



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE REACTOR DE PIRÓLISIS
TÉRMICA PARA LA DESCOMPOSICIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS
FABRICADOS A PARTIR DEL PP, PE, Y PS.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES:

JUAN DANIEL FIGUEROA MORENO

STALIN WLADIMIR CHELA HINOJOSA

Riobamba - Ecuador

2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE REACTOR DE PIRÓLISIS
TÉRMICA PARA LA DESCOMPOSICIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS
FABRICADOS A PARTIR DEL PP, PE, Y PS.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: JUAN DANIEL FIGUEROA MORENO

STALIN WLADIMIR CHELA HINOJOSA

DIRECTOR: Ing. OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO

Riobamba - Ecuador

2021

© 2021, Juan Daniel Figueroa Moreno; & Stalin Wladimir Chela Hinojosa

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

Nosotros, Juan Daniel Figueroa Moreno y Stalin Wladimir Chela Hinojosa, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

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

Riobamba, 22 de marzo del 2021



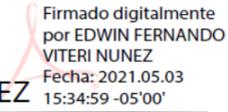
Juan Daniel Figueroa Moreno
040186932-6



Stalin Wladimir Chela Hinojosa
025000779-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Proyecto Técnico, **DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA PARA LA DESCOMPOSICIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS FABRICADOS A PARTIR DE: PP, PE, Y PS**, realizado por los señores: **JUAN DANIEL FIGUEROA MORENO Y STALIN WLADIMIR CHELA HINOJOSA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ  Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2021.05.03 15:34:59 -05'00'	2021-03-22
Ing. Otto Fernando Balseca Sampedro DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 Firmado electrónicamente por: SOCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA	2021-03-22
Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: SOCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA	2021-03-22

DEDICATORIA

Al culminar una etapa llena de experiencias, en un trayecto extenso, en el cual se presentaron tantas dichas como dificultades, todas con un enorme legado de aprendizaje, quiero dedicar el presente trabajo de titulación a las personas que en ningún momento dudaron en brindarme su apoyo, quienes a cada tropiezo extendieron su mano permitiéndome levantar y seguir avanzando; a mi papá, Juan quién con su ejemplo, constantemente me recordaba el valor de la perseverancia, a mi mamá, Teresa de Jesús quién me enseñó el valor de la bondad; a mis hermanas Verónica y Gabriela, a mis sobrinos Anddy y Nicolás; dedicado también a todos aquellos familiares, docentes compañeros y amigos que fueron parte del proceso.

Juan

Dedicado a mis padres Ángel Chela y Martha Hinojosa por brindarme su apoyo incondicional para que culmine esta etapa primordial de mi vida, ya que ayudó a desempeñarme adecuadamente en esta etapa académica con mucha responsabilidad. De igual manera a toda mi familia, principalmente a mis abuelitos por estar siempre atentos a mí, con sus oraciones, consejos y cariño infinito que me fortalecieron para conseguir mis metas.

Stalin

AGRADECIMIENTO

Extiendo mis más sinceros agradecimientos a la prestigiosa Escuela de Ingeniería Mecánica, por permitirme estudiar en sus aulas; a todos a aquellos docentes bien preparados que impartían sus conocimientos, en especial a los Ingenieros Otto Balseca y Miguel Aquino; quienes fueron parte del presente trabajo de titulación, eterna gratitud a mis padres, por brindarme su total apoyo y el privilegio de poder estudiar una profesión, a mis amigos quienes en el trayecto fueron un pilar fundamental, siendo como una familia, gracias a todos y cada uno de ustedes por permitir que esto haya sido posible.

Juan

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por darme la oportunidad de obtener un título universitario y así poder ser un aporte para la sociedad. De la misma forma a mis maestros que conocí durante mi vida estudiantil que me brindaron sus conocimientos y experiencias para alcanzar este objetivo. A mi familia por su apoyo y confianza depositada en mí.

Stalin

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
ÍNDICE DE ANEXOS	xx
RESUMEN	xxi
SUMMARY	xxii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	4
1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Objetivos	5
<i>1.2.1 Objetivo General.....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>5</i>
CAPÍTULO II	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 Plásticos	7
<i>2.1.1 Definición</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2 Clasificación de los plásticos.....</i>	<i>7</i>
<i>2.1.3 Métodos de reciclaje para residuos plásticos</i>	<i>8</i>
<i>2.1.3.1 Reciclaje mecánico.....</i>	<i>8</i>
<i>2.1.3.2 Reciclaje Químico</i>	<i>8</i>
<i>2.1.3.3 Reciclaje Energético.....</i>	<i>8</i>
2.2 Pirólisis	9
<i>2.2.1 Definición</i>	<i>9</i>
<i>2.2.2 Fundamentos del Proceso de Pirólisis</i>	<i>9</i>
<i>2.2.3 Reacción general del proceso de pirolisis</i>	<i>11</i>
<i>2.2.4 Tipos de pirolisis</i>	<i>11</i>
<i>2.2.5 Parámetros que influyen el proceso de pirolisis.....</i>	<i>13</i>

2.2.5.1	<i>Temperatura</i>	13
2.2.5.2	<i>Tiempo de pirolisis</i>	14
2.2.5.3	<i>Presión de funcionamiento</i>	14
2.2.5.4	<i>Velocidad de calefacción</i>	15
2.2.5.5	<i>Presencia de gases reactivos, como oxígeno o hidrógeno</i>	15
2.2.5.6	<i>Uso de catalizadores</i>	15
2.2.5.7	<i>Fase líquida o de gas</i>	15
2.2.5.8	<i>Densidad y humedad de la muestra</i>	16
2.2.6	Productos obtenidos a partir del proceso de pirolisis	16
2.3	Tipos de reactores para pirolisis	17
2.3.1	Reactor batch	17
2.3.2	Reactor semi-batch	18
2.3.3	Reactor de lecho fijo	19
2.3.4	Reactor de lecho fluidizado	19
2.3.5	Reactor de tornillo	20
CAPÍTULO III		21
3.	MARCO METODOLÓGICO	21
3.1	Diseño conceptual del prototipo de Reactor de pirólisis térmica	21
3.2	Proceso del despliegue de la casa de la calidad (QFD)	21
3.2.1	Identificación de los requerimientos para el reactor de pirolisis	21
3.2.1.1	<i>Identificación de las necesidades de la voz del usuario</i>	22
3.2.1.2	<i>Voz del ingeniero</i>	22
3.3	Análisis de Competitividad	23
3.4	Despliegue de la casa de la calidad “Reactor de Pirólisis Térmica”	24
3.5	Análisis funcional, modular	25
3.5.1	Generación de alternativas para cada módulo del prototipo	27
3.5.1.1	<i>Control y monitoreo de los parámetros óptimos</i>	27
3.5.1.2	<i>Calentamiento y sistema de aislamiento térmico del reactor</i>	28
3.5.1.3	<i>Transporte de gases producidos por la degradación de plásticos</i>	31
3.5.1.4	<i>Condensador y salida de gases</i>	32
3.5.1.5	<i>Salida de combustible líquido</i>	33
3.6	Matriz morfológica por módulos de las alternativas de solución	33
3.6.1	Solución 1	34
3.6.2	Solución 2	35
3.6.3	Solución 3	35
3.6.4	Solución 4	36

3.7	Método ordinal de ponderación para la evaluación de las soluciones	36
3.8	Diseño Conceptual de la Máquina.....	40
3.9	Diseño de materialización	40
3.9.1	<i>Volumen tentativo.....</i>	40
3.9.2	<i>Diseño del cuerpo cilíndrico.....</i>	42
3.9.2.1	<i>Cuerpo cilíndrico de la junta principal</i>	42
3.9.2.2	<i>Cuerpo cilíndrico del conjunto de abastecimiento</i>	43
3.9.3	<i>Diseño de las tapas</i>	44
3.9.3.1	<i>Tapa toriesférica</i>	44
3.9.3.2	<i>Tapa plana</i>	46
3.9.4	<i>Volumen de la tapa toriesférica.....</i>	48
3.9.4.1	<i>Volúmenes por secciones de la tapa toriesférica.....</i>	50
3.9.5	<i>Diseño de pernos.....</i>	50
3.9.5.1	<i>Pernos de brida principal.....</i>	50
3.9.5.2	<i>Pernos de abastecimiento.....</i>	57
3.9.6	<i>Diseño del diámetro para la toma de vapores</i>	60
3.9.7	<i>Calor necesario o calor de aporte.....</i>	61
3.9.7.1	<i>Análisis Ideal.....</i>	61
3.9.7.2	<i>Análisis en condiciones reales.....</i>	63
3.9.8	<i>Análisis en las tuberías de transporte de gases</i>	68
3.9.8.1	<i>Cálculo de la temperatura superficial de la tubería</i>	68
3.9.8.2	<i>Convección Natural en la tubería.....</i>	71
3.10	Validación del prototipo reactor de pirolisis a través de ANSYS Workbench	73
3.10.1	<i>Análisis térmico del prototipo.....</i>	73
3.10.1.1	<i>Pre-proceso</i>	73
3.10.1.2	<i>Post Proceso.....</i>	76
3.10.2	<i>Análisis estructural del prototipo</i>	77
3.10.2.1	<i>Pre proceso</i>	77
3.10.2.2	<i>Post proceso</i>	80
3.10.2.3	<i>Análisis con Sizing 2 mm.....</i>	82
3.10.3	<i>Análisis estructural de los pernos entre la tapa y cuerpo cilíndrico.</i>	84
3.10.3.1	<i>Pre-proceso</i>	84
3.10.3.2	<i>Post proceso</i>	87
3.10.4	<i>Análisis estructural de la alimentación de los plásticos.....</i>	91
3.10.4.1	<i>Pre-proceso</i>	91
3.10.4.2	<i>Post proceso</i>	95
3.11	Análisis de la velocidad de flujo en la tubería.	99

3.11.1	Pre-proceso	99
3.11.1.1	Geometría.....	99
3.11.1.2	Condiciones iniciales.....	100
3.11.2	Post proceso	100
3.11.2.1	Análisis de flujo “Element Size -Por Defecto”	100
3.11.2.2	Análisis de flujo “Element Size 1.5 mm”	101
3.11.2.3	Análisis de flujo “Element Size 1 mm”	102
3.11.2.4	Análisis de flujo “Element Size 0,75 mm”	102
3.12	Análisis de la estructura de soporte mediante SAP 2000	103
3.12.1	Pre-proceso	103
3.12.1.1	Geometría.....	103
3.12.1.2	Material.....	103
3.12.1.3	Parámetros de diseño	104
3.12.1.4	Cargas de diseño.	105
3.12.2	Post proceso	106
3.13	Selección de componentes	107
3.13.1	Resistencia eléctrica	107
3.13.2	Arduino	108
3.13.3	Pantalla Display LCD 20x4.....	108
3.13.4	Triac.....	109
3.13.5	Termopar tipo K.....	109
3.13.6	Optoacoplador	110
3.13.7	Manómetro 200 psi.....	110
3.13.8	Válvula de alivio	111
3.13.9	Tubería de acero inoxidable.....	112
3.13.10	Llave de paso	112
3.13.11	Planchas de acero Inoxidable 304	113
3.13.12	Tubo estructural cuadrado	114
3.13.13	Manta de fibra cerámica	114
3.13.14	Acero SA-516 Gr 70.....	115
3.13.15	Recipiente a presión.....	115
3.13.16	Modelado del sistema mecánico	116
3.13.17	Modelado del sistema eléctrico	117
3.14	ANÁLISIS DE COSTOS	118
3.14.1	Costo del recipiente a presión.....	118
3.14.2	Materia prima directa:.....	119
3.14.3	Materia prima indirecta:	120

3.15	Comparación de costos de producción.....	121
<i>3.15.1</i>	<i>Costo de producción de plastic-oil.....</i>	<i>121</i>
<i>3.15.1.1</i>	<i>Costo del plástico reciclado</i>	<i>121</i>
<i>3.15.1.2</i>	<i>Costo de la energía eléctrica.....</i>	<i>122</i>
3.16	Análisis del impacto ambiental.....	124
<i>3.16.1</i>	<i>Caracterización del origen de los desechos plásticos a nivel nacional.</i>	<i>124</i>
<i>3.16.2</i>	<i>Determinación de desechos disponibles en Riobamba.....</i>	<i>126</i>
CAPÍTULO IV		129
4.	RESULTADOS.....	129
4.1	Análisis de resultados totales del sistema térmico	129
4.2	Análisis de resultados totales del estudio estructural.....	130
4.3	Análisis del estudio estructural de pernos de la brida principal	133
4.4	Análisis de resultados del estudio estructural del conjunto de alimentación .	135
4.5	Análisis de resultados del soporte estructural	138
<i>4.5.1</i>	<i>Demanda Capacidad.....</i>	<i>138</i>
<i>4.5.2</i>	<i>Deformación</i>	<i>139</i>
<i>4.5.3</i>	<i>Esfuerzos.....</i>	<i>140</i>
4.6	Análisis de resultados del flujo en la tubería	140
<i>4.6.1</i>	<i>Análisis de resultados totales de la velocidad de flujo en la tubería.....</i>	<i>140</i>
4.7	Comparación de resultados “Análisis térmico”	142
4.8	Comparación de resultados “Análisis estructural de pernos”	143
CONCLUSIONES.....		144
RECOMENDACIONES.....		146
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Clasificación de los plásticos	7
Tabla 2-2:	Comparación de tres procesos principales de conversión química.....	8
Tabla 3-2:	Rendimiento de los polímeros PE, PP Y PS en la pirólisis térmica.	10
Tabla 4-2:	Características de los procesos de pirólisis más relevantes.	12
Tabla 5-2:	Influencia del tiempo de residencia en la pirólisis térmica de plásticos	14
Tabla 6-2:	Rendimiento del producto por pirólisis de plásticos individuales (% en peso). ..	15
Tabla 7-2:	Composición química y poder calorífico de los productos de pirólisis	16
Tabla 8-2:	Composición del gas de pirólisis de plásticos en estudio (% en peso) (Velocidad de calentamiento: 20 K / min)	17
Tabla 1-3:	Voz del Usuario.....	22
Tabla 2-3:	Alternativas de mercado	23
Tabla 3-3:	Ventajas y desventajas del microcontrolador Arduino.....	27
Tabla 4-3:	Ventajas y desventajas del PLC.....	28
Tabla 5-3:	Ventajas y desventajas del GLP.....	28
Tabla 6-3:	Ventajas y desventajas del ladrillo y cemento refractario	29
Tabla 7-3:	Ventajas y desventajas de la resistencia eléctrica de banda flexible	29
Tabla 8-3:	Ventajas y desventajas de la resistencia eléctrica de banda flexible.	30
Tabla 9-3:	Ventajas y desventajas del calentador de cartucho	31
Tabla 10-3:	Ventajas y desventajas de la espuma de poliuretano.....	31
Tabla 11-3:	Ventajas y desventajas de las tuberías y accesorios de acero inoxidable	32
Tabla 12-3:	Ventajas y desventajas del condensador	32
Tabla 13-3:	Ventajas y desventajas de la válvula de seguridad.....	32
Tabla 14-3:	Ventajas y desventajas del recipiente simple	33
Tabla 15-3:	Ventajas y desventajas del recipiente fijo a la estructura con válvula de paso....	33
Tabla 16-3:	Matriz morfológica por módulos de las alternativas de solución	34
Tabla 17-3:	Ventajas y desventajas de la solución 1.....	34

Tabla 18-3:	Ventajas y desventajas de la solución 2.....	35
Tabla 19-3:	Ventajas y desventajas de la solución 3.....	35
Tabla 20-3:	Ventajas y desventajas de la solución 4.....	36
Tabla 21-3:	Grado de importancia de los criterios de evaluación	37
Tabla 22-3:	Peso específico de los criterios de evaluación	37
Tabla 23-3:	Grado de prioridad de las soluciones con respecto a los criterios	37
Tabla 24-3:	Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Costo”	38
Tabla 25-3:	Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Capacidad”	38
Tabla 26-3:	Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Material”	38
Tabla 27-3:	Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Eficiencia”	39
Tabla 28-3:	Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Mantenimiento”	39
Tabla 29-3:	Resultados de las posibles soluciones.....	39
Tabla 30-3:	Factor de forma del domo toriesférico.....	46
Tabla 31-3:	Características técnicas de la resistencia de banda cerámica	63
Tabla 32-3:	Propiedades térmicas de los materiales.....	73
Tabla 33-3:	Cargas térmicas del sistema.....	74
Tabla 34-3:	Propiedades del acero SA 516 Gr 70	77
Tabla 35-3:	Cargas aplicadas en el reactor.....	78
Tabla 36-3:	Propiedades del acero SA 516 Gr 70	84
Tabla 37-3:	Propiedades del perno grado métrico 5.8.....	84
Tabla 38-3:	Propiedades del empaque de asbesto	85
Tabla 39-3:	Coefficientes de fricción entre materiales de interés	85
Tabla 40-3:	Cargas asignadas para el análisis de pernos	86
Tabla 41-3:	Propiedades del acero SA 516 Gr 70	92
Tabla 42-3:	Propiedades del perno grado métrico 5.8.....	92
Tabla 43-3:	Propiedades del empaque de asbesto	92
Tabla 44-3:	Coefficientes de fricción entre materiales de interés	93
Tabla 45-3:	Cargas asignadas para el análisis estructural de la alimentación´	93

