló, S. G. (Enero de 2015). *Tratamiento de agua residual municipal utilizando biopelículas en suspensión*. Obtido de [file:///C:/Users/maiko/Downloads/TRATAMIENTO\\_DE\\_AGUA\\_RESIDUAL\\_MUNICIPAL\\_UTILIZANDO\\_.pdf](file:///C:/Users/maiko/Downloads/TRATAMIENTO_DE_AGUA_RESIDUAL_MUNICIPAL_UTILIZANDO_.pdf)
- Otto Fernando Balseca Sampedro, S. M. (22 de Marzo de 2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y*. Obtido de Dialnet- [DisenoDeUnPrototipoDeReactorDePirolisisTermicaPara-8016903%20\(4\).pdf](DisenoDeUnPrototipoDeReactorDePirolisisTermicaPara-8016903%20(4).pdf)
- Packaging, F. (2016). *Frapak Packaging*. Obtido de Frapak Packaging: <https://www.frapak.com/es/botellas-de-rpet/>
- Pascual, E. (Julio de 2017). Obtido de <https://elblogverde.com/clasificacionplasticos/>
- Pirobloc S.A. (2022). *Pirobloc S.A.* Obtido de Pirobloc S.A: <https://www.pirobloc.com/aplicaciones-y-sectores/calentamiento-de-reactores-quimicos/>
- Ramis, J. X. (1994). *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado*. Obtido de Universitat Politècnica de Catalunya: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93997?locale-attribute=es>
- Ramos, L. F. (1994). *Extrusion de plasticos*. Mexico: Limusa.
- Research Department. (Septiembre de 2022). *plastics*. Obtido de Statista Research Department: <https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico/>
- Ribiero, R. A. (1999). *Zeolites: Science and Technology*. Amsterdam: Martins Nijhoff.

- Rocha, A. (Octubre de 2018). *Repositorio Espel*. Obtido de Repositorio Espel: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/24502/1/M-ESPEL-EMT-0085.pdf>
- Rodríguez, J. G. (17 de 09 de 2007). *I.E.S. "Clara Campoamor" (Getafe)*. Obtido de [http://fresno.pntic.mec.es/~fgutie6/quimica2/ArchivosHTML/Teo\\_10\\_princ](http://fresno.pntic.mec.es/~fgutie6/quimica2/ArchivosHTML/Teo_10_princ).
- Romão, W. S. (2009). *Poly (ethylene terephthalate), PET: synthesis processes, degradation mechanisms and its recycling*. . Obtido de *Polímeros*.19(2), 121-132
- Sandoval, D., & Ushiña, V. (12 de 2011). *Repositorio ESPE*.
- Savgorodny, V. K. (1978). *Transformación de plásticos*. 2 ed. Barcelona: GUSTAVO PILI S.A.
- Scheirs, J. &. (2006). *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. John Wiley & Sons.
- Sendrós, C. F. (S/F). *Modelización y Control de Temperatura de un Reactor* .
- Şensöz, S., Demiral, İ., & Gerçel, H. F. (2006). Olive bagasse (*Olea europea L.*) pyrolysis. *Bioresource Technology*, 97(3), pp. 429-436. Obtido de *Technol.* 97, 429–436. doi:10.1016/j.biortech.2005.03.007
- Sharuddin, A., Abnisa, Daud, W., & Aroua, K. (2016). pyrolysis of plastic wastes. *Energy conversion and management*.
- Sheinzhen Biyuanda Technology Co. Lda. (2020). *Calentamiento por inducción para reactor químico*. Obtido de Biyda: <http://inductionheater-inc.com.ar/induction-heating-for-chemical-reactor.html>
- Silva, H. D. (2016). *Dimensionamento de um reator piloto para pirólise de biomassa*. Obtido de *DM\_HugoSilva\_2016\_MEQ.pdf*
- Singh, R. &. (2016). *Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste*. *Fuel*. Obtido de doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.049>
- Sio, A. J. (1997). Catalytic Conversion of Polyolefins into Liquid Fuels over MCM-41: Comparison with ZSM-5 and Amorphous. Em *Energy & Fuels* (pp. 1225-1231).

- Tecnología de los Plásticos. (15 de Marzo de 2011). *Extrusión De Materiales Plásticos*.  
Obtido de Tecnología de los Plásticos:  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- Till, V. S. (2018). *Kinetic identification of plastic waste pyrolysis on zeolite-based catalysts*. Obtido de Energy Conversion and Management, 173, 320-330  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.088>
- Van Der Vegta\_K, G. L. (2014). *Polymerem van Ketten tot kunstof*. Alemania: Centraal Boekhuis.
- Vásquez, Á., Zapata, & Vélez, M. B. (2013). Experimentos de combustión con cascarilla de arroz en lecho fluidizado para la producción de ceniza rica en sílice. *Facultad de Ingeniería*, 104 - 111.
- Vilca, M. M. (2020). *Evaluación de la Pirólisis Térmica y de la Catalítica Usando Zeolitas Volcánicas Como Catalizador de Desechos Plásticos*. Obtido de <https://es.scribd.com/document/641724720/TESIS-MARIA-VARGAS-VILCA>
- Villarreal, A., & García, R. C. (2021). Obtención y análisis de expresiones de cinética química. I. Obtención de datos cinéticos y criterios para evitar los problemas de transferencia de masa y energía utilizando catalizadores heterogéneos. *Mundo nano vol.14*.
- Walendziewski, J. (2005). *Craqueo continuo de residuos plasticos*. Obtido de Fuel Processing Technology. : 86(12):1265\_1278
- Wojciechowski, & Corma. (1986). Catalytic craking catalysts, chemistry and kinetics. *Chemical Industries*.
- Yaseneva, P. (Marzo de 2014). *Efficient reduction of bromates using carbon nanofibre supported catalysts*. Obtido de Estudio experimental y de evaluación comparativa del ciclo de vida. Chemical Engineering Journal:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589471400309X>
- You, S., & Kim, J.-H. (2000). Liquid-phase catalytic degradation of polyethyle was over MFI zeolites with different particles sizes, polymer degradation and stability. pp. 365-371.