Tabla 46-3:	Valores de calidad de malla para Skewness	99
Tabla 47-3:	Condiciones iniciales para análisis de velocidad del flujo	100
Tabla 48-3:	Especificaciones de los perfiles estructurales	103
Tabla 49-3:	Parámetros de diseño para análisis de estructura en SAP	104
Tabla 50-3:	Especificaciones técnicas – Resistencia eléctrica tipo banda cerámica	107
Tabla 51-3:	Especificaciones técnicas-Controlador Arduino	108
Tabla 52-3:	Especificaciones técnicas-Pantalla Display LCD 20x4	108
Tabla 53-3:	Especificaciones técnicas-Triac	109
Tabla 54-3:	Especificaciones técnicas- Termopar tipo K	109
Tabla 55-3:	Especificaciones técnicas-Optoacoplador	110
Tabla 56-3:	Especificaciones técnicas- Manómetro	111
Tabla 57-3:	Especificaciones técnicas-Válvula de alivio	111
Tabla 58-3:	Especificaciones técnicas-Tubería de acero inoxidable	112
Tabla 59-3:	Especificaciones técnicas-Llave de paso	113
Tabla 60-3:	Especificaciones técnicas – Planchas de acero inoxidable	113
Tabla 61-3:	Especificaciones técnicas- Manta de fibra de cerámica	114
Tabla 62-3:	Especificaciones técnicas- Acero SA-516 Gr 70	115
Tabla 63-3:	Especificaciones técnicas- Recipiente a presión	116
Tabla 64-3:	Representación de elementos eléctricos	117
Tabla 65-3:	Costo Neto del recipiente a presión	118
Tabla 66-3:	Costos del sistema mecánico.	119
Tabla 67-3:	Costos del sistema eléctrico	120
Tabla 68-3:	Estimación de materia prima indirecta	120
Tabla 69-3:	Costo total	121
Tabla 70-3:	Precio de plástico reciclado en la ciudad de Riobamba	122
Tabla 71-3:	Cantidad de desechos plásticos según sus diferentes tipos	126
Tabla 72-3:	Composición física de residuos sólidos	127
Tabla 73-3:	Caracterización de residuos sólidos en kg	127

Tabla 1-4:	Resumen de resultados “Análisis térmico”	129
Tabla 2-4:	Resumen de resultados “Análisis estructural”	131
Tabla 3-4:	Resumen de resultados “Análisis estructural pernos”	133
Tabla 4-4:	Resumen de resultados “Conjunto de alimentación”	136
Tabla 5-4:	Resumen de resultados “Análisis velocidad de flujo”	140
Tabla 6-4:	Comparación de resultados “Análisis térmico”	142
Tabla 7-4:	Comparación de resultados “Análisis estructural de pernos”	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2.	Proceso de Pirólisis.....	11
Figura 2-2.	Tipos de proceso de Pirólisis	13
Figura 3-2.	Reactor Batch	18
Figura 4-2.	Reactor semi - batch	18
Figura 5-2.	Reactor de lecho fijo.....	19
Figura 6-2.	Reactor de lecho fluidizado	20
Figura 7-2.	Reactor de Tornillo.....	20
Figura 1-3.	Matriz QFD (Casa de la calidad)	24
Figura 2-3.	Análisis Modular Nivel Cero.....	26
Figura 3-3.	Análisis Modular Nivel uno.....	26
Figura 4-3.	Microcontrolador Arduino.....	27
Figura 5-3.	Controlador lógico programable (PLC)	28
Figura 6-3.	Resistencia eléctrica de banda flexible	29
Figura 7-3.	Aislante de fibra de cerámica.....	30
Figura 8-3.	Tuberías de acero inoxidable	31
Figura 9-3.	Válvula de seguridad	32
Figura 10-3.	Diseño conceptual - reactor de pirólisis	40
Figura 11-3.	Cuerpo cilíndrico	42
Figura 12-3.	Diseño de tapa toriesférica.....	45
Figura 13-3.	Tapa plana	47
Figura 14-3.	Dimensionamiento de tapa toriesférica.....	48
Figura 15-3.	Referencia para determinar la rigidez del sujetador	53
Figura 16-3.	Circuito térmico ideal	61
Figura 17-3.	Resistencia de banda cerámica.....	63
Figura 18-3.	Boceto del reactor de pirólisis y sus componentes	64
Figura 19-3.	Circuito térmico Real.....	64

Figura 20-3.	Análisis térmico para el acero.....	65
Figura 21-3.	Análisis térmico para el aislamiento	66
Figura 22-3.	Modelado del sistema térmico	74
Figura 23-3.	Asignación de parámetros térmicos en el reactor.....	75
Figura 24-3.	Paleta de colores Element Quality	75
Figura 25-3.	Mallado del sistema térmico	75
Figura 26-3.	Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Por defecto”	76
Figura 27-3.	Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Sizing 4”	76
Figura 28-3.	Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Sizing 2”	77
Figura 29-3.	Geometría 3D y 2D del reactor de pirolisis.....	78
Figura 30-3.	Asignación de parámetros estructurales en el reactor	79
Figura 31-3.	Paleta de colores Element Quality	79
Figura 32-3.	Mallado del reactor.....	79
Figura 33-3.	Resultados de esfuerzos en el reactor “Por defecto”	80
Figura 34-3.	Resultados deformación total en el reactor “Por defecto”	80
Figura 35-3.	Resultados factor de seguridad del reactor “Por defecto”	81
Figura 36-3.	Resultados de esfuerzos en el reactor “Sizing 4 mm”	81
Figura 37-3.	Resultados deformación total en el reactor “Sizing 4 mm”	82
Figura 38-3.	Resultados factor de seguridad del reactor “Sizing 4 mm”	82
Figura 39-3.	Resultados de esfuerzos en el reactor “Sizing 3,5 mm”	83
Figura 40-3.	Resultados deformación total en el reactor “Sizing 3,5 mm”	83
Figura 41-3.	Resultados factor de seguridad del reactor “Sizing 3,5 mm”	83
Figura 42-3.	Conjunto de brida y pernos	85
Figura 43-3.	Asignación de parámetros estructurales para análisis de los pernos.....	86
Figura 44-3.	Paleta de colores Element Quality	87
Figura 45-3.	Mallado de los pernos y sección de interés	87
Figura 46-3.	Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 2 mm”	88
Figura 47-3.	Resultados deformación total en los pernos “Sizing 2 mm”	88

Figura 48-3.	Resultados factor de seguridad en los pernos y tuercas “Sizing 2 mm”	88
Figura 49-3.	Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 15 mm”	89
Figura 50-3.	Resultados deformación total en los pernos “Sizing 15 mm”	89
Figura 51-3.	Resultados factor de seguridad en los pernos “Sizing 15 mm”	90
Figura 52-3.	Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 10 mm”	90
Figura 53-3.	Resultados deformación total en los pernos “Sizing 10 mm”	91
Figura 54-3.	Resultados factor de seguridad en los pernos “Sizing 10 mm”	91
Figura 55-3.	Conjunto de abastecimiento de plástico	93
Figura 56-3.	Parámetros estructurales del conjunto de alimentación de plásticos	94
Figura 57-3.	Paleta de colores Element Quality	94
Figura 58-3.	Mallado del conjunto de alimentación de plásticos.....	95
Figura 59-3.	Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 1,5 mm”	95
Figura 60-3.	Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 1,5 mm”	96
Figura 61-3.	Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 1,5 mm”	96
Figura 62-3.	Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 8 mm”	97
Figura 63-3.	Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 8 mm”	97
Figura 64-3.	Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 8 mm”	97
Figura 65-3.	Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 5 mm”	98
Figura 66-3.	Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 5 mm”	98
Figura 67-3.	Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 5 mm”	99
Figura 68-3.	Geometría del fluido CO2	99
Figura 69-3.	Mallado de la tubería	100
Figura 70-3.	Resultados de velocidades del fluido “Element Size-Por Defecto	101
Figura 71-3.	Resultados de velocidades del fluido “Element Size 1,5 mm	101
Figura 72-3.	Resultados de velocidades del fluido “Element Size 1 mm”	102
Figura 73-3.	Resultados de velocidades del fluido “Element Size 0,75 mm”	102
Figura 74-3.	Dimensiones generales para estructura de soporte	103
Figura 75-3.	Asignación de perfiles estructurales en SAP 2000.....	104

Figura 76-3.	Cálculo de peso del equipo mediante Solid Works	105
Figura 77-3.	Asignación de cargas en SAP 2000	106
Figura 78-3.	Modelado de Reactor en SolidWorks	116
Figura 79-3.	Esquema de la Instalación eléctrica	117
Figura 1-4.	Análisis Demanda/Capacidad de la estructura en SAP2000	138
Figura 2-4.	Análisis de deformación en SAP 2000	139
Figura 3-4.	Análisis de Esfuerzos en SAP 2000.....	140
Figura 4-4.	Simulación de la velocidad del flujo en la tubería.	142

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1.	Producción mundial de plásticos para diferentes años	4
Gráfico 1-3.	Comparación-Precios de venta de plastic oil vs Gas oil	124
Gráfico 2-3.	Caracterización de residuos sólidos generales área urbana (%)	125
Gráfico 3-3.	Caracterización de residuos sólidos específicos en área urbana (%)	125
Gráfico 1-4.	: Temperatura exterior del recipiente vs N° nodos	129
Gráfico 2-4.	: Temperatura exterior del acero inoxidable vs N° nodos	130
Gráfico 3-4.	Esfuerzo máximo vs N° nodos.....	131
Gráfico 4-4.	Deformación total vs N° nodos.....	132
Gráfico 5-4.	Factor de seguridad mínimo vs N° nodos	132
Gráfico 6-4.	Esfuerzo máximo vs N° nodos.....	134
Gráfico 7-4.	Deformación total vs N° nodos.....	134
Gráfico 8-4.	Factor de seguridad mínimo vs N° nodos	135
Gráfico 9-4.	Esfuerzo máximo vs N° nodos.....	136
Gráfico 10-4.	Deformación total vs N° nodos.....	137
Gráfico 11-4.	Factor de seguridad mínimo vs N° nodos	137
Gráfico 12-4.	Velocidad máxima vs N° nodos.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MANUAL TÉCNICO DEL PROTOTIPO

ANEXO B : TENSIONES MÁXIMAS ADMISIBLES

ANEXO C : EFICIENCIA DE LA JUNTA

ANEXO D: DIMENSIONES DE ROSCAS MÉTRICAS

ANEXO E: CLASES MÉTRICAS DE PROPIEDAD, PERNOS

ANEXO F: DIMENSIONES DE ARANDELAS ESTRECHAS

ANEXO G: DIMENSIONES DE PERNOS

ANEXO H: MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL PERNO

ANEXO I: RIGIDEZ DE VARIOS MATERIALES

ANEXO J: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE EMPAQUES

ANEXO K: H CONVECTIVO DEL AIRE

ANEXO L: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES

ANEXO M: PARÁMETROS EN PROCESO DE PIRÓLISIS

ANEXO N: CATÁLOGO DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

ANEXO O: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL AISLANTE

ANEXO P: CATÁLOGO DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE

ANEXO Q: PROPIEDADES DEL CO₂ A 1ATM DE PRESIÓN.

ANEXO R: PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN.

ANEXO S: PLANOS

RESUMEN

El incremento exponencial en el uso de polímeros ha dado lugar a problemas de contaminación; por lo que se requiere un estudio y aplicación de diversos métodos de reciclaje. En el presente trabajo se presentó el diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica, para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de Polipropileno (PP), Polietileno (PE), y Poliestireno (PS). Para el diseño se establecieron los parámetros requeridos por el reactor, haciendo uso del método de análisis de alternativas que permitieron encontrar la mejor solución, la cual garantice una degradación eficiente de los residuos plásticos. El prototipo con capacidad 1 kg posee; un recipiente a presión, diseñado según la norma ASME VIII División I; una resistencia de tipo banda cerámica la cual otorga la temperatura necesaria para el proceso, misma que oscila entre 450 y 550 °C; instrumentos de media para presión y temperatura; y un sistema de condensación de gases. El modelado del prototipo se lo realizó mediante el software SolidWorks. Para la simulación se usó el software ANSYS, el mismo que permitió verificar el comportamiento térmico, estructural, así como también de flujo de gases; además se analizó mediante el software SAP 2000, deformaciones y esfuerzos presentes en la estructura metálica para soporte del equipo; La temperatura óptima para el proceso de pirólisis es de 550°C, además se recubrió el recipiente del reactor con una manta aislante de fibra de cerámica que garantice una temperatura segura al exterior, entre 40 y 50 °C según especifica el reglamento de permiso de trabajo. Los valores determinados analíticamente fueron contrastados mediante la simulación, en donde se obtuvo los márgenes de error bajos en todos los resultados por lo que se puede verificar que el diseño realizado se comporta en óptimas condiciones de trabajo para realizar el proceso.

Palabras clave: <REACTOR DE PIRÓLISIS>, <POLÍMEROS>, <RECIPIENTES A PRESIÓN>, <APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLASTICOS>, <ANSYS>, <ANÁLISIS TÉRMICO>.



Firmado electrónicamente por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

1066-DBRA-UPT-2021

2021-04-26

SUMMARY

The exponential increase in the use of polymers has caused contamination problems; Therefore, a study and application of various recycling methods is required. In the present work, the design of a thermal pyrolysis reactor prototype was presented, for the decomposition and use of plastic waste made from Polypropylene (PP), Polyethylene (PE), and Polystyrene (PS). For the design, the parameters required by the reactor were established, making use of the alternative analysis method that allowed finding the best solution, which guarantees an efficient degradation of plastic waste. The prototype with capacity 1 kg has a pressure vessel, designed in accordance with the ASME VIII Division I standard; a ceramic band type resistance which provides the necessary temperature for the process, which ranges between 450 and 550° C; measuring instruments for pressure and temperature; and a gas condensation system. The prototype was modeled using SolidWorks software. For the simulation, the ANSYS software was used, which allowed to verify the thermal and structural behavior, as well as the gas flow. In addition, the deformations and forces present in the metallic structure to support the equipment were analyzed using the SAP 2000 software. The optimum temperature for the pyrolysis process is 550 ° C, in addition the reactor vessel was covered with an insulating ceramic fiber blanket that guarantees a safe temperature outside, between 40 and 50 ° C as specified in the permit regulation of job. The analytically determined values were contrasted by simulation, where the low error margins were obtained in all the results, so it was possible to verify that the design carried out behaves in optimal working conditions to carry out the process.

Keywords: <PYROLYSIS REACTOR> <POLYMERS> <PRESSURE VESSELS> <PLASTIC WASTE> <ANSYS (SOFTWARE)> <THERMAL ANALYSIS>.

INTRODUCCIÓN

El plástico se ha convertido en una de las principales características del estilo de vida del ser humano por más de 50 años. La demanda de plásticos básicos cada año incrementa de manera alarmante, debido al rápido crecimiento de la población. La producción mundial de plástico ha alcanzado alrededor de 360 millones de toneladas en 2018 y ha aumentado en un 3,3% con respecto al año 2017 (Europe y EPRO, 2019, p.14) . El aumento constante de la demanda de plástico conduce a la acumulación de mayor cantidad de residuos cada año. El mercado más grande de los plásticos es el empaque, abarcando el 42% entrando en la fase de un solo uso (Geyer, Jambeck y Law, 2017, p.1). Las estimaciones referentes a la longevidad del plástico oscilan entre cientos y miles de años, se considera que todo el plástico producido a lo largo de la historia (exceptuando aquellos que han sido incinerados), aún permanece sin mineralizar o degradarse hasta la fecha. (Barnes et al., 2009). Basado en las estadísticas europeas el 38% de los residuos terminan en el vertedero o son desechados sin ningún control, el 26% se recicló y el 36% se utilizó para la recuperación de energía (Europe y EPRO, 2019, p.33).

El reciclaje de residuos plásticos se considera una alternativa, que está siendo aplicada a pequeñas escalas. Reciclar plástico puede llegar a ser un proceso costoso, debido a los implementos que permiten la correcta separación, descontaminación, triturado, secado y además la maquinaria que se requiere para lograr el aprovechamiento de dichos residuos, (Arandes Esteban, Bilbao Elorriaga y López Valerio, 2004, p.3). Debido a que se ha incrementado la demanda y uso de plásticos y por otro lado se ha reducido las fuentes de producción de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo; esto ha producido que se genere interés de muchos investigadores para descubrir y desarrollar nuevos modelos de energía (Castells y de Gracia, 2012, p.999). La conversión de energía a partir del uso de residuos plásticos ha sido considerada como una alternativa, debido a que son derivados de una fuente petroquímica, la cual posee un alto poder calorífico.

El proceso de pirólisis es la descomposición química, ya sea de materia orgánica o todo tipo de materiales, excepto los metales y vidrios, causada por el calentamiento a temperaturas altas en ausencia de oxígeno (Scheirs y Kaminsky, 2006, p.12). A partir del proceso se puede generar tanto aceites como gases, lo cual puede ser conveniente para obtener petroquímicos y a su vez generar energía a partir de residuos sólidos (Kiran, Ekinci y Snape, 2000, p.1). La pirólisis es uno de los procesos más recomendables para el aprovechamiento de residuos plásticos y este proceso fue elegido por muchos investigadores como el más eficiente ya que es capaz de producir elevada cantidad de aceite líquido hasta 80% en peso a temperatura moderada alrededor 500 C (FakhrHoseini y Dastanian, 2013, p.2). Además, el proceso de pirólisis también es muy flexible ya que los parámetros del

proceso pueden manipularse para optimizar el rendimiento del producto basado en preferencias. El aceite líquido producido se puede utilizar en múltiples aplicaciones, como hornos, calderas, turbinas y motores diésel sin necesidad de actualización o tratamiento (Bridgwater, 2012, p.2). El proceso de pirólisis no causa contaminación ya que se considera como tecnología verde, incluso el subproducto del proceso de pirólisis que es gaseoso tiene un importante valor calorífico que se puede reutilizar para compensar el requerimiento de energía general de la planta de pirólisis (Scheirs y Kaminsky, 2006).

A nivel global se han publicado muchos trabajos de investigación sobre el potencial que tiene el proceso de pirolisis en el aprovechamiento de varios tipos de plásticos para la obtención de combustibles. El manejo del proceso es mucho más fácil y flexible que el método de reciclaje común ya que no necesita un proceso de clasificación intenso, por lo tanto, menos complicado (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.2). En el proceso se analizan las condiciones óptimas tales como la temperatura, presión y tiempo de residencia en función del tipo de residuo plástico, donde el rendimiento y la calidad del producto dependen en gran medida de estos parámetros de configuración (Aracil, 2008, p.52). Es necesario añadir que el tipo de reactor que sea usado tiene un importante impacto en la degradación de los residuos plásticos, y por ende en la obtención del producto final, a escala de laboratorio el reactor más usado es el batch (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.7).

En América Latina, al igual que en el resto del mundo existe un problema de contaminación de plástico, produciéndose 17 000 ton/día; el 90% de mencionados residuos no se aprovechan, terminando en vertederos a cielo abierto o simplemente desechados a la naturaleza (Savino et al., 2018, p.5). Algunos países latinos están buscando alternativas para aprovechar los residuos generados en sus ciudades, siendo el proceso de pirólisis una de las ramas en estudio, Chile tiene estudios para implementar una planta de tratamiento de residuos sólidos mediante mencionado proceso, con capacidad de 36T/día, generando ésta alrededor 27 toneladas de crudo de a partir del proceso de pirólisis como un denominado producto con valor agregado (Ríos y Calvo, 2011, p.7). En Arequipa se analiza un proceso de pirólisis catalítica que se pueda realizar mediante el uso de zeolitas naturales las cuales se las puede obtener a partir de ceniza volcánica, para obtener fuel oil (Diana Lucia, 2019, p.31). En Colombia existe un estudio para la implementación de una planta que genera diésel sintético a partir de residuos sólidos, como plásticos y llantas usadas, lo cual evitara la contaminación y acumulación en vertederos de la ciudad de Bogotá (Farfán Olga, Peña Diego y Prieto Mónica, 2019).

En Ecuador, según datos del INEC, en el año 2018 se produjeron 12739.01 toneladas de basura a nivel nacional; de las cuales el 11.43% corresponde a plásticos, es decir una cifra de 531.461

toneladas (INEC, 2018). Existen estudios como los realizados por (Crespo y Proaño, 2013), en donde se indica como los residuos plásticos provenientes del sector bananero, fabricados a partir de polietileno de alta densidad permiten obtener diésel, gasolina y kerosene. Los plásticos fabricados a partir de poliestireno se pueden aprovechar mediante el uso de un reactor de tipo batch, en donde se obtiene un 95% de producto líquido, a una temperatura de 350°C (Intriago Molina y Rodríguez Velarde, 2017, p.5). El estudio e implementación de este tipo de tecnología permite solucionar un problema de contaminación de manera rentable.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

El uso del plástico desde su invención ha ido evolucionando, llegando a estar presente en casi todos los ámbitos de la vida diaria; un punto de inflexión fue marcado por la segunda guerra mundial. A partir de entonces, los plásticos penetraron fuertemente al mercado a través de compuestos como el nylon, el polietileno y el polipropileno, destacándose por sus buenas propiedades físicas y térmicas. La alta demanda de este producto se da por las propiedades que se describieron y por los bajos costos de producción que involucran estos productos hechos de plástico. Lo anterior se complementó con grandes avances científicos y la creación de organismos encargados de la investigación de estos materiales como la Sociedad de Plástico Industrial o la Sociedad de Ingenieros en Plástico.(BILLMEYER JR, 1975, p.15).

Todo lo mencionado ha provocado que el uso y la industria del plástico crezca de manera exponencial, como prueba de ello se tiene que, en el año 1950, la producción global de plásticos era de 1,7 millones de toneladas. Esta cifra ascendió hasta cerca de las 350 millones de toneladas en el año 2015. Esto quiere decir que la fabricación de plástico desde sus inicios ha crecido aproximadamente 165 veces.(Europe y EPRO, 2019, p.15)

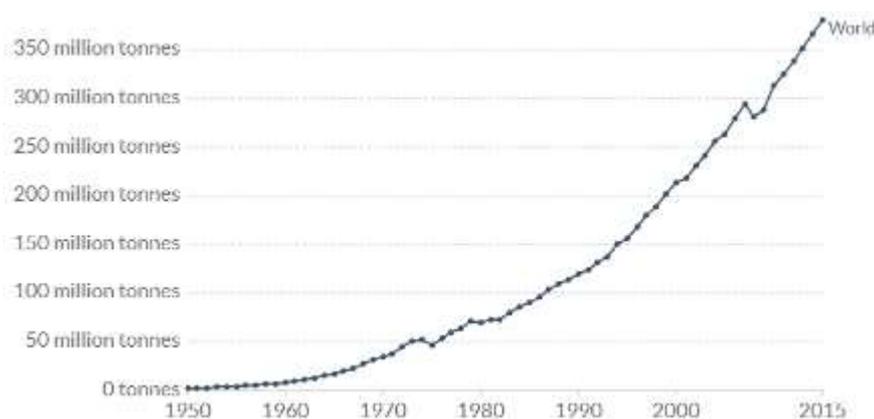


Gráfico 1-1. Producción mundial de plásticos para diferentes años

Fuente:(Geyer, Jambeck y Law, 2017)

El crecimiento de la población y los patrones de consumo, han provocado que la demanda per cápita incremente, lo que deriva en que una elevada cantidad de recursos están siendo utilizados, por ende, mayor cantidad de plásticos desechados, el tratamiento de estos residuos sólidos son cada vez más una problemática, debido al negativo impacto que tiene sobre la población y el medio ambiente, siendo estos desechos los más voluminosos de los residuos municipales e

industriales en las ciudades, deben ser tratados de manera correcta buscando una alternativa que sea eficiente y a la vez rentable. (Geyer, Jambeck y Law, 2017, p.5)

Se han propuesto diversos sistemas que por medio de tratamientos térmicos, diferentes a la incineración en masa, permiten procesar residuos sólidos; surgiendo alternativas como el proceso de pirólisis y la gasificación (Castells y de Gracia, 2012, p.478) . El proceso de pirólisis se ha consolidado como una de las alternativas más viables de reciclaje químico, se la puede realizar a escala tanto industrial, como de laboratorio, en donde a partir de residuos sólidos, es posible obtener derivados líquidos, los mismos que pueden ser usados o convertidos en combustibles; y a su vez ser usados como fuente de energía, ya sea para maquinaria, o aparatos industriales; debido a que el proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno en la mayoría de los casos, se considera como un proceso verde y viable para fomentar el reciclaje.(Díaz Caleño, 2020, p.4).

En Ecuador se generan alrededor de 1452,24 toneladas de residuos plásticos al día, siendo solo una pequeña parte reciclado; alrededor del 20%, mientras que el resto es desechado en rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto o simplemente eliminados de tal manera que terminan contaminando fuentes hidrográficas, suelos; quien se ve más afectado es el océano. (AME-INEC, 2018).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de reactor de pirólisis térmica con capacidad de un kilogramo, mediante el correcto análisis de los parámetros que implica el proceso, para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir del PP, PE, y PS.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar la normativa o código de construcción, que permita el diseño de un modelo óptimo de reactor de pirólisis térmico para la degradación y aprovechamiento de residuos plásticos en estudio.
- Simular el comportamiento de los elementos estructurales del prototipo de reactor, mediante el uso del software ANSYS, para verificar su resistencia mecánica.
- Realizar el análisis térmico del prototipo de reactor, a través del software ANSYS, para verificar su resistencia térmica.

- Analizar el costo del prototipo y el impacto ambiental que provocaría la implementación del reactor de pirólisis térmico

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Plásticos

2.1.1 Definición

Los plásticos son polímeros, formados por moléculas de carbono que se encuentran unidas mediante enlaces covalentes. Se obtienen a partir de procesos de polimerizaciones, por reacciones de adición, en donde los monómeros se unen para obtener polímeros con cadenas lineales y cadenas tridimensionales. Son derivados del petróleo y se caracterizan por la facilidad de ser moldeable. (Crespo y Proaño, 2013, p.12-25)

2.1.2 Clasificación de los plásticos

La clasificación de los plásticos, se pueden agrupar de acuerdo con sus características y comportamiento térmico-mecánico, como se muestra a continuación:

Tabla 1-2: Clasificación de los plásticos

TIPOS	CLASIFICACIÓN
Termoplásticos	Policloruro de vinilo (PVC) Poliestireno Polietileno Polipropileno Polibuteno
Elastómeros	Cauchos Gomas Látex Polisopreno
Termoestables	Las resinas Fenoplásticos o plásticos de Fenol-Formaldehido

Fuente:(Jordán y Zurita, 2015)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La sociedad de la Industria del plástico estableció un código numérico para cada tipo de plástico, con el fin de identificar la composición y que el trabajo de selección y reciclaje sea más sencillo:

1. PET - Polietileno tereftalato

2. PEAD. Polietileno de alta densidad
3. PEBD. Polietileno de baja densidad
4. PVC. Policloruro de vinilo
5. PP. Polipropileno
6. PS. Poliestireno
7. Otros

(Bridgwater, 2012, p.2)

2.1.3 Métodos de reciclaje para residuos plásticos

Consiste en la reutilización de los plásticos para la obtención de nuevos productos o derivados del mismo, teniendo en cuenta que los termoplásticos son aptos para el reciclaje.

Los métodos de reciclaje para residuos plásticos se detallan a continuación:

2.1.3.1 Reciclaje mecánico

En un método que consiste en una serie de actividades como la de preparación de los plásticos, lavado, trituración y clasificación para un mejor aprovechamiento y eficiencia del material. (Crespo y Proaño, 2013, p.10-12).

2.1.3.2 Reciclaje Químico

En el reciclaje químico, se encuentran procesos de gasificación, pirólisis e hidrogenación, siendo la tecnología más importante la del proceso de pirólisis. Este método de reciclaje consiste en aprovechar la química del residuo plástico para obtener productos combustibles. Además, transforma las largas cadenas poliméricas en cadenas de hidrocarburo más livianas (Crespo y Proaño, 2013, p.10-12).

Los principales procesos que permiten el reciclaje químico se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2-2: Comparación de tres procesos principales de conversión química

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Catalizador
Pirólisis	380 - 530	0,1 - 0,5	No requerido
Combustión	700 - 1400	>0,1	No requerido
Gasificación	500 - 1300	>0,1	No esencial

Fuente:(Basu, 2010)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.1.3.3 Reciclaje Energético

Consiste en la quema o incineración de los residuos plásticos aprovechando su elevado poder

calorífico para la obtención de energía. Este proceso de reciclaje puede realizarse en ausencia de oxígeno (Jordán y Zurita, 2015, p.35). Es relevante mencionar, que en este método se encuentran procesos de pirólisis, oxidación parcial y reducción.

Cabe mencionar, para el presente trabajo se utilizará un proceso que involucre degradación térmica de los plásticos.

2.2 Pirólisis

2.2.1 Definición

El proceso de pirólisis también conocida como termólisis, es un proceso de degradación de los materiales orgánicos que involucra la ruptura de enlaces, principalmente endotérmicos mediante el efecto del calor y en ausencia de oxígeno produciendo moléculas más pequeñas de cadenas carbonadas. El proceso de pirolisis está comprendido generalmente entre temperaturas de 300 °C a 800 °C, obteniendo productos líquidos, sólidos y gaseosos aprovechables. (Qureshi et al., 2020, p.2).

Para el proceso pirolítico de polímeros, se degrada térmicamente las moléculas que tienen cadenas largas para convertirlas en moléculas con cadenas más pequeñas y ligeras mediante calor y presión (Xu et al., 2018). Se puede obtener una cantidad mayoritaria de aceite líquido de hasta 80% en peso, siempre y cuando el proceso se de a una temperatura alrededor de 300 a 500 °C (Tulashie, Boadu y Dapaah, 2019, p.2).

2.2.2 Fundamentos del Proceso de Pirólisis

Las condiciones que tienen algunos residuos plásticos para su descomposición en ausencia de catalizadores producen bajos rendimientos en la obtención de los productos obtenidos, por lo que muchos trabajos se han centrado principalmente en el uso del polietileno, poliestireno y polipropileno. (Aracil, 2008).

La pirolisis térmica de polímeros se lleva a cabo a través de dos reacciones, estas ocurren paralelamente en el reactor.

1. En la primera reacción se presenta la ruptura aleatoria de los enlaces, provocando que las moléculas reduzcan el tamaño y consecuentemente un peso molecular más ligero. Muchas investigaciones refieren que la ruptura aleatoria es el punto principal para la degradación térmica de distintos residuos plásticos, como el poliestireno y polipropileno (Contreras Canteros, 2014, p.14).

2. La segunda reacción es la ruptura de fin de cadena de los enlaces, generando productos volátiles. Según (Contreras Canteros, 2014), la segunda reacción se consigue en la interfaz gas-liquido dentro del reactor (semi-batch), dónde para disminuir los productos volátiles generados para el polietileno, polipropileno y poliestireno, se debe reducir esta interfaz.

Es importante acotar que, cuando la temperatura es superior a los 600°C, favorece a la producción de moléculas simples de gas, a diferencia que a bajas temperaturas de 400°C y con presión elevada se producen líquidos más viscosos con elevada tendencia a la coquización (Contreras Canteros, 2014, p.20). A continuación, se muestra los rendimientos de los plásticos en estudio considerando la temperatura.

Tabla 3-2: Rendimiento de los polímeros PE, PP Y PS en la pirólisis térmica.

Pirólisis térmico		
Polímero	Temperatura °C	Rendimiento
Poliestireno PS	500 - 800	<ul style="list-style-type: none"> • Líquidas 68,55% • Gases 18,75% • Coque 12,7%
Polipropileno PP	450 - 750	<ul style="list-style-type: none"> • Líquidas 47,18% • Gases 24,63% • Coque 28,19%
Polietileno de baja densidad	120 - 136	<ul style="list-style-type: none"> • Líquidas 47,18% • Gases 24,63% • Coque 28,19%
Polietileno de alta densidad	450	<ul style="list-style-type: none"> • Líquidas 18,84% • Gases 41,25% • Coque 6,53%

Fuente:(Ilbay y Geovanny, 2018)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El proceso de pirólisis de plásticos debe seguir la secuencia que se muestra a continuación.

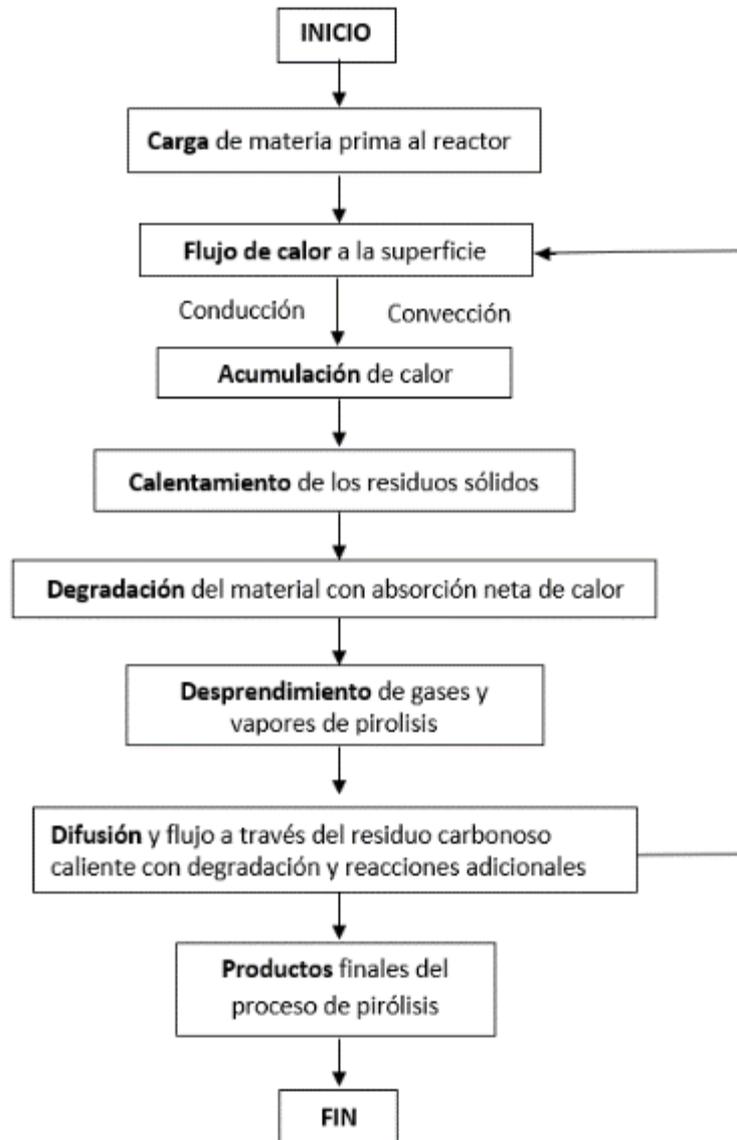


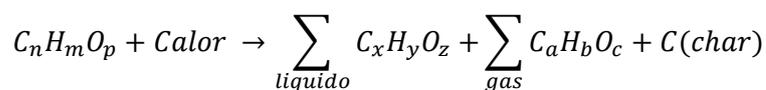
Figura 1-2. Proceso de Pirólisis

Fuente:(Aracil, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.2.3 Reacción general del proceso de pirólisis

La reacción química general del proceso de pirólisis es representada por la siguiente igualdad:



Fuente: (Basu, 2010)

2.2.4 Tipos de pirólisis

El proceso de pirólisis puede clasificarse en lenta y rápida, dónde está relacionado directamente con la velocidad de calentamiento ($^{\circ}\text{C/s}$ o K/s).