Zabala, L. (Septiembre de 2020). *Tabla de Densidades*. Obtido de <https://es.scribd.com/document/477745623/Tabla-de-densidades>

## Anexos

### Anexo A - Tolerancias y Parámetros geométricos del husillo/cilindro

Diámetro nominal (mm)	Diámetro del cilindro L/D	Diámetro del husillo	Tolerancia diametral cilindro/husillo
30	30.00+.02/-0.00	29.93/29.92	0.06/0.10
35	35.00+.02/-0.00	34.93/34.91	0.08/0.11
38	38.00+.02/-0.00	37.92/37.90	0.08/0.13
40	40.01+.02/-0.00	39.93/39.90	0.08/0.13
50	50.01+.02/-0.00	49.91/49.89	0.10/0.13
60	59.99+.02/-0.00	59.87/59.84	0.13/0.18
65	65.00+.02/-0.00	64.87/64.85	0.13/0.18
70	70.00+.02/-0.00	69.88/69.85	0.13/0.18
75	75.01+.02/-0.00	74.85/74.83	0.15/0.20
80	80.01+.02/-0.00	79.84/79.82	0.17/0.20
90	89.99+.05/-0.00	89.81/89.79	0.18/0.25
100	100.00+.05/-0.00	99.80/99.77	0.20/0.28
105	105.00+.05/-0.00	104.80/104.78	0.20/0.28
115	115.01+.05/-0.00	114.78/114.76	0.23/0.30
120	119.99+.05/-0.00	119.76/119.74	0.23/0.30
135	135.00+.05/-0.00	134.75/134.70	0.25/0.36
150	150.01+.05/-0.00	149.71/149.66	0.30/0.41

### PARAMETROS GEOMETRICOS DEL HUSILLO EN mm

Diámetro (D) mm	Paso t	Profundidad del canal en la zona de alimentación h1	Profundidad del canal en la zona de extruccion, h2	Anchura de la Cresta
<u>25.5</u>	<u>25.5</u>	<u>4.7</u>	<u>1.5</u>	<u>3.06</u>
32	32	6	1,9	3,8
45	45	8	2,1	5
63	63	9,6	2,4	6,3
90	90	11,2	2,8	9
125	125	13,5	3,2	12
160	160	15	3,7	15

**Anexo B - Tolerancias y Parámetros geométricos del husillo/cilindro**

RESINA	TIPO MOLECULAR	TEMP. CRITICA °F (a)	DENSIDAD g/cm³		DISEÑO DL HUSILLO BASADO EN			NOMBRES COMERCIALES RELACIONADOS
			SÓLIDO	FUNDIDO	PROF. DEL CANAL (b)	LONG. DE TRANSICION (c)	RELACION DE COMPRESION (d)	
PP	C-	48 Tm	0,9	0,75	Media	Media	Media	Marlex, Hifax, Escorene, Nortuff
ABS	A	228 Tg	1,08	0,97	Profunda	Larga	Baja	Cyclocac, Magnum, Lustran
CA	C*	NA	1,22	1,14	Profunda	Media	Baja	Tenite
CAB	C*	NA	1,15	0,08	Profunda	Media	Baja	Tenite
CAP	C*	NA	1,17	1,1	Profunda	Media	Baja	Tenite
FEP	C	527 Tm	2,12	1,49	Media	Corta	Media	Teflon
HDPE	C	278 Tm	0,95	0,73	Media	Media	Media	Dowlex, Marlex, Pethrotene, Alathon
HIPS	A	210 Tg	1,05	0,97	Profunda	Larga	Baja	Styron, Lustrex, RTP
LCP	C	525 Tm	1,35	Unk	Superficial	Media	Media	Vectra, Xydar, Ekkcel
LDPE	C	221 Tm	0,92	0,76	Media	Media	Media	Petrothene, Tenite, Escorene
LLDPE	C	250 Tm	0,93	0,7	Media	Media	Media	Petrothene, Dowlex, Escorene, Allane
PA6/6	C	500 Tm	1,14	0,97	Superficial	Media	Alta	Zytel, Ultramid, wellamid, Vdydyne
PBT	C*	470 Tm	1,34	1,11	Media	Media	Baja	Valox, Celanex
PC	A	302 Tg	1,2	1,02	Profunda	Larga	Baja	Lexan, Nacrolon
PEI	A	420 Tg	1,27	0,08	Media	Media	Media	Ultrem
PET	C**	460 Tm	1,4	1,1	Media	Media	Media	Kodapak, Petion, Rynite
PFA	C-	582 Tm	2,15	Descon.	Media	Corta	Media	Plexiglas, Acrylite
PMMA	A	203 Tg	1,2	1,05	Profunda	Larga	Baja	Marlex, Hifax, Escorene, Nortuff
POM	C-	358 Tm	1,42	1,17	Superficial	Media	Media	Noryl, Prevex
PS	A	193 Tg	1,05	0,97	Media	Media	Media	Styron
PSU	A	374 Tg	1,24	1,16	Media	Media	Media	Udel, Ultrason S
PVC-F	A	194 Tg	1,3	1,2	Profunda	Media	Baja	Geon
PVC-R	A	188 Tg	1,4	1,22	Profunda	Larga	Baja	Geon
SAN	A	300 Tg	1,07	1	Media	Media	Media	Lustran-SAN, Tyril, Luran

## Anexo C - Materiales de Construcción y Propiedades de los Materiales para el Husillo.

MATERIALES BASE PARA EL HUSILLO				ACEPTABILIDAD A CONDICIONES DE DESGASTE DE LA RESINA				
DESIGNACION DEL MATERIAL	TRATAMIENTO (1)	Rc (2)	FH (3)	ABRASIVO			CORROSIVO (7)	
				NORMAL (4)	PROMEDIO (5)	SEVERA (6)	MODERADA	SEVERA
Aceros aleados 4140	Endurecido con llama	48 55	no	Aceptable	Mala	No aceptable	No aceptable	No aceptable
4140	Cromado	60 65	si	Buena	Aceptable	No aceptable	Buena	No aceptable
Nitralloy 135-M	Nitrurado	63 70	si	Buena	Aceptable	No aceptable	Mala	No aceptable
Micromelt 9 (b)	Tratado con calor	54 56	no	Excelente	Excelente	Buena	Aceptable	No aceptable
CPMM4(a)	Tratado con calor	62 64	no	Excelente	Buena	Aceptable	Mala	No aceptable
CPM 420 (a)	Tratado con calor	52 56	no	Aceptable	Buena	No aceptable	Buena	Mala
Elmax (c)	Tratado con calor	57 59	no	Buena	Aceptable	No aceptable	Buena	Mala
Custom 450 (b)	Endurecido por tiempo	41 42	si	Aceptable	No aceptable	No aceptable	Buena	No aceptable
Aleaciones especiales Monel K-500 (d)	Endurecido por tiempo	37 39	opt'l	Aceptable	No aceptable	No aceptable	Excelente	Buena

### MATERIALES CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES PARA EL HUSILLO

Material	Resistencia de fluencia en tracción $S_y$ (0.2%)		Esfuerzo ultimo en tracción $S_u$		Elongación (en 2 in)	Dureza Brinell
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	%	HB
4140	Estado					
	Templado y revenido a 800°F	165	1138	181	1248	13

## Anexo D - Propiedades Físicas del Polipropileno (PP)

Fuente: (Zabala, 2020).