Lenta: los residuos se calientan con valores menores o iguales a 30 °C/min, ayuda mayormente a la formación de carbón y fracción gaseosa (Brown, Collard y Görgens, 2019, p.2). Dicha de otra manera, el tiempo necesitado para calentar el combustible a temperatura del proceso de pirolisis es muy superior al tiempo de reacción de la pirolisis (Guevara y Pablo, 2016, p.24).

Rápida: Los residuos se calientan con valores superiores a 150 °C/min; en dónde el vapor de pirolisis resultante se elimina muy rápido de la zona de reacción, promoviendo la obtención de una fracción líquida en mayor porcentaje (Brown, Collard y Görgens, 2019, p.1). Según investigaciones realizadas por (Encinar y González, 2008, p.4), el proceso de pirolisis rápida de los residuos plásticos se produce entre 450-550 ° C, promueve mayormente la formación de gases condensables, los cuales mediante el proceso de condensación se convierte en aceite, cera o una mezcla de ambos, consiguiendo rendimientos del 68 al 92% en peso.

A continuación, se exponen los tipos de pirolisis con las características óptimas para su operación.

Tabla 4-2: Características de los procesos de pirolisis más relevantes.

Proceso de pirolisis	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura final (°C)	Producto Final	Poder calorífico (MJ/Kg)
Carbonización	Días	Muy baja	400	Carbón	30
Convencional	5-30 min	Baja	600	Char, bio-oil, gas	20
Rápida	< 2 s	Muy alta	Aprox. 500	Bio-oil	20
Flash	< 1 s	Alta	< 650	Bio-oil, químicos, gas	15
Ultra-rápida	< 0,5 s	Muy alta	Aprox. 1000	Químicos, gas	30
Vacío	2-30 s	Medio	400	Bio-oil	15-20
Hidropirólisis	< 10 s	Alta	< 500	Bio-oil	15-20
Metanopirólisis	< 10 s	Alta	700	Químicos	15-20

Fuente: (Basu, 2010)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se muestra un esquema gráfico sobre los productos obtenidos a partir del proceso de pirolisis lenta y rápida.

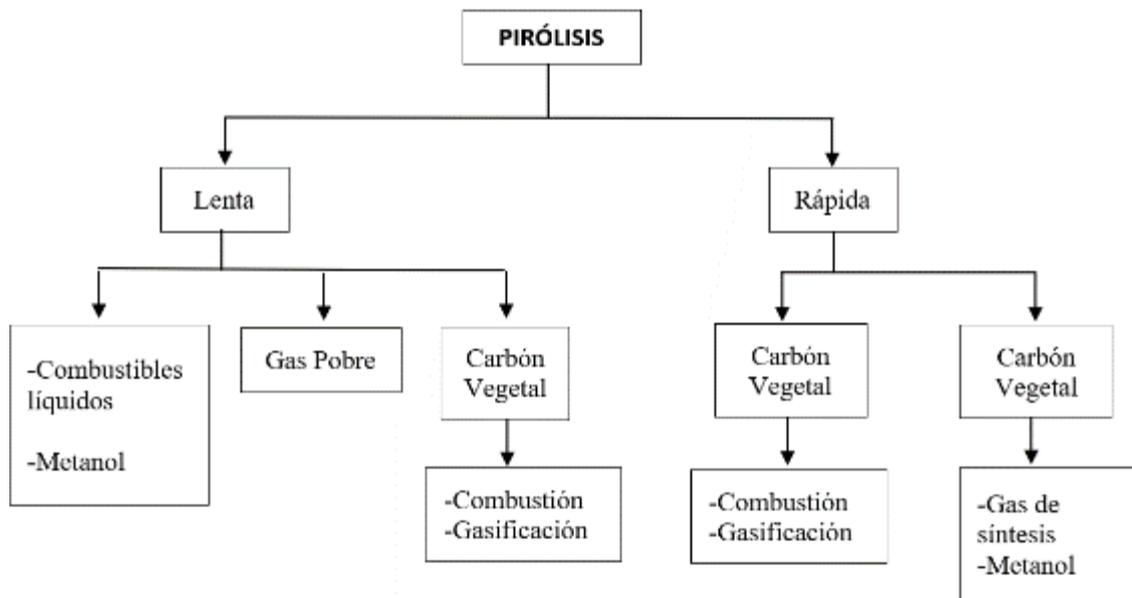


Figura 2-2. Tipos de proceso de Pirólisis

Fuente:(Guevara y Pablo, 2016)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.2.5 Parámetros que influyen el proceso de pirolisis

Para la obtención de productos líquidos, sólidos y gas en distintas proporciones a partir del proceso de pirolisis, se necesita conocer la influencia de los parámetros que dicho proceso involucra, ya que, con la variación de éstos, los resultados varían.

Los parámetros que influyen en el proceso de pirolisis se describen a continuación:

2.2.5.1 Temperatura

Una de las variables más importantes dentro del proceso de pirolisis es la temperatura, ya que permite romper los enlaces químicos de las partículas, debido a que las fuerzas de Van der Waals colapsan y se produce la ruptura del enlace Carbono-Carbono teniendo como resultado final moléculas más pequeñas (Sogancioglu, Ahmetli y Yel, 2017, p.5)

Según (Hernández, 2007, p.2), existen 3 etapas de temperatura en un proceso de pirolisis y estas son: En la primera etapa, entre 220°C - 330 °C la mayor cantidad de producto obtenido a partir de la degradación de los residuos es la fracción sólida (coque, ceniza). Seguido de 330 °C – 450°C los productos líquidos obtenidos tienen un elevado rendimiento y consecuentemente los gases se obtienen en menor cantidad. Finalmente, temperaturas sobre los 500 °C en esta instancia los residuos plásticos superan su punto de ebullición, generando gases con mayor rendimiento (Hernández, 2007, p.2).

En definitiva, la temperatura es un parámetro clave que tiene un gran efecto en el rendimiento de la fracción líquida, y gas no condensable. Es decir, a medida que aumenta la temperatura, se eleva el rendimiento del gas no condensable y paralelamente disminuye el rendimiento del aceite de pirolisis (Jin et al., 2018, p.6).

2.2.5.2 *Tiempo de pirolisis*

Es otro de los parámetros más importantes en un proceso de pirolisis ya que puede afectar considerablemente el rendimiento y distribución de los productos obtenidos, comúnmente se lo conoce como tiempo de residencia. Mientras más largos sean los tiempos de residencia, favorecen mayoritariamente a la obtención de coque, alquitrán y también productos que son estables térmicamente (Jordán y Zurita, 2018, p.22).

Por otra parte, si el tiempo de residencia es menor, la cantidad de volátiles obtenidos serán mayor. Tal es el caso, en un reactor de lecho fluidizado, la degradación flash de los residuos plásticos se da en muy pocos segundos (Hernández, 2007, p.5).

En la tabla 5-2 se muestra el efecto del tiempo de residencia en los productos obtenidos a partir de los residuos plásticos de polipropileno y poliestireno.

Tabla 5-2: Influencia del tiempo de residencia en la pirólisis térmica de plásticos

Tipo de polímero	Tiempo de residencia	Temperatura	Productos	
Poliestireno	120 min	850	Gaseosos	14,3 %
	90 min	780	Gaseosos	13,4 %
	<50 min	300 - 500	Líquidos	66,3 %
	<30 min	110 - 320	Líquidos	68,55 %
	0,8 – 1,5 seg	640	Líquidos	79,7 %
			Sólidos	9,9 %
			Gaseosos	11,4 %
Polipropileno y poliestireno	<20 min	285 - 400	Líquidos	76 - 84 %
	6 horas	...	Líquidos	68,44 %
			Sólidos	11,2 %
			Gaseosos	20,36 %

Fuente:(Ilbay y Geovanny, 2018)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.2.5.3 *Presión de funcionamiento*

Es un parámetro primordial para el diseño mecánico del reactor, ya que a través de este parámetro se calculará el espesor del recipiente a presión.

La presión baja hace que se reduzca la condensación de fragmentos reactivos creando coque y pesados (Jordán y Zurita, 2018, p.22).

2.2.5.4 Velocidad de calefacción

La velocidad de calefacción puede ser lenta y flash. En un proceso de pirólisis lenta, la fracción sólida eleva su rendimiento descendiendo el de los líquidos y gases. Mientras que en una pirólisis flash, ayuda a la formación mayoritaria de productos líquidos y gaseosos, empleando velocidades de calefacción superiores a 250 K/s (Hernández, 2007, p.4).

En la siguiente tabla, se aprecia los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis del poliestireno, polietileno y polipropileno por influencia de la velocidad de calentamiento.

Tabla 6-2: Rendimiento del producto por pirólisis de plásticos individuales (% en peso).

Plástico	Velocidad de calentamiento K/min	Carbón %	Aceite/cera %	Gases %
Poliestireno (PS)	5	1,95	95,77	2,28
	10	1,81	95,79	3,40
	15	1,60	92,75	5,65
	20	1,04	92,65	6,31
Polietileno de baja densidad (PE)	5	0,18	81,65	18,17
	10	0,10	81,33	18,57
	15	0,01	72,63	27,36
	20	0	61,24	38,76
Polipropileno (PP)	5	0,11	83,84	16,55
	10	0,13	82,67	17,20
	15	0,10	82,02	17,88
	20	0,10	68,06	31,84

Fuente:(Encinar y González, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.2.5.5 Presencia de gases reactivos, como oxígeno o hidrógeno

La presencia interna de estos gases genera calor, disuelve los productos y las influencias sobre los equilibrios, la cinética y los mecanismos.

2.2.5.6 Uso de catalizadores

El uso de los catalizadores (ácidos) tiene efecto en la cinética y los mecanismos, así generando la distribución del producto.

2.2.5.7 Fase líquida o de gas

La pirólisis en estado líquida retrasa la salida de los productos en evolución, produciendo la

mejora de las interacciones (Jordán y Zurita, 2018, p.22).

2.2.5.8 Densidad y humedad de la muestra

Los residuos plásticos con elevada densidad producen la captura de alquitranes conduciendo a una mayor degradación de la muestra, produciendo una disminución en la formación de la fracción sólida e hidrocarburos pesados. (Jordán y Zurita, 2018, p.22).

Por otro lado, si la muestra tiene un elevado contenido de agua, una parte del calor entregado para la degradación de los plásticos será consumido para el secado de la muestra, por lo que la temperatura de degradación se reducirá, así obteniendo favorablemente la fracción líquida y sólida (Hernández, 2007, p.5).

2.2.6 Productos obtenidos a partir del proceso de pirolisis

A partir del proceso de pirolisis se obtienen productos que dependen directamente de la temperatura de operación, como se muestra a continuación (Guevara y Pablo, 2016, p.11):

- A temperaturas altas, se obtiene a gran cantidad de productos gaseosos.
- A temperaturas medias, se consigue mayor producción de líquidos.
- A temperaturas bajas, los tiempos de residencia se elevan por lo que se obtienen mayores proporciones de sólidos y líquidos.

La tabla mostrada a continuación indica la composición de los productos obtenidos de la pirólisis en forma general.

Tabla 7-2: Composición química y poder calorífico de los productos de pirolisis

Productos de la pirolisis	Composición química	Poder calorífico
Gaseosos	Hidrógeno (H ₂) Metano (CH ₄) Dióxido de carbono (CO ₂) Monóxido de carbono (CO) Otros gases	8-15 MJ/m ³
Condensables (Líquido a temperatura ambiente)	Mezcla de alquitranes Aceites con contenido de: Ácido acético Ácido fórmico	25 MJ/Kg

	Acetona Metano Hidrocarburos aromáticos	
Sólidos	Carbón vegetal o coque de pirólisis, con bajo contenido de azufre	Aproximadamente el doble del PCI de la biomasa lignocelulósica

Fuente:(Contreras Canteros, 2014)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la tabla se aprecia la composición del gas producido por el proceso de pirólisis para el polietileno, polipropileno y poliestireno.

Tabla 8-2: Composición del gas de pirólisis de plásticos en estudio (% en peso)
(Velocidad de calentamiento: 20 K / min)

Gas	Plástico			
	PET	PE	PP	PS
Hidrógeno	0,52	0,13	0,13	0,24
Metano	1,20	3,04	2,56	3,21
Etano	0,11	5,46	4,27	0,49
Eteno	2,31	12,68	9,60	1,58
Propano	0,36	4,55	3,95	0,12
Propeno	0,22	12,71	10,35	0,30
CO ₂	37,18
CO	23,26

Fuente:(Encinar y González, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

2.3 Tipos de reactores para pirolisis

Existen diferentes reactores de pirolisis para un proceso térmico y catalítico, donde el diseño de cada uno depende de distintos parámetros como el tiempo de residencia, fuente de energía, catalizador, cámara de reacción y entre otros. Por lo tanto, entre los reactores que mayormente se emplean a nivel de laboratorios e industrias, se pueden mencionar los siguientes:

2.3.1 Reactor batch

Es un reactor que se caracteriza por tener un recipiente de almacenamiento cubierto con una periferia calefactora y en muchos casos un agitador mecánico. Además, este tipo de reactor no posee flujos inertes que ayudan al desplazamiento de volátiles producidos por la reacción, por

esta razón se originan reacciones secundarias (aromatizaciones) que influyen en el correcto desempeño del equipo, produciendo elementos no requeridos (Basu, 2010, p.4)



Figura 3-2. Reactor Batch

Fuente:(Guevara y Pablo, 2016)

2.3.2 *Reactor semi-batch*

La diferencia que tienen con el reactor tipo Batch, es que posee un flujo de gas inerte, principalmente el nitrógeno que permite desplazar los volátiles producidos, dando como resultado la disminución de reacciones secundarias en el equipo (Coronel, 2014, p.6).

La característica principal de estos reactores es que requieren tiempos de reacción elevados causando el aumento de los costos de operación. Esto se origina debido a que el coque (producto residual) presente en las paredes de estos reactores dificulta la transferencia de calor. Sin embargo, la mayoría de las personas prefieren los reactores semi-batch y batch debido a que su diseño e implementación es más sencillo, ya que si se de costos se trata, es un ahorro significativo al momento de implementar el equipo (Anuar Sharuddin et al., 2016).

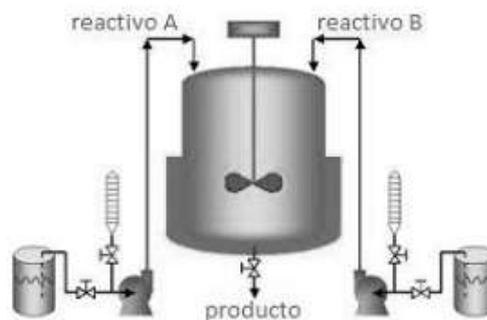


Figura 4-2. Reactor semi - batch

Fuente: (Acosta Mongua y Pérez Moreno, 2012)

2.3.3 Reactor de lecho fijo

Consiste en un equipo donde se utiliza un catalizador, situada en un lugar fijo en el reactor. Mediante este lecho, el reactivo se vuelve circular ya sea en estado gaseoso o líquido, obteniendo como resultado la degradación en el lecho. Este reactor es muy utilizado en reacciones catalíticas heterogéneas, pero tiene problemas relacionadas con las reacciones pirolíticas de residuos orgánicos (Basu, 2010, p.6).

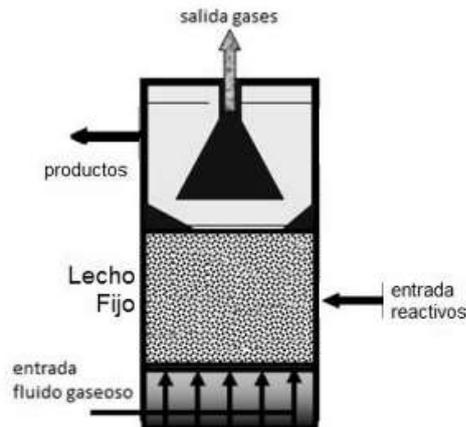


Figura 5-2. Reactor de lecho fijo

Fuente: (Flórez Cortés y Posada Noreña, 2007)

2.3.4 Reactor de lecho fluidizado

En este tipo de reactor, actúa un flujo ascendente para que las partículas del lecho se disipen mejorando considerablemente la transferencia de calor y de masa. La velocidad de fluidización es un factor fundamental para determinar la distribución del tiempo de residencia de aquellos productos obtenidos a partir del proceso de pirolisis (Flórez Cortés y Posada Noreña, 2007, p.15).

Los reactores tipo lecho fluidizado presentan la ventaja al momento de controlar de los parámetros de operación, como la temperatura (Qureshi et al., 2020, p.6). Mientras que, una desventaja de este equipo es que necesita una alta cantidad de catalizador para homogenizar el volumen del reactor, debido a la fricción producida por el movimiento de las partículas en el lecho (Basu, 2010, p.9).

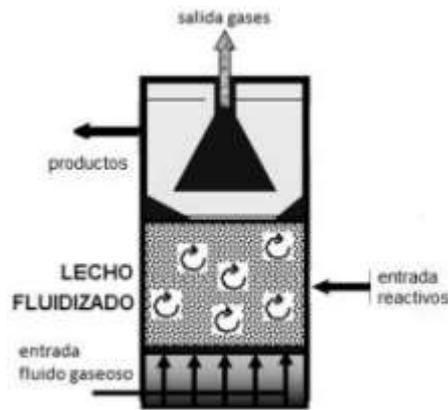


Figura 6-2. Reactor de lecho fluidizado

Fuente: (Flórez Cortés y Posada Noreña, 2007)

2.3.5 Reactor de tornillo

El reactor de tornillo es un equipo que cuenta con una tolva para la entrada de reactivos, la misma que esta enlazada directamente a un tornillo sinfín encargado de transportar y desplazar la materia prima mediante un recipiente cilíndrico caliente, donde se realiza la degradación, reacción y transformación de los residuos plásticos (Conesa, 2010, p.107).

Este equipo se caracteriza por la facilidad de controlar el tiempo de residencia a través de la velocidad de giro del tornillo sin fin y un manejo sencillo de las muestras de plásticos complejos (Qureshi et al., 2020). Cabe mencionar, los reactores de tipo tornillo permiten la operación continua sin presentar inconvenientes en el proceso, por tal motivo es una alternativa considerable para la implementación de este equipo a nivel industrial (Díaz-Concepción et al., 2015, p.2).

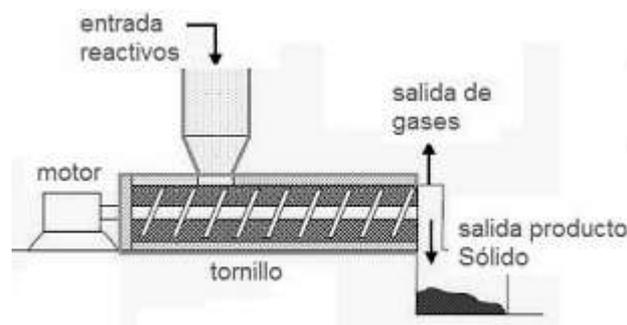


Figura 7-2. Reactor de Tornillo

Fuente:(Díaz-Concepción et al., 2015)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Diseño conceptual del prototipo de Reactor de pirólisis térmica

El prototipo de reactor de pirólisis térmico debe contar con diversas partes mecánicas y electrónicos que permitan la mayor eficiencia y control de parámetros de presión y temperatura, en donde el operario no se involucre demasiado en la manipulación de la máquina, principalmente se presentaran las características más recomendables para el diseño óptimo. El prototipo deberá constar de una cámara de calentamiento para poder degradar los residuos plásticos PE, PP Y PS, donde será diseñado con la norma ASME VIII División 1. Para evitar posibles quemaduras del operario al manipular el equipo, se considerará un sistema de aislamiento térmico. Además, se contará con un sistema para transporte de gases condensables y no condensables productos de la quema de los plásticos. Finalmente, debe constar de un sistema de condensado, que es útil para la obtención de fracción líquida, en el proceso de pirolisis.

En el mercado no se encuentra un amplio catálogo comercial de reactores de pirólisis por lo que se pretende obtener un diseño óptimo que cumpla satisfactoriamente con dicho proceso.

3.2 Proceso del despliegue de la casa de la calidad (QFD)

Para el diseño óptimo del reactor de pirolisis térmica, se debe analizar la función de calidad (QFD), con el propósito de obtener un producto (prototipo) con buen rendimiento y eficiencia, que satisfaga las necesidades de los clientes (voz del usuario) y a su vez, el criterio técnico (voz del ingeniero o diseñador).

3.2.1 Identificación de los requerimientos para el reactor de pirolisis

El reactor de pirólisis tiene como función la degradación y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de PE, PP y PS; para lo cual se definirán las variables que intervienen en el proceso, mediante la ayuda de normativas que cumplan condiciones de seguridad y de funcionamiento. En vista de lo mencionado se han identificado algunas de las necesidades requeridas por el reactor y el sector al cual está dirigido, dichos factores se mencionan y detallan a continuación:

- Contar con un sistema fácil de operar
- Cumplir con normativas de seguridad
- Contar con un diseño óptimo
- Un costo accesible y que sea rentable
- Degradar los tres tipos de plásticos mencionados

- Capacidad óptima
- Ligero y sin robustez

3.2.1.1 Identificación de las necesidades de la voz del usuario

Las necesidades expuestas por parte de los usuarios, se las agruparon en tres categorías: Básica (B), Unidireccional (O) y Estimulante (E).

Tabla 1-3: Voz del Usuario

REQUISITOS	Fácil de usar	B
	Cumplimiento normas de seguridad	B
	Cumplimiento y aprovechamiento de los residuos plásticos	O
	Componentes adaptables y reemplazables	E
	Disponibilidad de refacciones	O
	Durabilidad de componentes	B
	Bajo costo	E
	Eficiente	O
	Capacidad óptima	E
	Ligero	B
	Rentable	O

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.2.1.2 Voz del ingeniero

Los requerimientos y deseos del operario se los interpreta para obtener las características técnicas de la máquina, como resultado se tiene lo siguiente:

1. Tamaño del equipo (Dimensiones)
2. Costo de venta del producto
3. Peso de los componentes
4. Capacidad
5. Tipos de plásticos a degradar
6. Material de los componentes
7. Eficiencia de degradación
8. Consumo energético

9. Elementos o componentes disponibles en el mercado local.
10. Estructura de Soporte
11. Mantenimiento

3.3 Análisis de Competitividad

Un estudio de los diferentes tipos de reactores térmicos usados en la degradación de residuos plásticos permite establecer parámetros de diseño que cumpla con los requerimientos técnicos y del usuario, buscando presentar una alternativa con un precio razonable, fácil de usar y que cumpla fundamentalmente con la degradación óptima de residuos plásticos y su posterior aprovechamiento en combustible.

Tabla 2-3: Alternativas de mercado

COMPETENCIAS	CARACTERISTICAS
<p style="text-align: center;">Competencia 1</p> 	<p style="text-align: center;">Reactor de pirólisis térmico Modelo Be-h</p> <p>Capacidad: 0.7-1 kg/h Eficiencia de reciclaje 80% Peso 50kg Consumo 1kw/h Funciona con voltaje domestico de 110v Apto para los tipos de plástico PP.PE y PS. No apto para plásticos tipo PET, PVC ó PA.</p>
<p style="text-align: center;">Competencia 2</p> 	<p style="text-align: center;">Reactor de pirólisis térmico Modelo Blester B120</p> <p>Capacidad: 5 kg/h Eficiencia de reciclaje más del 80% Peso 250 kg Consumo 4 kw/h Funciona con voltaje de 220 v Apto para todo tipo de plásticos</p>

Fuente:(Blest Co., Ltd.)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.4 Despliegue de la casa de la calidad “Reactor de Pirólisis Térmica”

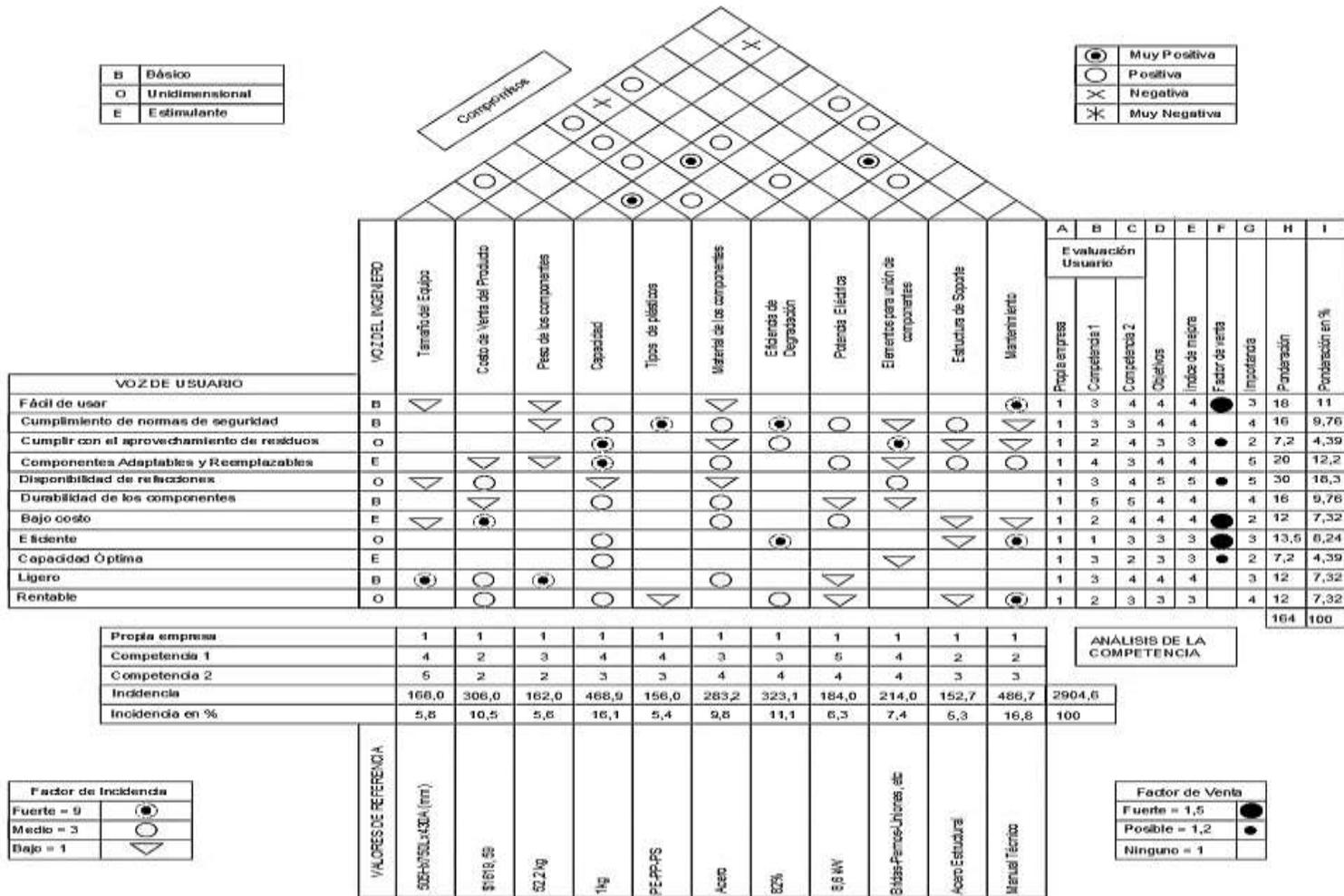


Figura 1-3. Matriz QFD (Casa de la calidad)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 202

Del despliegue de la casa de la calidad, se obtiene los criterios de valoración que más relevancia e influencia tienen en el diseño del prototipo de reactor de pirolisis térmica. Los criterios con mayor puntuación se detallan a continuación:

- Costo del producto: El prototipo de reactor debe ser económicamente accesible, optimizando recursos materiales y humanos.
- Capacidad: Debe ser capaz de contener y degradar una determinada cantidad de residuos plásticos establecida en el diseño.
- Material de los componentes: El material de las partes constitutivas del reactor deben ser capaz de soportar alta temperatura y una presión establecida para poder llevarse a cabo el proceso de pirolisis.
- Eficiencia: El prototipo debe ser capaz de degradar los residuos plásticos (PP, PE, PS) para obtener combustibles con un buen rendimiento.
- Mantenimiento: Mantenimiento fácil y accesible de todas las partes constitutivas del reactor.

3.5 Análisis funcional, modular

La principal función del reactor de pirólisis térmica es la descomposición química de residuos plásticos fabricados a partir del PP (Polipropileno), PS(Poliestireno) y PE (Polietileno). El proceso requiere de un calor intenso y un ambiente libre de oxígeno; en donde los principales productos que se producen durante el proceso son: el aceite, el gas y el carbón; se debe monitorear los parámetros que intervienen en el proceso para obtener la mayor eficiencia posible, es indispensable la elaboración de los diagramas funcionales, los mismos que serán desarrollados y detallado por niveles las subfunciones del proceso.

Nivel 0

En este nivel se describe la función global que realizará el prototipo de reactor de pirolisis térmica, en un diagrama de flujo que se detalla a continuación:

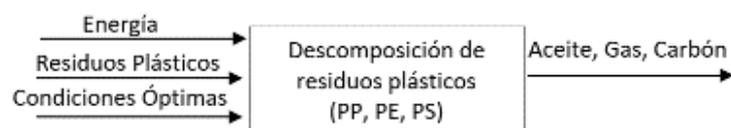


Figura 2-3. Análisis Modular Nivel Cero

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Nivel 1

El nivel 1 consta de módulos funcionales para pirolisis de plásticos que permitirá establecer alternativas en el diseño del prototipo de reactor.

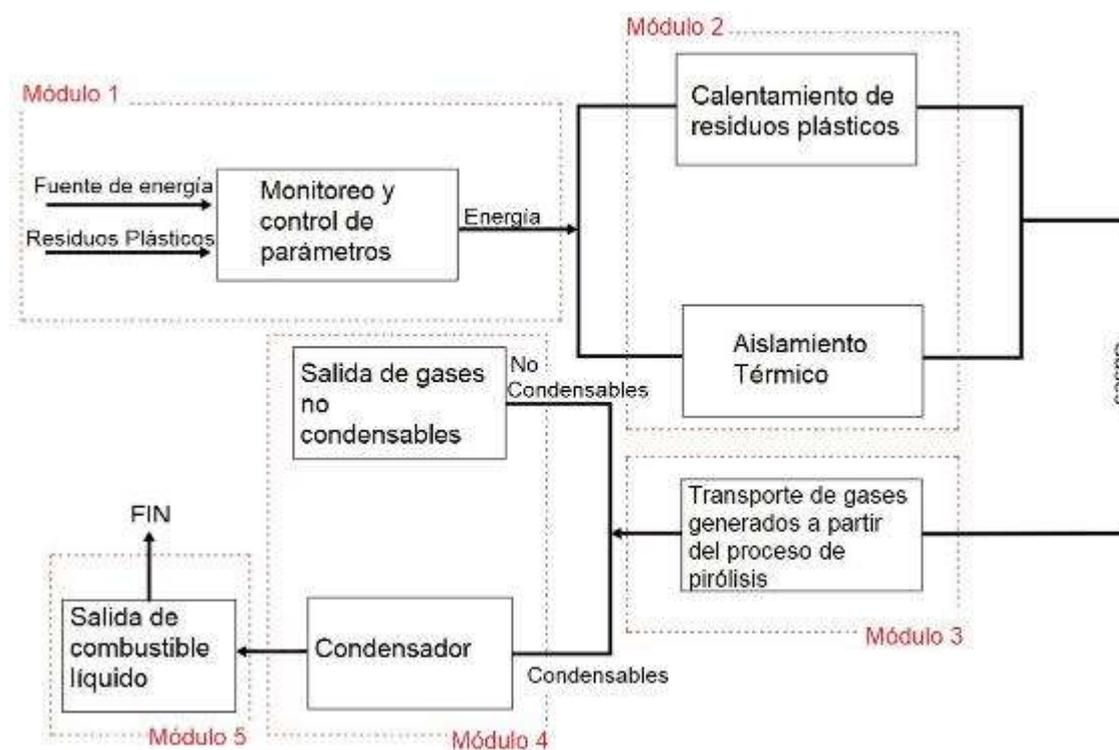


Figura 3-3. Análisis Modular Nivel uno

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Los módulos establecidos en el nivel 1 para el prototipo de reactor de pirolisis térmica, se mencionan a continuación:

Modulo 1: Control y monitoreo de los parámetros óptimos.

Modulo 2: Calentamiento y sistema de aislamiento térmico del reactor.

Modulo 3: Transporte de gases producidos por la degradación de plásticos.

Modulo 4: Condensador y salida de gases no condensables.

Modulo 5: Salida de combustible líquido.

3.5.1 Generación de alternativas para cada módulo del prototipo

3.5.1.1 Control y monitoreo de los parámetros óptimos.

Para llevarse a cabo el proceso de pirolisis térmica, en el prototipo se requiere de un controlador o microcontrolador que monitoree y controle la temperatura establecida por el diseñador del equipo.

A continuación, se mencionan las alternativas para este módulo:

a) Microcontrolador Arduino

Este microcontrolador permite establecer una conexión con los instrumentos de medida que se encuentra en sitio, como son los sensores y entre otros.



Figura 4-3. Microcontrolador Arduino

Fuente: (Artero, 2013)

Tabla 3-3: Ventajas y desventajas del microcontrolador Arduino

Ventajas	Desventajas
Bajo costo.	Se requiere montar y programar un Display
Montaje sencillo	Carece de protección, por lo que está expuesta a golpes o caídas.
Lenguaje de programación básico.	

Fuente: (Artero, 2013)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

b) Controlador lógico programable (PLC)

Es un dispositivo electrónico programable, más usado a nivel industrial. Trabaja con la información emitida por los sensores y captadores.



Figura 5-3. Controlador lógico programable (PLC)

Fuente: (Pérez, Acevedo y Silva, 2009)

Tabla 4-3: Ventajas y desventajas del PLC

Ventajas	Desventajas
Excelente monitoreo de los procesos.	Costo elevado.
Controla varios equipos simultáneamente.	Requiere personal calificado.
Reduce la mano de obra en el proceso.	Requiere conocimientos de programación
Escaso mantenimiento.	Condiciones técnicas de montaje

Fuente: (Pérez, Acevedo y Silva, 2009)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.5.1.2 Calentamiento y sistema de aislamiento térmico del reactor.

Para calentar el reactor a una temperatura elevada, se necesita una fuente de calor. A su vez, se requiere de un sistema de aislamiento que recubra el reactor para evitar posibles quemaduras a los operarios. Las alternativas de solución se presentan a continuación:

a) GLP – Ladrillo y cemento refractario

Gas licuado de petróleo se puede utilizar para calentar el tanque de almacenamiento de residuos plásticos, para este tipo de calentamiento es factible colocar a su alrededor ladrillo y cemento refractario para reducir la temperatura en el exterior del prototipo.

Tabla 5-3: Ventajas y desventajas del GLP

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Mayor consumo energético
Escaso Mantenimiento	Presenta riesgos en presencia de altas temperaturas
Fácil Adquisición	Calentamiento lento

Fácil de manejar	Ocupa un espacio considerable
	Difícil control de temperatura

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 6-3: Ventajas y desventajas del ladrillo y cemento refractario

Ventajas	Desventajas
Resiste altas temperaturas	Material pesado
Baja conductividad térmica	Difícil de desmontar
Escaso mantenimiento	Mano de obra calificada

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

b) Resistencia eléctrica de banda flexible – Aislamiento de fibra de cerámica

Las resistencias eléctricas de banda flexible se acoplan fácilmente a lo largo de cualquier cilindro, de forma que calientan toda su pared exterior.