<b>Tabla de Densidades</b>			
<b>Código SPI</b>	<b>Nombre de Plástico</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Usos</b>
1	<b>PETE</b> Tereftalato de Polietileno	1,38-1,39	Botellas de agua y bebidas, envases de mantequilla de maní, envases de aderezo para ensaladas y aceite vegetal
2	<b>HDPE</b> Polietileno de alta densidad	0,95-0,96	Cajas de leche, limpiadores domésticos, envases de aceite de motor, algunas bolsas de basura, envases de mantequilla y yogurt, bolsas de basura
3	<b>PVC</b> Policloruro de vinilo	1,16-1,45	Envases transparentes para alimentos, equipos médicos, revestimientos, tuberías, ventanas, botellas de champú
4	<b>LDPE</b> Polietileno de baja densidad	0,92-0,94	Botellas dispensadoras, distintas bolsas (para pan, alimentos congelados, de supermercado y de lava seco), vestuario, muebles
5	<b>PP</b> Polipropileno	0,90-0,91	Botellas de almíbar, botellas de ketchup, tapas, bombillas, botellas de medicamentos
6	<b>PS</b> Poliestireno (dos tipos)	0,02-1,07	Cajas de CD, bandejas de carne, cartones de huevos, platos y vasos desechables, plumavit de empaque
7	<b>Otros</b> Muchos tipos	Varía	Cajas de DVD, empaques para iPod, letreros y señalética, nylon
<b>Otras sustancias</b>			
	Agua dulce	1,00	
	Agua de mar	1,03	

## Anexo E - Fórmulas para la Selección de Materiales

### Formulário

Tensão normal numa barra sujeita a tracção:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Carga crítica para instabilidade elástica numa barra sujeita a compressão:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Tensão normal numa barra de secção circular sujeita à flexão:

$$\sigma = \frac{FLr}{4I}$$

Tensão normal numa barra de secção circular sujeita à torção:

$$\sigma = \frac{Tr}{K}$$

Tensão normal numa barra de secção retangular  $b \times h$  bi-apoiada sujeita à flexão:

$$\sigma = \frac{FLh}{8I}$$

Tensão normal numa barra de secção retangular  $b \times h$  encastrada sujeita à flexão:

$$\sigma = \frac{FLh}{2I}$$

Tensão normal numa barra de secção retangular sujeita à torção:

$$\sigma = \frac{Th}{2K} \quad h = \text{maior dimensão da secção da barra}$$

### Formulário

Deformação numa barra bi-apoiada sujeita a flexão:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI}$$

Deformação numa barra encastrada sujeita a flexão:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

Deformação numa barra bi-apoiada sujeita a torção:

$$\theta = \frac{8TL}{3KE}$$

Momento de inércia de uma barra de secção retangular:

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Momento de inércia de uma barra de secção circular:

$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$

Momento de inércia polar de uma barra de secção circular:

$$K = \frac{\pi r^4}{2}$$

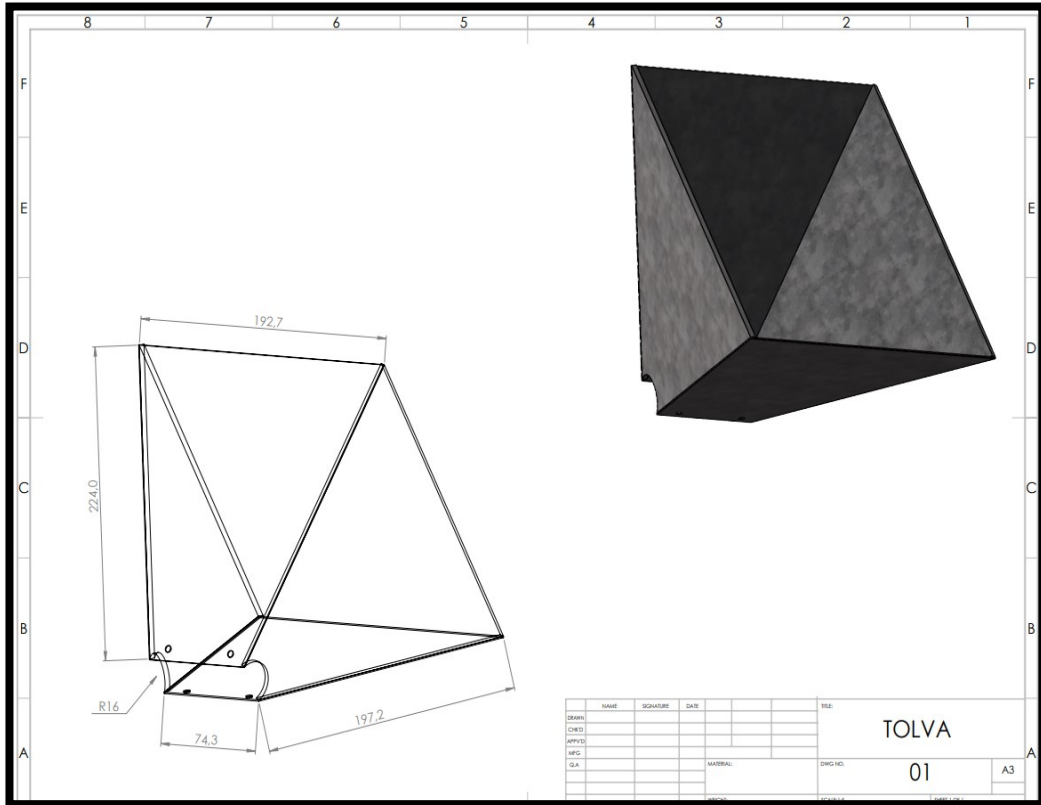
Momento de inércia polar de uma barra de secção retangular:

$$K = \frac{bh^3}{3} \left(1 - 0.58 \frac{b}{h}\right)$$

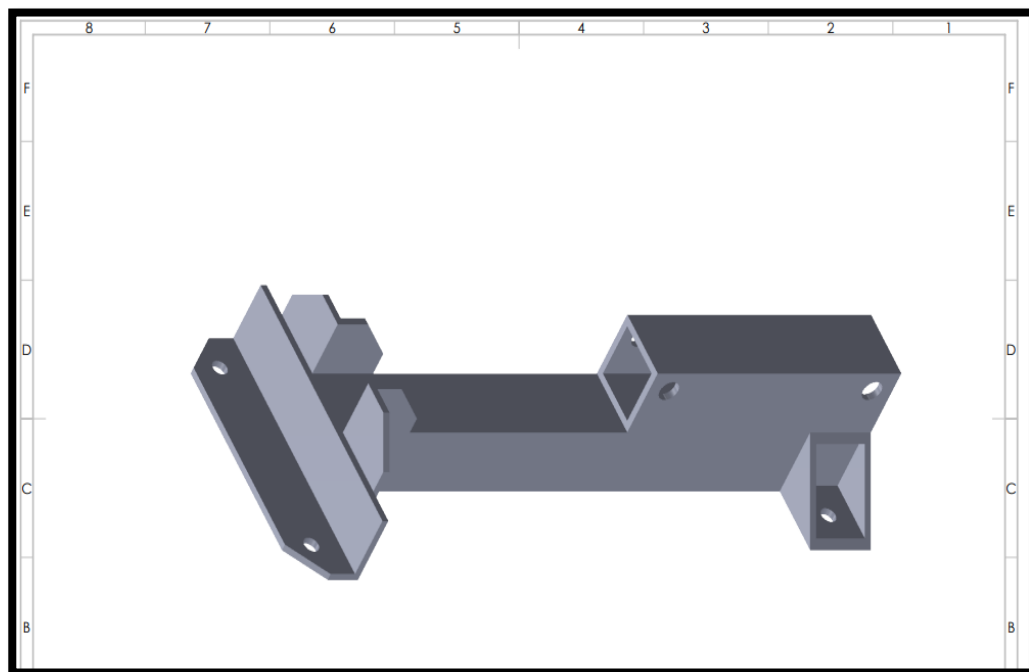
**Anexo F - Características del Motor - Reductor**

Model	Output		Voltage (V)	Current (A)	Speed (r.p.m)	Eff (%)	Power Factor	Start torque	Start current	Max. torque	Noise (dBA)	Weight kGS
	KW	HP						Rated torque	Rated current	Rated torque		
4-Pole Synchronous 1500RPM 50Hz												
MS56A4	0.06	0.08	220/380	0.49/0.28	1400	56	0.58	2.2	5.5	2.3	50	2.9
MS56B4	0.09	0.12	220/380	0.67/0.39	1400	58	0.61	2.2	5.5	2.3	50	3.2
MS63A4	0.12	0.16	220/380	0.84/0.48	1400	60	0.63	2.2	5.5	2.3	52	3.7
MS63B4	0.18	0.24	220/380	1.12/0.65	1400	64	0.66	2.2	5.5	2.3	52	4.2
MS71A4	0.25	0.33	220/380	1.44/0.83	1400	67	0.68	2.2	5.5	2.3	55	5.0
MS71B4	0.37	0.50	220/380	1.95/1.12	1400	70	0.72	2.2	5.5	2.3	55	5.8
MS80A4	0.55	0.75	220/380	2.70/1.56	1400	74	0.73	2.3	6.0	2.4	58	8.1
MS80B4	0.75	1.0	220/380	3.49/2.01	1400	76	0.75	2.3	6.0	2.4	58	9.1
MS90S4	1.1	1.5	220/380	4.76/2.75	1400	78	0.78	2.3	6.0	2.4	61	11.7
MS90L4	1.5	2.0	220/380	6.32/3.65	1400	79	0.79	2.3	6.0	2.4	61	14.4
MS100LA4	2.2	3.0	220/380	8.94/5.16	1430	79	0.82	2.3	7.0	2.4	64	19.2
MS100LB4	3	4.0	220/380	12.0/6.95	1430	81	0.81	2.3	7.0	2.4	64	22.5
MS112M4	4	5.5	380/660	8.98/5.19	1400	83	0.82	2.3	7.0	2.4	65	29.0
MS132S4	5.5	7.5	380/660	11.8/6.80	1400	85	0.84	2.3	7.0	2.4	71	39.0
MS132M4	7.5	10	380/660	15.7/9.05	1400	86	0.85	2.3	7.0	2.4	71	48.6
MS160M4	11	15	380/660	22.3/12.9	1460	88	0.85	2.0	7.0	2.2	75	73.0
MS160L4	15	20	380/660	30.1/17.4	1460	89	0.85	2.0	7.0	2.2	75	88.5
MS180M4	18.5	25	380/660	36.5/21.1	1470	91	0.85	2.2	7.0	2.2	80	118.0
MS180L4	22	30	380/660	43.2/25.0	1470	91	0.85	2.2	7.0	2.2	80	128.0