Figura 6-3. Resistencia eléctrica de banda flexible

Fuente: (mikai.mx.,Ltd)

Tabla 7-3: Ventajas y desventajas de la resistencia eléctrica de banda flexible

Ventajas	Desventajas
Mayor control de temperatura. Permite la integración de sensores de temperatura.	Consumo de energía eléctrica, durante el tiempo que funcione el reactor.
Larga durabilidad, resistente a la corrosión	Robusto
Temperatura uniforme en todo el cilindro	Costo elevado
Altas temperaturas de trabajo hasta 800 °C	
Fácil limpieza y mantenimiento	Adquisición bajo pedido

Calentamiento rápido y fácil montaje	
--------------------------------------	--

Fuente: (mikai.mx.,Ltd)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La fibra de cerámica es un buen aislante térmico, ya que trabaja con temperaturas altas de hasta 1200 °C.



Figura 7-3. Aislante de fibra de cerámica

Fuente: (Tecnopeg.com)

Tabla 8-3: Ventajas y desventajas de la resistencia eléctrica de banda flexible.

Ventajas	Desventajas
Resiste altas temperaturas (1220 °C)	Mayor conductividad térmica que la fibra de vidrio
Excelente aislamiento térmico	
Peso ligero, moldeable	Baja resistencia a tracción
Resistente a la corrosión	

Fuente: (Tecnopeg.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

c) Calentadores de cartucho – Aislamiento espuma de poliuretano

Los calentadores de cartuchos se utilizan en diferentes aplicaciones que requieran calor, generalmente en moldes o dentro de una cavidad circular para calentar metales sólidos y líquidos. La espuma de poliuretano es un aislante térmico y acústico, utilizado para sellar huecos o cavidades

Tabla 9-3: Ventajas y desventajas del calentador de cartucho

Ventajas	Desventajas
Bajo Costo	Consumo de energía eléctrica alto
Alcanza altas temperaturas (760 °C)	Requiere de mantenimiento, ya que estaría en contacto con la materia prima
Contiene un termopar para controlar la temperatura.	

Fuente: (Resistencias Durawat.,Ltd)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 10-3: Ventajas y desventajas de la espuma de poliuretano

Ventajas	Desventajas
Excelente aislamiento térmico y bajo costo	Sensible a la luz solar
Se adapta a la forma del relleno	Material toxico al exponerse a fuego
Ligero y excelente durabilidad	Frágil al exponerse por un cierto tiempo a las agresiones del ambiente
Aplicación sencilla mediante rociador	

Fuente: (soluferecuador.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.5.1.3 Transporte de gases producidos por la degradación de plásticos.

Una vez degradado térmicamente los plásticos, se forman los gases del proceso que deben ser transportadas hacia el condensador. En este módulo se presenta una sola alternativa de solución, las tuberías y accesorios de acero inoxidable ya que son recomendables para el transporte de gases.



Figura 8-3. Tuberías de acero inoxidable

Fuente: (kubiec.com)

Tabla 11-3: Ventajas y desventajas de las tuberías y accesorios de acero inoxidable

Ventajas	Desventajas
Mayor resistencia a la corrosión y oxidación	Costo alto
Soporta mayores temperaturas	No es fácilmente moldeable
Alta durabilidad y fácil mantenimiento	

Fuente: (kubiec.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.5.1.4 Condensador y salida de gases

En este módulo, se analizará una sola alternativa, donde la salida de los gases no condensables, se lo hará con una válvula de seguridad. Por otro lado, los gases condensables pasarán por un condensador de agua a temperatura ambiente, lo que permite extraer la cantidad de combustible líquido generado a partir del proceso de pirólisis.



Figura 9-3. Válvula de seguridad

Fuente: (co_deyimachine.com)

Tabla 12-3: Ventajas y desventajas del condensador

Ventajas	Desventajas
Transforma el gas en líquido	Ocupa un espacio considerable
Bajo costo	
Fácil mantenimiento	
Restringe la entrada de gases no condensables	

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 13-3: Ventajas y desventajas de la válvula de seguridad

Ventajas	Desventajas
Control de la presión del gas	Susceptible a daños
Bajo costo	

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.5.1.5 Salida de combustible líquido.

Para la recolección del combustible líquido producido por el pirólisis, se necesita un recipiente donde se deposite dicho producto. Para este módulo, se detallan las siguientes alternativas:

- a) Recipiente simple: Recipiente que se pueda mover en cualquier momento, preferentemente de metal.

Tabla 14-3: Ventajas y desventajas del recipiente simple

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Inestable
Fácil acceso	

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

- b) Recipiente fijo a la estructura con válvula de paso: Recipiente soldada o fijada en la estructura que contenga una válvula de paso para poder controlar el flujo del combustible líquido.

Tabla 15-3: Ventajas y desventajas del recipiente fijo a la estructura con válvula de paso

Ventajas	Desventajas
Estable	Requiere de un montaje técnico
Control de volumen requerido de aceite	

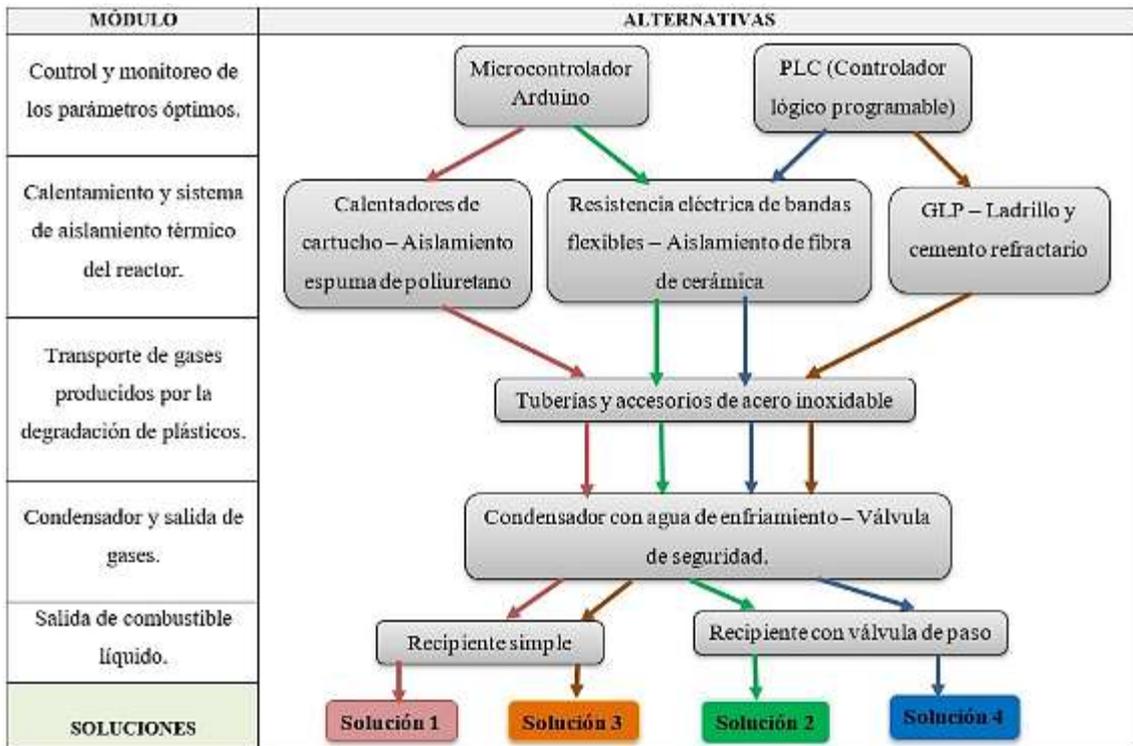
Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.6 Matriz morfológica por módulos de las alternativas de solución

En la matriz morfológica se combinan todas las posibles alternativas de cada uno de los módulos definidos anteriormente, para obtener varias soluciones con distintos elementos y configuraciones, que posteriormente será evaluadas con un método de ponderación.

Tabla 16-3: Matriz morfológica por módulos de las alternativas de solución



Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.6.1 Solución 1

Esta solución está formada por los siguientes componentes:

- Microcontrolador Arduino
- Calentadores de cartucho – Aislamiento espuma de poliuretano
- Tuberías y accesorios de acero inoxidable
- Condensador con agua de enfriamiento – Válvula de seguridad para gases.
- Recipiente simple

Tabla 17-3: Ventajas y desventajas de la solución 1.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Dificultad de limpieza, menor eficiencia
Peso ligero y desmontable.	Susceptible a daños en el aislante
Menor durabilidad	Alto consumo de energía eléctrica

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.6.2 Solución 2

Esta solución está formada por los siguientes componentes:

- Microcontrolador Arduino
- Resistencia eléctrica de bandas flexibles – Aislamiento de fibra de cerámica
- Tuberías y accesorios de acero inoxidable
- Condensador con agua de enfriamiento – Válvula de seguridad para gases.
- Recipiente fijo a la estructura con válvula de paso

Tabla 18-3: Ventajas y desventajas de la solución 2.

Ventajas	Desventajas
Mayor eficiencia en el proceso de pirólisis	Costo
Peso relativamente ligero y desmontable	Consumo de energía eléctrica
Durabilidad y mayor control de temperatura	Microcontrolador expuesto a sufrir golpes o daños ya que carece de una estructura protectora
Resistente a la corrosión y rápido calentamiento	
Fácil mantenimiento	

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.6.3 Solución 3

Esta solución está formada por los siguientes componentes:

- PLC (Controlador lógico programable)
- GLP – Ladrillo y cemento refractario
- Tuberías y accesorios de acero inoxidable
- Condensador con agua de enfriamiento – Válvula de seguridad para gases.
- Recipiente simple

Tabla 19-3: Ventajas y desventajas de la solución 3.

Ventajas	Desventajas
Mantenimiento regular	Costo elevado
Resistente a grandes temperaturas	Difícil de desmontar
Mayor control de temperatura y presión	Muy pesado
Fácil adquisición de componentes	Calentamiento lento y mayor consumo de GLP

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.6.4 Solución 4

Esta solución está formada por los siguientes componentes:

- PLC (Controlador lógico programable)
- Resistencia eléctrica de bandas flexibles – Aislamiento de fibra de cerámica
- Tuberías y accesorios de acero inoxidable
- Condensador con agua de enfriamiento – Válvula de seguridad para gases.
- Recipiente fijo a la estructura con válvula de paso

Tabla 20-3: Ventajas y desventajas de la solución 4.

Ventajas	Desventajas
Mantenimiento bajo	Costo muy elevado
Eficiencia alta en el proceso de pirólisis	Consumo de energía eléctrica
Resistente a la corrosión y rápido calentamiento	Mínimo conocimiento técnico
Peso relativamente ligero y desmontable	El medio ambiente debe estar en óptimas condiciones
Mayor control y monitoreo de parámetros.	

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.7 Método ordinal de ponderación para la evaluación de las soluciones

Los criterios de evaluación con mayor incidencia, se lo definió en el despliegue de la casa de la calidad, estos son los siguientes:

- Costo del producto
- Capacidad
- Material de los componentes
- Eficiencia
- Mantenimiento

A continuación, se establece como diseñador el grado de importancia de cada uno de los criterios de evaluación.

Tabla 21-3: Grado de importancia de los criterios de evaluación

Valor	Criterios
3	Costo del producto
1	Capacidad
2	Material de los componentes
3	Eficiencia
2	Mantenimiento

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Para evaluar el peso específico, se debe analizar y comparar cada criterio con su grado de importancia, como se muestra en la siguiente tabla:

- Cuando el criterio de la fila > criterio de la columna (1)
- Cuando el criterio de la fila < criterio de la columna (0)
- Cuando el criterio de la fila = criterio de la columna (0,5)

Tabla 22-3: Peso específico de los criterios de evaluación

Criterio	Costo	Capacidad	Material	Eficiencia	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		0	0	0,5	0	1,5	0,10
Capacidad	1		1	1	1	5	0,33
Material	1	0		1	0,5	3,5	0,23
Eficiencia	0,5	0	0		0	1,5	0,10
Mantenimiento	1	0	0,5	1		3,5	0,23
TOTAL						15	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

De igual forma, es muy importante designar un valor de importancia para todas las soluciones con respecto a cada uno de los criterios de evaluación, como se detalla a continuación:

Tabla 23-3: Grado de prioridad de las soluciones con respecto a los criterios

	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Costo	1	1	2	3
Capacidad	3	2	3	1
Material	3	1	2	1
Eficiencia	3	2	3	1
Mantenimiento	2	1	3	2

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Una vez designado los valores de importancia, se analiza los pesos específicos de todas las soluciones con respecto a cada uno de los criterios de evaluación.

A continuación, se evalúa el peso específico del criterio “Costo”.

Tabla 24-3: Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Costo”

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1	1	3,5	0,35
Solución 2	0,5		1	1	3,5	0,35
Solución 3	0	0		1	2	0,2
Solución 4	0	0	0		1	0,1
TOTAL					10	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La evaluación el peso específico del criterio “Capacidad”. Se indica en la siguiente tabla:

Tabla 25-3: Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Capacidad”

Capacidad	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0,5	0	1,5	0,15
Solución 2	1		1	0	3	0,3
Solución 3	0,5	0		0	1,5	0,15
Solución 4	1	1	1		4	0,4
TOTAL					10	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La evaluación el peso específico del criterio “Material”. Se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 26-3: Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Material”

Material	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	0	1	0,1
Solución 2	1		1	0,5	3,5	0,35
Solución 3	1	0		0	2	0,2
Solución 4	1	0,5	1		3,5	0,35
TOTAL					10	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La evaluación el peso específico del criterio “Eficiencia”. Se indica en la siguiente tabla:

Tabla 27-3: Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Eficiencia”

Eficiencia	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0,5	0	1,5	0,15
Solución 2	1		1	0	3	0,3
Solución 3	0,5	0		0	1,5	0,15
Solución 4	1	1	1		4	0,4
TOTAL					10	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

La evaluación el peso específico del criterio “Mantenimiento”. Se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 28-3: Evaluación de soluciones con respecto al criterio “Mantenimiento”

Mantenimiento	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	0,5	2,5	0,25
Solución 2	1		1	1	4	0,4
Solución 3	0	0		0	1	0,1
Solución 4	0,5	0	1		2,5	0,25
TOTAL					10	1

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Finalmente, en la tabla 31-3 se muestra los resultados o conclusiones, en donde cada celda es igual al producto entre el peso específico de la solución y el peso específico del criterio. Así, obteniendo la solución más factible y viable.

Tabla 29-3: Resultados de las posibles soluciones

Resultado	Costo	Capacidad	Material	Eficiencia	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Solución 1	0,035	0,050	0,023	0,015	0,058	0,182	3
Solución 2	0,035	0,100	0,082	0,030	0,093	0,340	1
Solución 3	0,020	0,050	0,047	0,015	0,023	0,155	4
Solución 4	0,010	0,133	0,082	0,040	0,058	0,323	2

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

De acuerdo con la tabla de conclusiones se puede apreciar, la solución que más se ajusta a los criterios de evaluación es la “Solución 2”. Por consiguiente, el equipo constará de un microcontrolador Arduino para controlar y monitorear la temperatura. Para el calentamiento del reactor se utilizará una resistencia eléctrica de bandas flexibles y en su parte exterior un aislamiento de fibra de cerámica. El prototipo constará de un sistema de tubería y accesorios de acero inoxidable. Además, llevará acoplado un condensador con agua de enfriamiento para los gases condensables. Por último, se recolectará el líquido combustible en un recipiente de preferencia metálico, con una válvula de paso.

3.8 Diseño Conceptual de la Máquina

Con los resultados obtenidos se llega a concretar el posible modelo.



Figura 10-3. Diseño conceptual - reactor de pirólisis

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Se hizo necesario el análisis de las variables posibles para el diseño de un reactor de pirólisis óptimo, que sea fácil de usar y a un costo accesible para el público en general que permita que su uso sea rentable.

Se analiza que el prototipo cuente con materiales duraderos y con un diseño fácil de desmontar, así como también de reparar, para que el usuario no tenga inconvenientes en caso de que el reactor sufra un desperfecto.

Mediante la ponderación de datos se analiza la mejor alternativa de diseño, que permitan su posterior construcción, así como también un correcto funcionamiento.

3.9 Diseño de materialización

3.9.1 Volumen tentativo

Para empezar, se necesita la densidad de los residuos plásticos en estudio, para obtener un volumen tentativo del recipiente que va a contener dichos residuos:

Densidad del polietileno (baja y alta): 0,92 a 0,96 g/cm³

Densidad del polipropileno: 0,9 g/cm³ (900 Kg/m³)

Densidad del poliestireno: 1,06 g/cm³

Entonces, se hallará el volumen con la siguiente relación, teniendo en cuenta la capacidad del

prototipo de 1 kg y a su vez, la menor densidad de los plásticos mencionados, debido a que se requiere obtener el mayor volumen posible.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ – Densidad [kg/m³]

m – Masa [kg]

V – Volumen [m³]

Si despejamos el volumen:

$$V = \frac{m}{\rho}$$
$$V = \frac{1\text{kg}}{900\text{kg/m}^3}$$
$$V = 0,001111\text{m}^3$$

Para obtener las dimensiones del reactor, se utilizará la fórmula para encontrar el volumen de un cilindro:

$$V = A \cdot h_{\text{cilindro}} \quad (2)$$

Donde:

A – Área de la base del cilindro [m²]

h – Altura del cilindro [m]

Si despejamos el área:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Considerando una altura aleatoria de 14 cm, el diámetro obtenido es:

$$0,001111\text{m}^3 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} (0,14\text{m})$$
$$d = 0,1005 \text{ m} \cong 10 \text{ cm}$$

Con estos datos obtenidos, se tiene una mejor perspectiva del tamaño que deberá ser el reactor. Sin embargo, estas medidas son tentativas, cuando los residuos plásticos estén al límite del

cilindro y cuando la muestra este compacta. Por tal razón, se aumentó dichas medidas, obteniendo finalmente:

$$D = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$H = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

3.9.2 Diseño del cuerpo cilíndrico

3.9.2.1 Cuerpo cilíndrico de la junta principal

Para el diseño del cuerpo cilíndrico se hace uso de las expresiones para esfuerzos circunferenciales (Junta longitudinal).