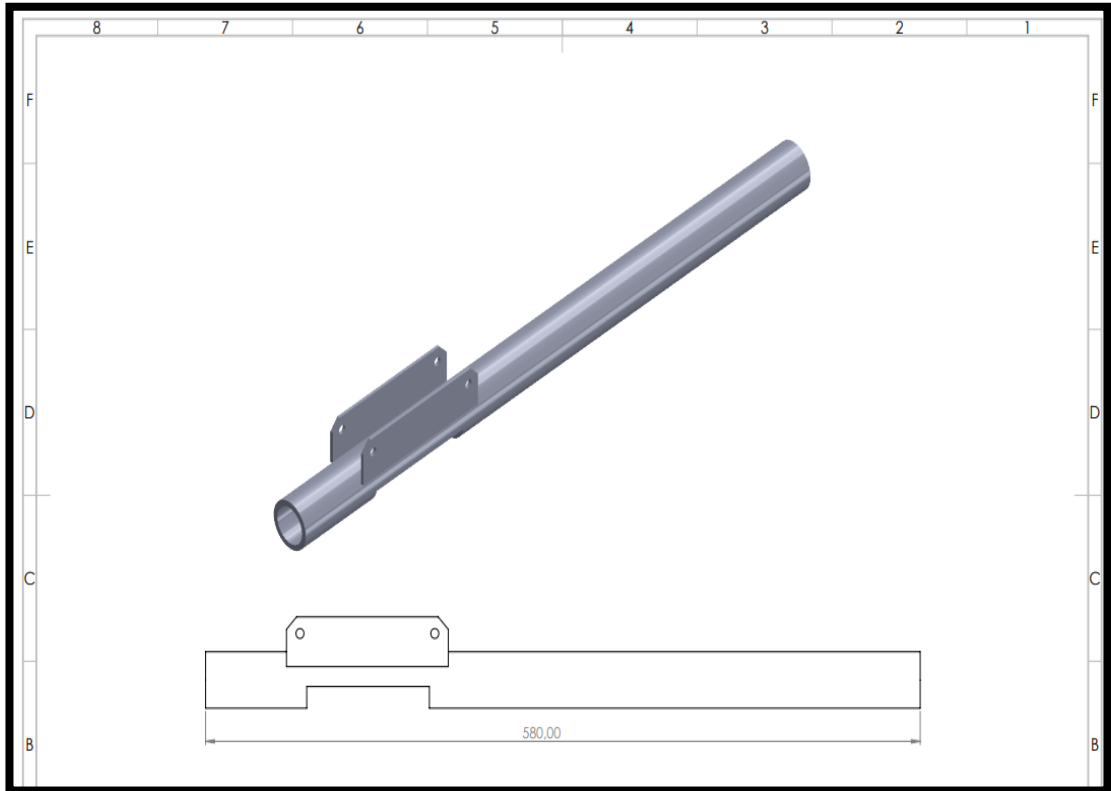
### Anexo G - Tolva



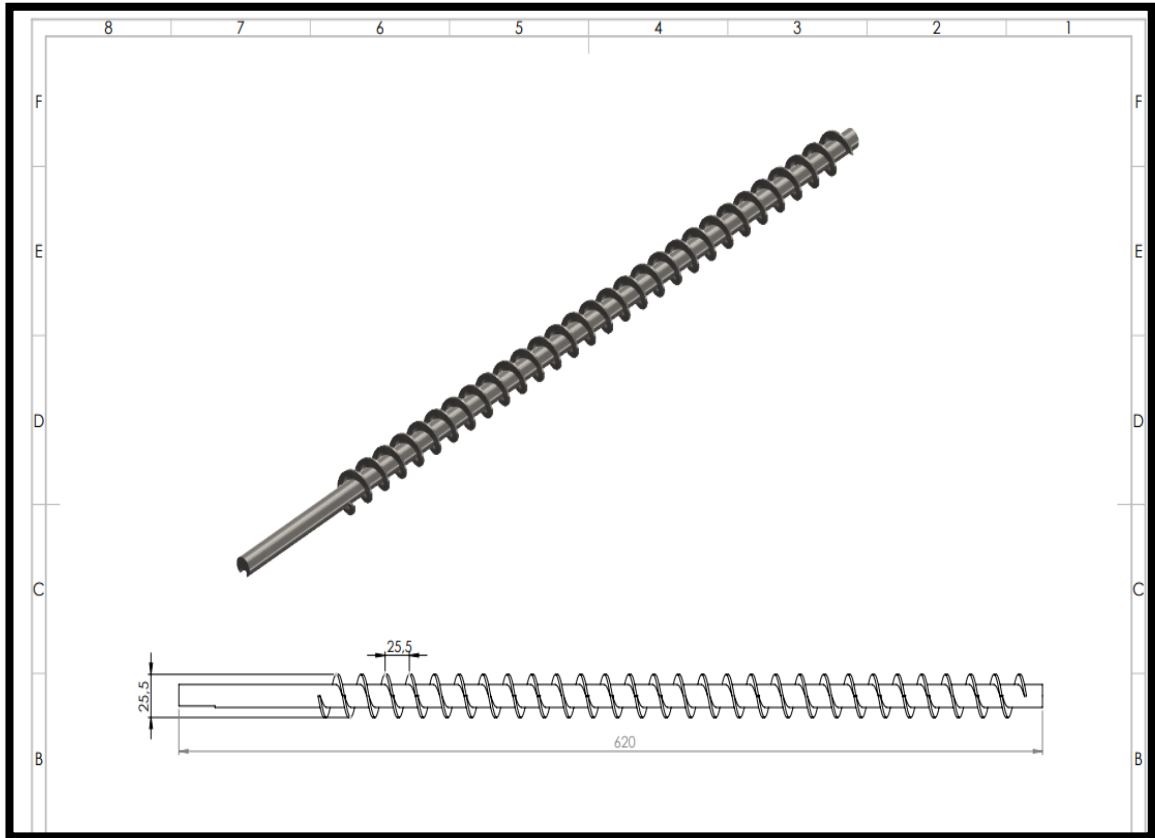
### Anexo H - Base de Tornillo



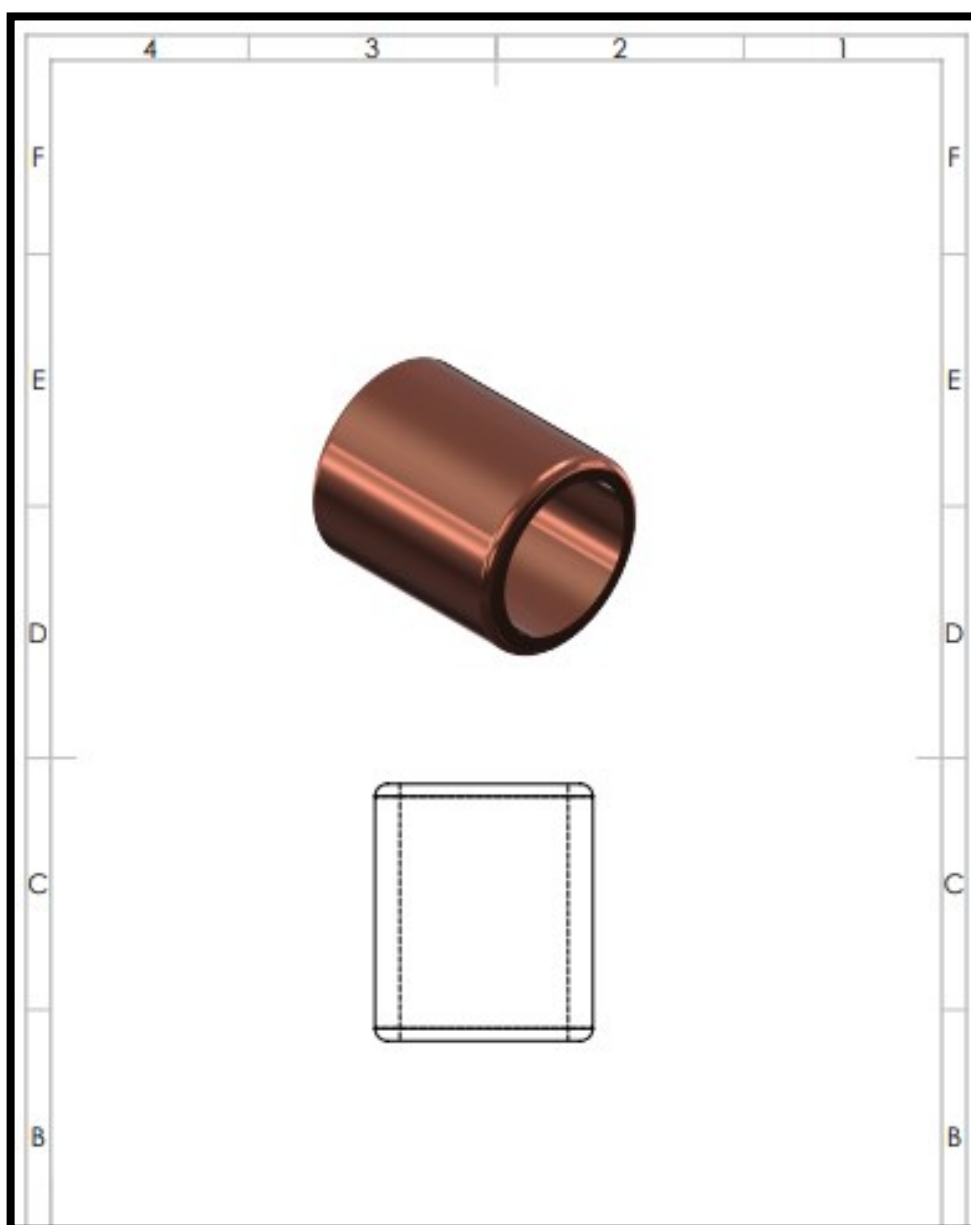