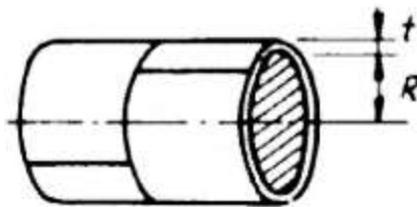


Figura 11-3. Cuerpo cilíndrico

Fuente: (Rana y Kalnins, 2000)

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (3)$$

Donde:

t: espesor mínimo de pared. in [mm]

P: Presión interna de diseño. Psi [MPa]

R: Radio interno. In [mm]

S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada. Psi [MPa]

E: Eficiencia de la junta.

Si despejamos P:

$$P = \frac{SEt}{R + 0,6t} \quad (4)$$

Datos:

La temperatura máxima a la que va a estar sometido el reactor es de 550 °C, y la presión de diseño es de 0.3861 MPa, dichos valores son establecidos en base a resultados obtenidos a partir de pruebas experimentales y expuestos en diversos trabajos de investigación. Además, se tomó en cuenta la junta a tope 100% radiografiado.

$S = 12,9 \text{ MPa}$ (Anexo B)

$P = 56 \text{ Psi} = 0,3861 \text{ MPa}$

$E = 1$ (Anexo C)

$H=300 \text{ mm}$

$D=200 \text{ mm}$

$R=100 \text{ mm}$

Reemplazamos en la ecuación (3):

$$t = \frac{0,3861 (100)}{12,9(1) - 0,6(0,3861)}$$
$$t = 3,048 \text{ mm}$$

Una vez calculado el espesor ideal, se debe agregar un coeficiente de seguridad para que el reactor no esté trabajando al límite (100%) y además dar un sobre espesor de corrosión, erosión, efectos climáticos, etc. El factor recomendado es de entre 5 al 10% como máximo del espesor calculado.

$$t_r = 1,1 (t)$$

$$t_r = 1,1 (3,048)$$

$$t_r = 3,353 \text{ mm}$$

Entonces el espesor nominal o estándar en catálogos es:

$$t_n = 4 \text{ mm}$$

La presión máxima de trabajo se la determina haciendo uso de la ecuación (4):

$$P = \frac{SEt}{R + 0,6t}$$
$$P = \frac{12,9 (1)(4)}{100 + 0,6(4)}$$
$$P = 0,503 \text{ Mpa}$$

3.9.2.2 *Cuerpo cilíndrico del conjunto de abastecimiento*

Para el diseño del cuerpo cilíndrico se hace uso de las expresiones para esfuerzos circunferenciales (Junta longitudinal) citadas anteriormente.

Datos:

$$S = 12,9 \text{ MPa (Anexo B)}$$

$$P = 56 \text{ Psi} = 0,3861 \text{ MPa}$$

$$E = 1 \text{ (Anexo C)}$$

$$D=80 \text{ mm}$$

$$R=40 \text{ mm}$$

Reemplazamos en la ecuación (3):

$$t = 1,219 \text{ mm}$$

Una vez calculado el espesor ideal, se debe agregar un coeficiente de seguridad para que el reactor no esté trabajando al límite (100%) y además dar un sobre espesor de corrosión, erosión, efectos climáticos, etc. El factor recomendado es de entre 5 al 10% como máximo del espesor calculado.

$$t_r = 1.341 \text{ mm}$$

Entonces el espesor nominal o estándar en catálogos es:

$$t_n = 2 \text{ mm}$$

Sin embargo, para optimizar los materiales, se va a utilizar el mismo espesor de plancha que se utilizó para el cuerpo cilíndrico y tapas toriesféricas.

$$t_f = 4 \text{ mm}$$

La presión máxima de trabajo se la determina haciendo uso de la ecuación (4):

$$P = 1,217 \text{ Mpa}$$

3.9.3 Diseño de las tapas

3.9.3.1 Tapa toriesférica

Las tapas se diseñarán como toriesféricas, debido a que dicha geometría soporta mayor presión interna y concentración de esfuerzos que una tapa plana.

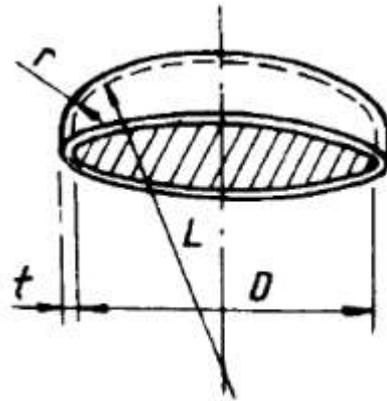


Figura 12-3. Diseño de tapa toriesférica

Fuente: (Rana y Kalnins, 2000)

Condiciones de diseño:

Para el análisis se debe conocer:

L: radio interior de la corona (no debe ser mayor al diámetro) [mm]

r: radio interior de transición o de rodilla [mm]

M: factor de forma del domo toriesférico

Cuando $L/r = 16 \frac{2}{3}$ (Tapas toriesféricas estándar)

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{0,885PL}{SE - 0,1P} \quad (5)$$

$$P = \frac{SEt}{0,855L + 0,1t}$$

Cuando $L/r < 16 \frac{2}{3}$ (Tapas toriesféricas no estándar)

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} \quad (6)$$

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0,2t}$$

Se va a diseñar con tapas toriesféricas ASME no estándar, ya que su espesor es inferior a la estándar, entonces:

$L = 175$ mm, debe ser menor o igual al diámetro interior $D = 200$ mm

Para elegir el factor de forma del domo toriesférico M, utilizar la siguiente tabla:

Tabla 30-3: Factor de forma del domo toriesférico

Valores del factor "M"													
L/r	1	1,25	1,50	1,75	2	2,25	2,50	2,75	3	3,25	3,50	4	4,50
M	1	1,03	1,06	1,08	1,10	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22	1,25	1,28

Fuente:(Asme VIII Div I, 2016)

$$M = 1,25$$

$$L/r = 4$$

$$r = 43,75 \text{ mm}$$

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{PLM}{2SE - 0,2P}$$

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{(0,3861)(175)(1,25)}{2(12,9)(1) - 0,2(0,3861)}$$

$$t_{\text{toriesf}} = 3,283 \text{ mm}$$

Se agrega un factor de seguridad para dicho espesor entre el 5 a 10 % como máximo, entonces:

$$t_r = 1,1 (t_{\text{toriesf}})$$

$$t_r = 1,1 (3,283)$$

$$t_r = 3,611 \text{ mm}$$

En efecto el espesor nominal o estándar es:

$$t_n = 4 \text{ mm}$$

La presión máxima de trabajo:

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0,2t}$$

$$P = \frac{2(12,9)(1)(4)}{175(1,25) + 0,2(4)}$$

$$P = 0,47 \text{ MPa}$$

3.9.3.2 Tapa plana

Como la tapa plana circular, va a colocarse en la parte superior mediante una junta bridada, la relación está dada por:

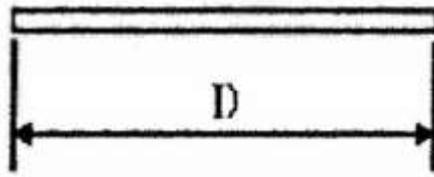


Figura 13-3. Tapa plana

Fuente: (Rana y Kalnins, 2000)

$$t = D \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P}{S \cdot E}}$$

Donde:

D: Diámetro. in [mm]

C: Factor para el tipo de unión de la tapa (soldada u empernada). Para placas empernadas el factor C es de 0,162.

P: Presión de diseño. Psi [MPa]

S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada. Psi [MPa]

E: Eficiencia de la Junta. Si no existen soldaduras longitudinales el valor es de 1

t: espesor de la tapa. in [mm]

Datos:

D = 80 mm

S = 12,9 MPa

P = 56 Psi = 0,3861 MPa

Entonces reemplazando:

$$t = 80 \cdot \sqrt{\frac{(0,162)(0,3861)}{(12,9)(1)}}$$

$$t = 5,57 \text{ mm}$$

Se agrega un factor de seguridad del 5 % para dicho espesor por efectos de corrosión y condiciones ambientales:

$$t_r = 1,05 (t_c)$$

$$t_r = 1,05 (5,57)$$

$$t_r = 5,848 \text{ mm}$$

El espesor nominal o estándar es:

$$t_n = 6 \text{ mm}$$

Entonces, la presión máxima de trabajo es:

$$P = \frac{t^2 \cdot S \cdot E}{D^2 \cdot C}$$

$$P = \frac{6^2 (12,9) (1)}{80^2 (0,162)}$$

$$P = 0,448 \text{ MPa}$$

3.9.4 Volumen de la tapa toriesférica

Para hallar el volumen, es necesario determinar las dimensiones mostradas en la siguiente figura.

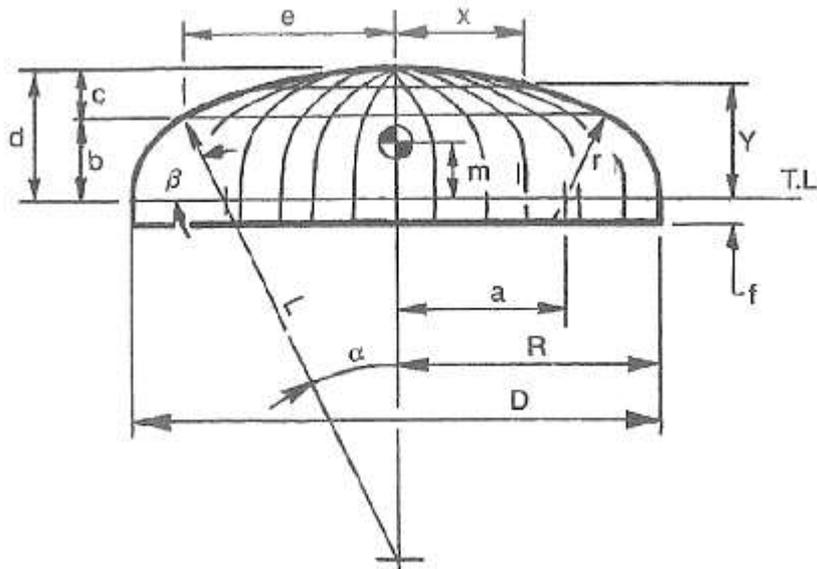


Figura 14-3. Dimensionamiento de tapa toriesférica

Fuente: (Rana y Kalnins, 2000)

$$a = \frac{D}{2} - r \quad (7)$$

Donde; las variables descritas en la ecuación (7) se derivan de la figura 19-3

$$a = \frac{200}{2} - 43,75$$

$$a = 56,25 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{a}{L - r}$$

$$\alpha = \frac{56,25}{175 - 43,75}$$

$$\alpha = 0,4286 \text{ rad} = 24,55^\circ$$

$$\beta = 90 - \alpha$$

$$\beta = 90 - 24,55$$

$$\beta = 65,45^\circ$$

$$\text{Sen}(\beta) = \frac{b}{r}$$

$$b = r \cdot \text{Sen}(\beta)$$

$$b = 43,75 \text{ Sen}(65,45^\circ)$$

$$b = 39,8 \text{ mm}$$

$$c = L - L \cdot \text{Cos}(\alpha)$$

$$c = 175 - 175 \text{ Cos}(24,55^\circ)$$

$$c = 15,82 \text{ mm}$$

$$\text{Sen}(\alpha) = \frac{e}{L}$$

$$e = L \cdot \text{Sen}(\alpha)$$

$$e = 175 \text{ Sen}(24,55^\circ)$$

$$e = 72,71 \text{ mm}$$

$$\theta = \frac{\beta}{2}$$

$$\theta = \frac{65,45^\circ}{2}$$

$$\theta = 32,725^\circ$$

El perímetro de los segmentos circulares que comprende el domo toriesférica es:

$$P = 2 \left(\frac{\beta}{180} \right) \pi r + 2 \left(\frac{\alpha}{180} \right) \pi L \quad (8)$$

$$P = 2 \left(\frac{65,45}{180} \right) \pi(43,75) + 2 \left(\frac{24,55}{180} \right) \pi(175)$$

$$P = 249,92 \text{ mm}$$

3.9.4.1 Volúmenes por secciones de la tapa toriesférica

Volumen del tronco

$$V_1 = 0,333b\pi(e^2 + ea + a^2) \quad (9)$$

$$V_1 = 0,333(39,8)(\pi)(72,71^2 + 72,71(56,25) + 56,25^2)$$
$$V_1 = 522156,25 \text{ mm}^3$$

Volumen del segmento esférico

$$V_2 = \pi c^2 \left(L - \frac{c}{3} \right) \quad (10)$$

$$V_2 = \pi(15,82^2) \left(175 - \frac{15,82}{3} \right)$$

$$V_2 = 133448,26 \text{ mm}^3$$

Volumen del solido de revolución

$$V_3 = \frac{120 r^3 \text{ Sen}\theta \text{ Cos}\theta + a\theta\pi^2 r^2}{90} \quad (11)$$

$$V_3 = \frac{120 (43,75^3) \text{ Sen}(32,725^\circ) \text{ Cos}(32,725^\circ) + 56,25(32,725)\pi^2 43,75^2}{90}$$

$$V_3 = 437160,82 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{toriesf}} = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{\text{toriesf}} = (522156,25 + 133448,26 + 437160,82) \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{toriesf}} = 1092765,33 \text{ mm}^3 = 0,001093 \text{ m}^3$$

3.9.5 Diseño de pernos

3.9.5.1 Pernos de brida principal

En primera instancia, se requiere determinar la carga aplicada a los pernos, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{F}{A} \quad (12)$$

Donde:

P_i : Presión Interna del recipiente [MPa]

F : Fuerza ejercida sobre los pernos [N]

A : Área Interna del recipiente [mm^2]

Datos:

$$P_i = 0,3861 \text{ MPa}$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

Despejamos la fuerza ejercida sobre los pernos de la ecuación (12).

$$F = P_i \cdot A$$

$$F = P_i \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

$$F = (0,3861 \text{ MPa}) \left(\frac{\pi \cdot 200^2}{4} \right)$$

$$F = 12129,689 \text{ N} = 12,13 \text{ KN}$$

Como el recipiente está sometido a presión interna, entonces se hará el análisis a tracción primaria.

Entonces:

Se va a asumir 6 pernos paso grueso, M14x2 y grado 5.8. Las propiedades y características de los pernos que se muestran a continuación fueron tomadas de los anexos D Y E.

$$A_t = 115 \text{ mm}^2$$

$$p = 2 \text{ mm}$$

$$S_p = 380 \text{ MPa}$$

$$S_y = 420 \text{ MPa}$$

Donde:

A_t : área a la tensión [mm^2]

p : paso [mm]

S_p : Resistencia de prueba

S_y : Resistencia a la fluencia

La fuerza aplicada a cada perno es:

$$F_i = \frac{F}{\text{\#pernos}} \quad (13)$$

$$F_i' = \frac{12,13 \text{ KN}}{6}$$

$$F_i' = 2,022 \text{ KN}$$

Como no existe tracción secundaria, entonces la carga en un perno es:

$$F_i'' = 0$$

$$P = F_i' + F_i''$$

$$P = 2,022 \text{ KN}$$

Se va a calcular la pretensión o precarga del perno, tomando en cuenta una junta reutilizable:

$$F_i = 0,75 S_p A_t \quad (14)$$

$$F_i = 0,75(380\text{MPa})(115 \text{ mm}^2)$$

$$F_i = 32775 \text{ N} = 32,775 \text{ KN}$$

Para determinar el diámetro menor del perno se realiza a través de la ecuación:

$$d_r = d - 1,226869 p \quad (15)$$

$$d_r = 14 - 1,226869 (2)$$

$$d_r = 11,55 \text{ mm}$$

A continuación, se va a determinar el diámetro de paso a través de la ecuación:

$$d_p = d - 0,649519 p \quad (16)$$

$$d_p = 14 - 0,649519 (2)$$

$$d_p = 12,7 \text{ mm}$$

- Dimensiones del perno

Para obtener el agarre del perno o de la conexión "l" se suma el espesor 2,8 mm de la arandela M14 estrecha (ANEXO F), la suma de los dos espesores del material y el espesor de 2.3 mm del empaque. Se obtiene:

$$l = 13,1 \text{ mm}$$

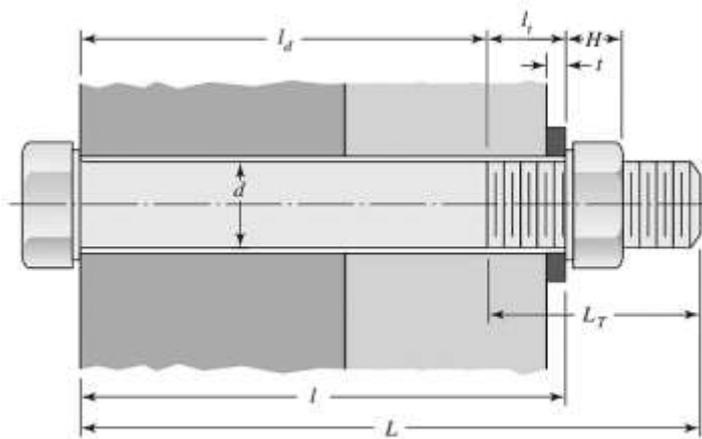


Figura 15-3. Referencia para determinar la rigidez del sujetador

Fuente: (Budynas y Nisbett, 2008)

Los datos de la arandela M14:

$$D_{\text{int}} = 15,25 \text{ mm}$$

$$D_{\text{ext}} = 28 \text{ mm}$$

Se procede a calcular la Longitud del sujetador “L”

$H = 9,25 \text{ mm}$ (ANEXO G), donde H es la altura de la tuerca hexagonal.