### Anexo I - Cilindro



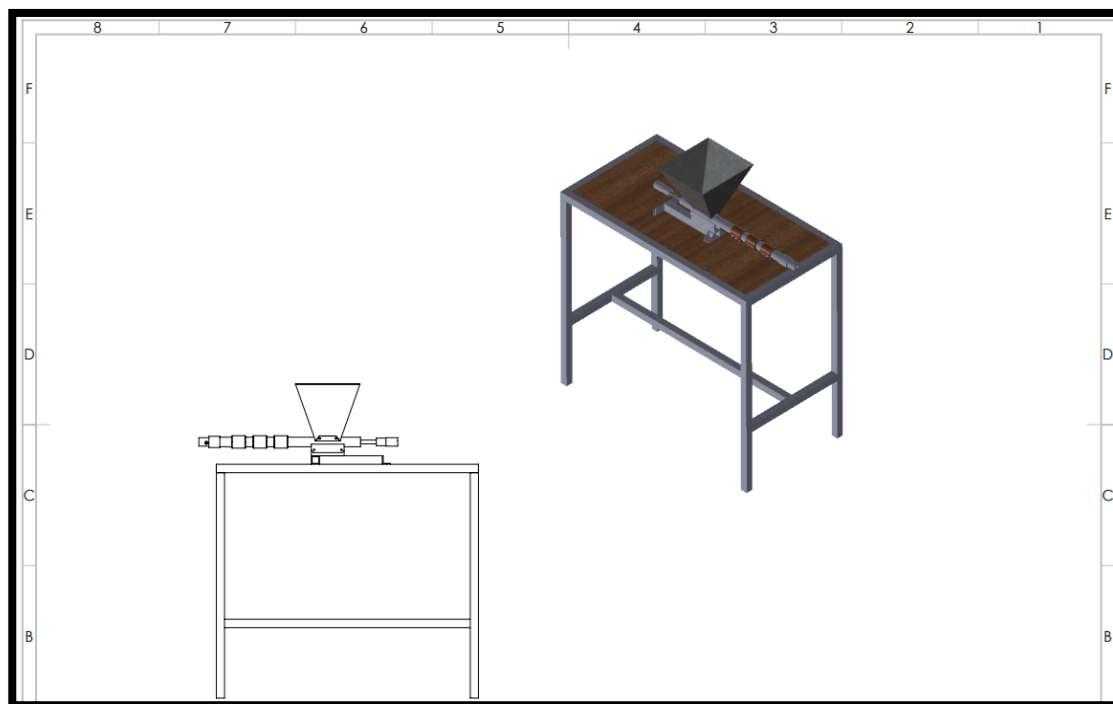
### Anexo J - Husillo



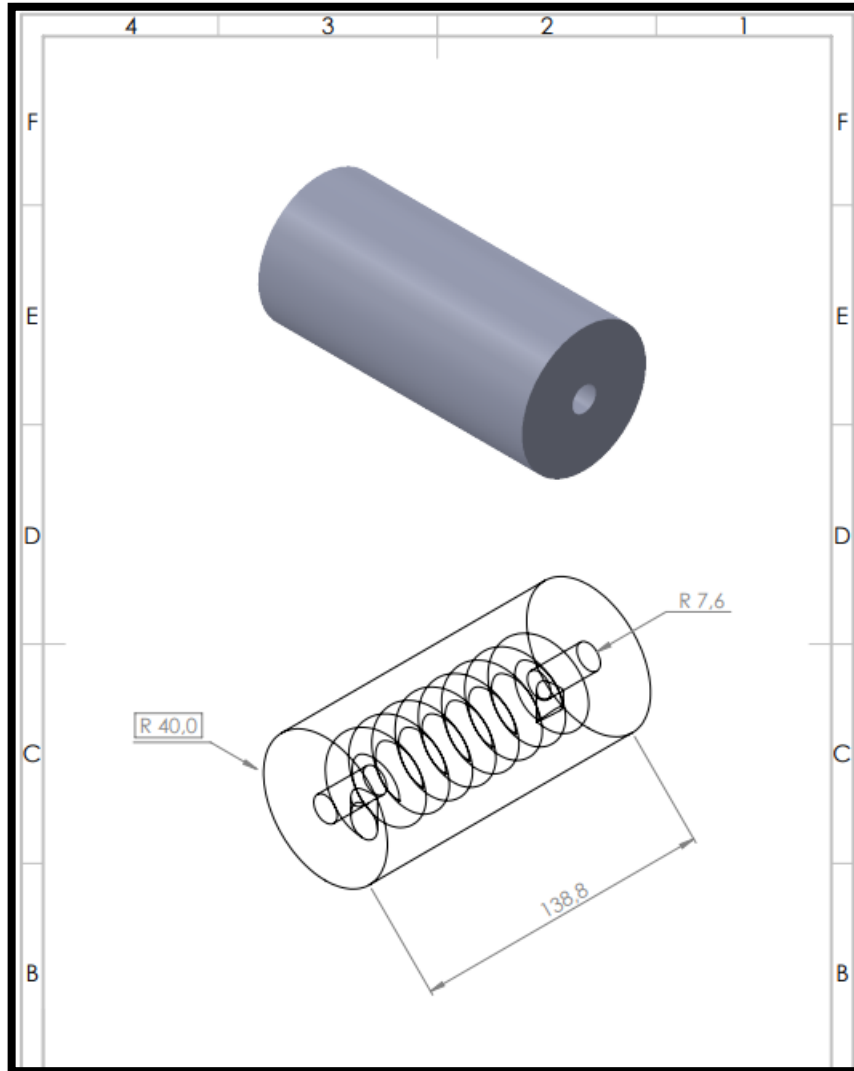
## Anexo K - Resistencia



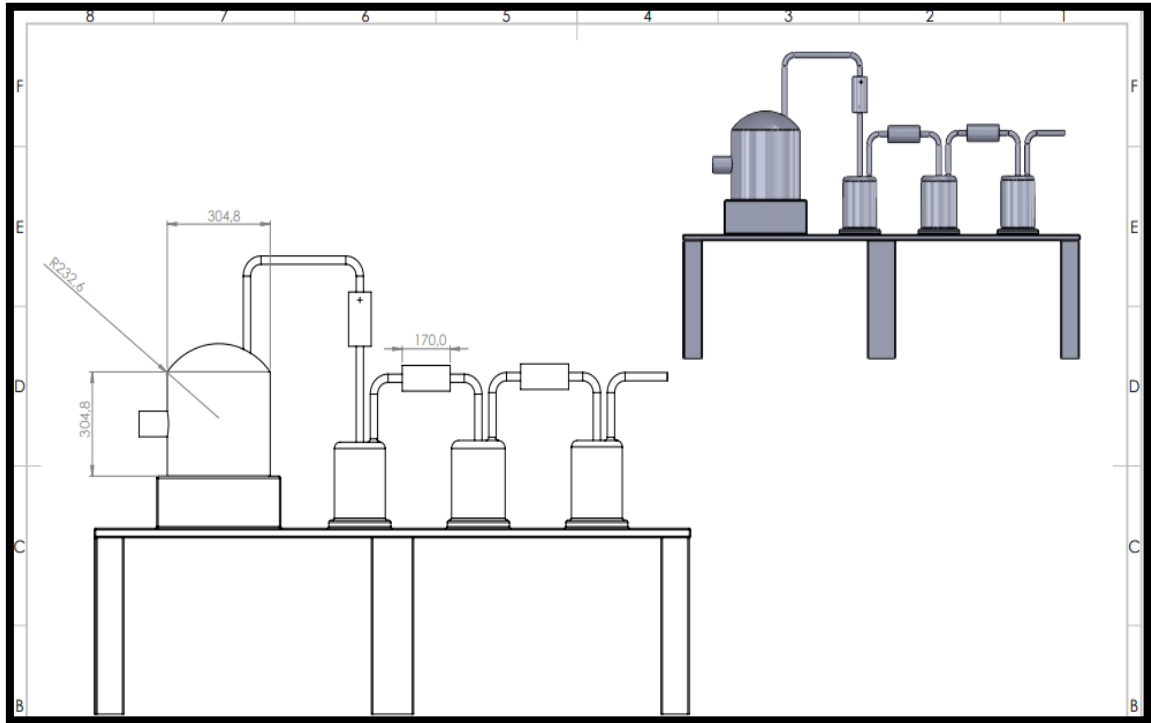
### Anexo 1 - Ensamble Tornillo



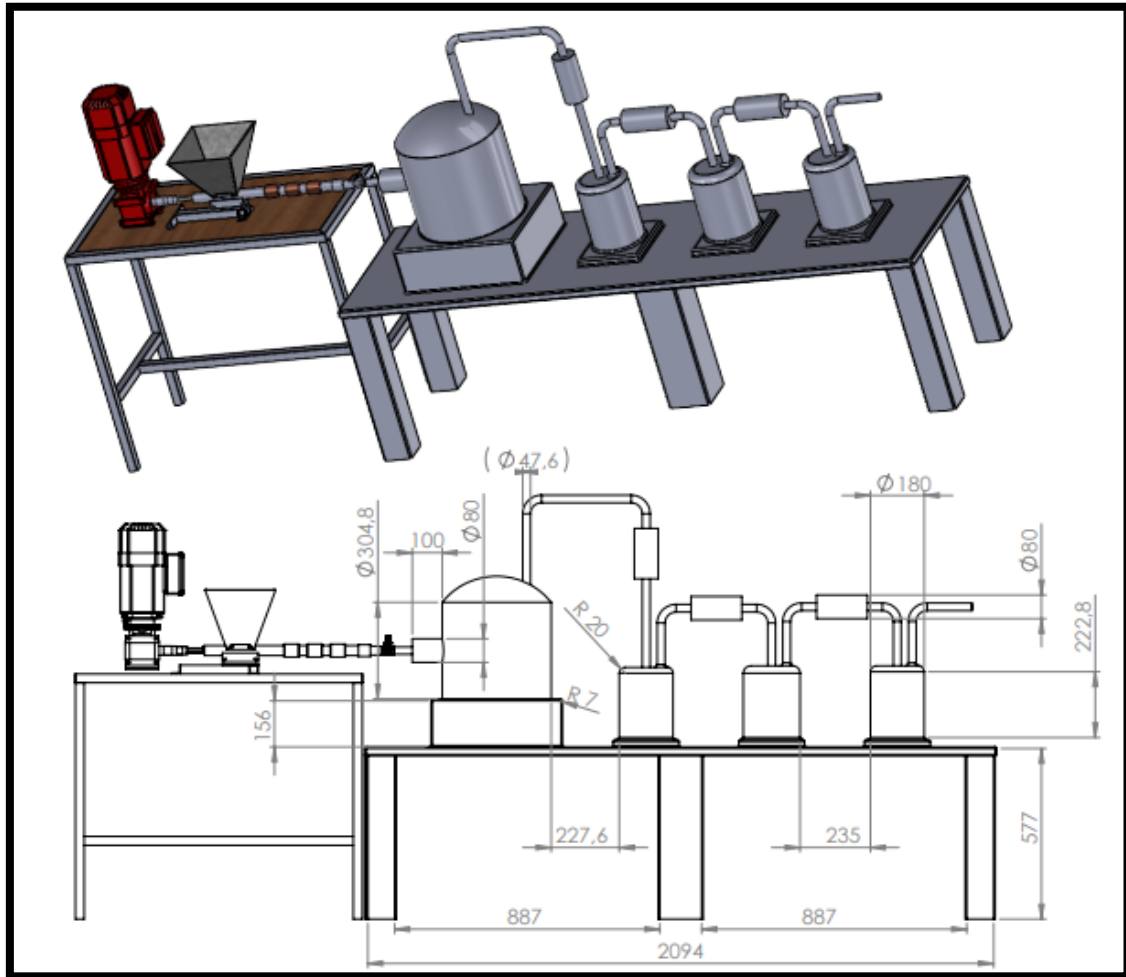
### Anexo M - Condensador



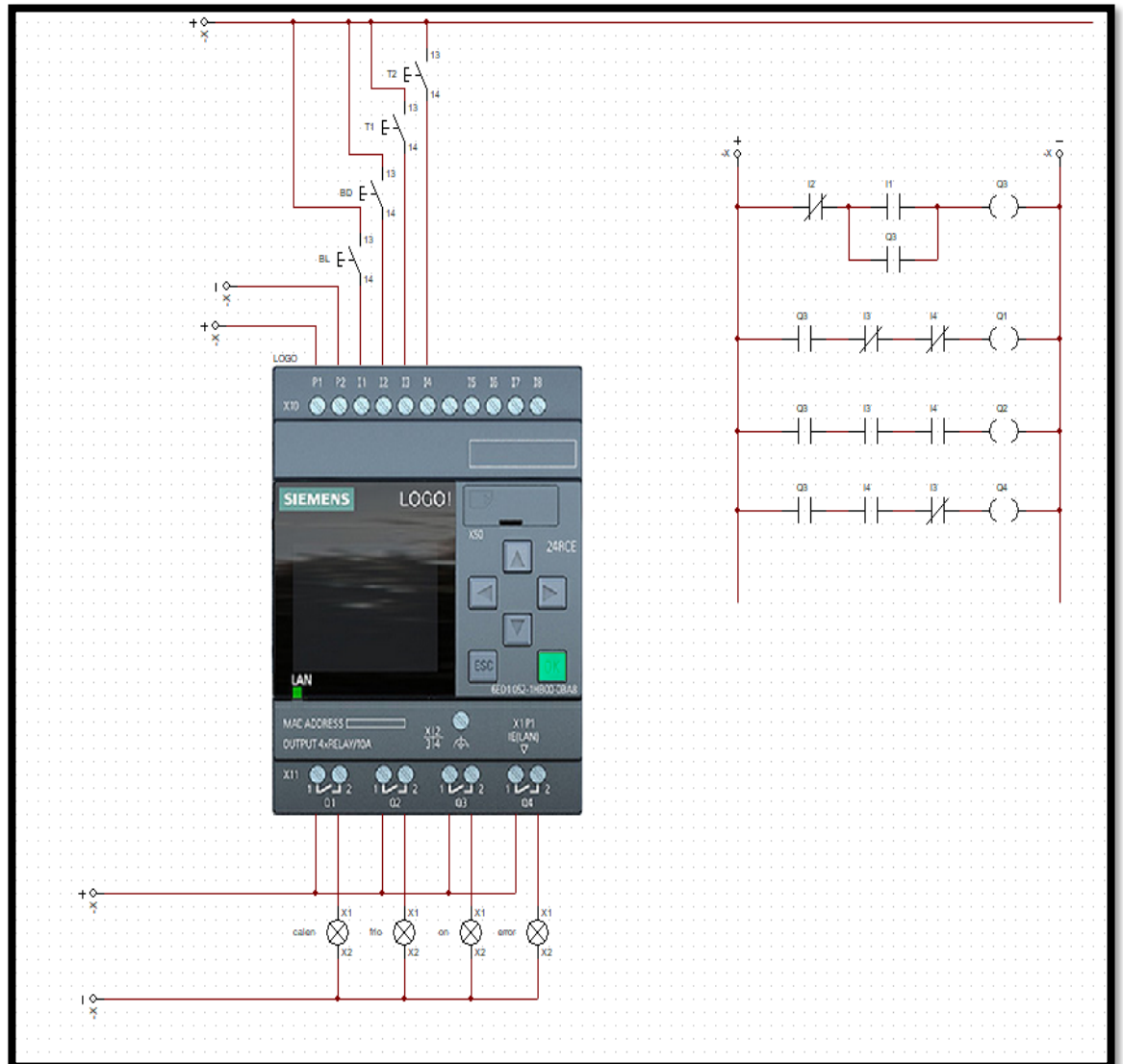
### Anexo N - Ensamble Reactor



### Anexo O - Ensamble Total



### Anexo P - Sistema de Control de Temperatura



Anexo Q - Sistema de Control y Fuerza con Variador