De la figura 20-3 se deduce las siguientes expresiones:

$$L > l + H \quad (17)$$

$$L > 13,1 + 9,25$$

$$L > 22,35 \text{ mm}$$

$$L = 40 \text{ mm}$$

La longitud roscada se obtiene a partir de la ecuación:

$$L_T = 2d + 6\text{mm} \quad L \leq 125\text{mm}, \quad d \leq 48 \text{ mm} \quad (18)$$

$$L_T = 2(14) + 6\text{mm}$$

$$L_T = 34 \text{ mm}$$

$$l_d = L - L_T$$

$$l_d = 40 - 34$$

$$l_d = 6 \text{ mm}$$

Longitud roscada útil:

$$l_t = l - l_d \quad (19)$$

$$l_t = 13,1 - 6$$

$$l_t = 7,1 \text{ mm}$$

- Rigidez efectiva del perno

Se determina con la siguiente expresión:

$$K_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (20)$$

Donde:

K_b – Rigidez efectiva del material [MPa. m]

A_t – Área de esfuerzo sometida a tensión [mm²]

l_t – Longitud de la parte roscada del agarre [mm]

A_d – Área del diámetro mayor del sujetador [mm²]

l_d – Longitud de la parte que no tiene rosca [mm]

$E = 206$ GPa (ANEXO H)

$$A_d = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_d = \frac{\pi(14)^2}{4}$$

$$A_d = 153,938 \text{ mm}^2$$

$$K_b = \frac{(153,938)(115)(206000)}{(153,938)(7,1) + (115)(6)}$$

$$K_b = 2045358,073 \text{ MPa. mm}$$

$$K_b = 2045,358 \text{ MPa. m}$$

- Cálculo de la rigidez de los elementos a sujetar.

Análisis de la arandela

Se puede determinar k_m en función de diámetro exterior de la arandela y el diámetro del perno como se muestra a continuación.

$$K_{m1} = \frac{\pi(D_{\text{ext}}^2 - d^2) E}{4 l} \quad (21)$$

$$K_{m1} = \frac{\pi(28^2 - 14^2) (207000)}{4 (13,1)}$$

$$K_{m1} = 7297368,157 \text{ MPa. mm}$$

$$K_{m1} = 7297,368 \text{ MPa. m}$$

Análisis del empaque:

$$E_{\text{asbesto}} = 480 \text{ MPa (ANEXO J)}$$

$$D_{\text{final(emp)}} = 290 \text{ mm}$$

$$t_{\text{emp}} = 2,3 \text{ mm}$$

Se determina el área efectiva con la siguiente expresión:

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left[\frac{(D_{\text{emp}}^2 - D_{\text{cil}}^2)}{\# \text{pernos}} - d^2 \right] \quad (22)$$

Donde:

A_g – Área efectiva del empaque [mm²]

D_{emp} – Diámetro del empaque [mm]

D_{cil} – Diámetro del cilindro [mm]

d – Diámetro del perno [mm]

Reemplace valores en la ecuación (23)

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left[\frac{(290^2 - 200^2)}{6} - 14^2 \right]$$

$$A_g = 5618,738 \text{ mm}^2$$

Hallar la rigidez efectiva del empaque con la expresión:

$$k_{m2} = k_g = \frac{A_g E_g}{t} \quad (23)$$

$$k_{m2} = \frac{5618,738 (480)}{2,3 \text{ mm}}$$

$$k_{m2} = 1172606,191 \text{ MPa. mm}$$

$$k_{m2} = 1172,606 \text{ MPa. m}$$

La rigidez combinada de la junta con empaque es:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}}$$

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{7297,368} + \frac{1}{1172,606}$$

$$k_m = 1010,267 \text{ MPa. m}$$

Entonces, la constante de rigidez de la junta está dada por la ecuación:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (24)$$

$$C = \frac{2045,358}{2045,358 + 1010,267}$$

$$C = 0,66937$$

- Cargas presentes en la junta

Carga que soporta el perno

$$P_b = CP \quad (25)$$

$$P_b = (0,66937)(2,022 \text{ KN})$$

$$P_b = 1,353 \text{ KN}$$

Carga que soporta el material

$$P_m = (1 - C)P \quad (26)$$

$$P_m = (1 - 0,66937)(2,022 \text{ KN})$$

$$P_m = 0,669 \text{ KN}$$

Carga total en el perno

$$F_b = F_i + P_b \quad (27)$$

$$F_b = 32,775 \text{ KN} + 1,353 \text{ KN}$$

$$F_b = 34,128 \text{ KN}$$

Carga total en el material

$$F_m = F_i - P_m \quad (28)$$

$$F_m = 32,775 \text{ KN} - 0,669 \text{ KN}$$

$$F_m = 32,106 \text{ KN}$$

Una vez obtenido las cargas, se calcula el esfuerzo de tensión en el perno

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} \quad (29)$$

$$\sigma_b = \frac{34128 \text{ N}}{115 \text{ mm}^2} \times \frac{1000^2 \text{ mm}^2}{1 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_b = 296,765 \text{ MPa}$$

Se determina el factor de seguridad a la fluencia para verificar si el perno soporta estructuralmente.

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b} \quad (30)$$

$$N_y = \frac{420}{296,765}$$

$$N_y = 1,415$$

La carga necesaria para separar la junta bridada es:

$$P_0 = \frac{F_i}{(1 - C)} \quad (31)$$

$$P_0 = \frac{32,775 \text{ KN}}{(1 - 0,66937)}$$

$$P_0 = 99,13 \text{ KN}$$

Por último, el factor de seguridad ante la separación de la junta es:

$$n_{\text{separacion}} = \frac{P_0}{p} \quad (32)$$

$$n_{\text{separacion}} = \frac{99,13}{2,022}$$

$$n_{\text{separacion}} = 49$$

3.9.5.2 Pernos de abastecimiento

Para los pernos de abastecimiento, se sigue el mismo procedimiento ejecutado anteriormente.

Datos:

$$P_i = 0,3861 \text{ MPa}$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

En primera instancia, se requiere determinar la carga aplicada a los pernos, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$F = 1805,74 \text{ N}$$

Como el recipiente está sometido a presión interna, entonces se hará el análisis a tracción primaria. Se va a asumir 6 pernos paso grueso, M8x1,25 y grado 5.8. Las propiedades y características de los pernos que se muestran a continuación fueron tomadas de los anexos D Y E.

$$A_t = 36,6 \text{ mm}^2$$

$$p = 1,25 \text{ mm}$$

$$S_p = 380 \text{ MPa}$$

$$S_y = 420 \text{ MPa}$$

La fuerza aplicada a cada perno es:

$$F_i' = 284,29 \text{ N}$$

Como no existe tracción secundaria, entonces la carga en un perno es:

$$F_i'' = 0$$

$$P = 284,29 \text{ N}$$

Se va a calcular la pretensión o precarga del perno, tomando en cuenta una junta reutilizable:

$$F_i = 10431 \text{ N}$$

Determinar el diámetro menor del perno:

$$d_r = 6,466 \text{ mm}$$

A continuación, se va a determinar el diámetro de paso:

$$d_p = 7,188 \text{ mm}$$

- Dimensiones del perno

Para obtener el agarre del perno o de la conexión "I" se suma el espesor 2,3 mm de la arandela M8 estrecha (ANEXO F), la suma de los dos espesores del material y el espesor de 2.3 mm del empaque. Se obtiene:

$$l = 16,6 \text{ mm}$$

Los datos de la arandela M14:

$$D_{int} = 8,9 \text{ mm}$$

$$D_{ext} = 18,8 \text{ mm}$$

Se procede a calcular la Longitud del sujetador "L"

H = 5,68 mm (ANEXO G), donde H es la altura de la terca hexagonal.

Entonces:

$$L = 30 \text{ mm}$$

La longitud roscada:

$$l_d = 8 \text{ mm}$$

Longitud roscada útil:

$$l_t = 8,6 \text{ mm}$$

- Rigidez efectiva del perno

$$A_d = 50,265 \text{ mm}^2$$

$$K_b = 522,671 \text{ MPa.m}$$

- Cálculo de la rigidez de los elementos a sujetar.

Análisis de la arandela

$$E_{\text{acero}} = 207 \text{ GPa. (ANEXO I)}$$

$$K_{m1} = 2834,723 \text{ MPa.m}$$

Análisis del empaque:

$$E_{\text{asbesto}} = 480 \text{ MPa (ANEXO J)}$$

$$D_{\text{final(emp)}} = 290 \text{ mm}$$

$$t_{\text{emp}} = 2,3 \text{ mm}$$

Se determina el área efectiva:

$$A_g = 5618,738 \text{ mm}^2$$

La rigidez efectiva del empaque:

$$k_{m2} = 262,254 \text{ MPa.m}$$

La rigidez combinada de la junta con empaque es:

$$k_m = 240,05 \text{ MPa.m}$$

Entonces, la constante de rigidez de la junta:

$$C = 0,685$$

- Cargas presentes en la junta

Carga que soporta el perno

$$P_b = 194,82 \text{ N}$$

Carga que soporta el material

$$P_m = 89,55 \text{ N}$$

Carga total en el perno

$$F_b = 10,625 \text{ KN}$$

Carga total en el material

$$F_m = 10,341 \text{ KN}$$

Una vez obtenido las cargas, se calcula el esfuerzo de tensión en el perno.

$$\sigma_b = 290,3 \text{ MPa}$$

Se determina el factor de seguridad a la fluencia para verificar si el perno soporta estructuralmente.

$$N_y = 1,447$$

La carga necesaria para separar la junta bridada es:

$$P_0 = 33,114 \text{ KN}$$

Por último, el factor de seguridad ante la separación de la junta es:

$$n_{separacion} = 116,48$$

3.9.6 Diseño del diámetro para la toma de vapores

La toma de vapores tiene la comunicación directa con los gases generados de la cámara de pirolisis y se ubica en la parte superior del prototipo. El diámetro máximo del agujero se calcula a partir:

$$d_0 = 2 \left(\frac{t_n - c}{t} - 0,8 \right) \sqrt{D(t_n - c)} - C_b \quad (33)$$

Donde:

D: diámetro interior de la tapa [mm]

t: espesor calculado [mm]

t_n : espesor nominal o ejecutivo [mm]

$c = C_b$: Adición al espesor calculado [mm]

Datos:

$t = 3,283$ mm

$c = 0,3283$ mm

$t_n = 4$ mm

Reemplazando en la expresión (34) se obtiene:

$$d_0 = 2 \left(\frac{4 - 0,3283}{3,283} - 0,8 \right) \sqrt{200 (4 - 0,3283)} - 0,3283$$
$$d_0 = 16,928 \text{ mm}$$

3.9.7 Calor necesario o calor de aporte

3.9.7.1 Análisis Ideal

De forma ideal se analiza el siguiente circuito térmico:

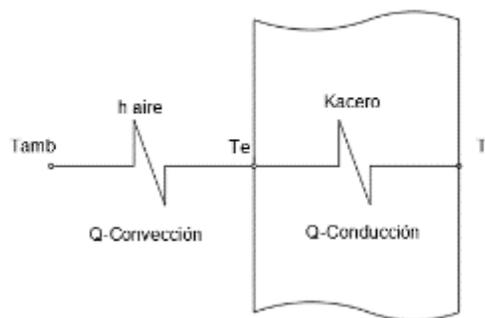


Figura 16-3. Circuito térmico ideal

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El calor necesario para alcanzar una temperatura deseada, se la obtiene con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{T_i - T_{amb}}{\frac{1}{h_{aire}(2\pi r_e \cdot L)} + \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi K_{acero} L}} \quad (34)$$

Donde:

T_i : Temperatura interior del cilindro [$^{\circ}\text{C}$]

T_{amb} : Temperatura del ambiente o del aire [$^{\circ}\text{C}$]

r_e : Radio exterior del cilindro [m]

r_i : Radio interior del cilindro [m]

L : Longitud del cilindro [m]

h_{aire} : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$]

K_{acero} : Conductividad térmica del acero [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]

Datos:

$T_i = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{amb}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$r_e = 0,104\text{ m}$

$r_i = 0,1\text{ m}$

$L = 0,3\text{ m}$

$h_{\text{aire}} = 20\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ (ANEXO K)

$K_{\text{acero}} = 58\text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ (ANEXO L)

La temperatura interior del reactor de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue seleccionada mediante la búsqueda y análisis de diversos artículos de investigación, (Bridgwater, 2012, p.3) los cuales cuentan con datos comprobados experimentalmente en el proceso de pirolisis de plásticos, verificando su comportamiento en diferentes tipos de reactores, rangos de temperatura, tiempo de residencia, tasa de calentamiento. Analizando el proceso de pirolisis con mencionadas características, dichos trabajos de investigación concluyen que el rango de temperatura óptima para obtener mayor eficiencia de la fracción líquida obtenida a partir de los residuos plásticos es de $400 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se muestra en el ANEXO M.

A continuación, se reemplazan los valores en la ecuación (35).

$$Q = \frac{550^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{20(2\pi \times 0,104 \times 0,3)} + \frac{\ln \frac{0,104}{0,1}}{2\pi \times 58 \times 0,3}}$$
$$Q = 2075,06\text{ W} = 2,075\text{ KW}$$

La potencia encontrada en condiciones ideales es la mínima necesaria que permite alcanzar una temperatura de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la pared interior del prototipo de reactor. Siendo esta potencia de $2,075\text{ KW}$, ha mencionado valor se debe otorgarle un factor de seguridad que garantiza el

funcionamiento del equipo. Por ende, las condiciones requeridas para la resistencia eléctrica de banda cerámica son: el diámetro interno sea regulable a 20 cm y que garantice una potencia mínima de 2,075 KW para alcanzar la temperatura de 550 °C en el interior del reactor.

Para la selección de la resistencia eléctrica de banda cerámica se hace uso del siguiente catálogo, ofertado por BMS, como se muestra en el ANEXO N.

Las características de la resistencia de banda cerámica ofertadas por el proveedor BMS, son las siguientes:

Tabla 31-3: Características técnicas de la resistencia de banda cerámica

Diámetro interno (mm)	205
Ancho (mm)	254
Espesor del aislante (in)	2"
Potencia (KW)	8,6
Voltaje (V)	110 y 220
Temperatura máxima de trabajo (°C)	800

Fuente: (bmsespana.eu)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020



Figura 17-3. Resistencia de banda cerámica

Fuente: (bmsespana.eu)

3.9.7.2 *Análisis en condiciones reales*

Para el análisis en condiciones reales se debe tomar en cuenta la temperatura de pirólisis, presión de trabajo, el funcionamiento y aporte de calor de la resistencia de calor, con las condiciones óptimas para determinar el espesor de aislante térmico que se requiera para que el reactor sea seguro en su exterior y que permita la fácil manipulación y control del usuario.

A continuación, se muestra un esquema del reactor y los componentes que permite identificar el circuito térmico real.

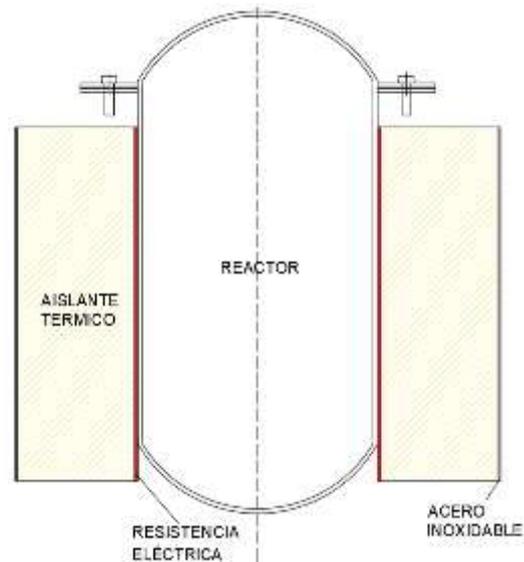


Figura 18-3. Boceto del reactor de pirólisis y sus componentes

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En base al boceto presentado se tiene el siguiente circuito térmico.

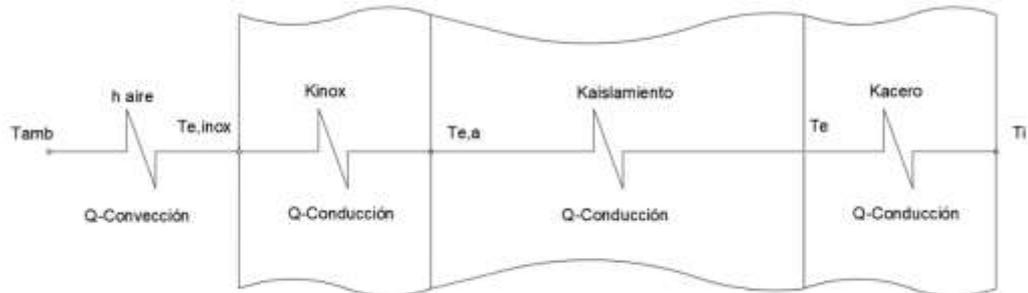


Figura 19-3. Circuito térmico Real

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El calor que se va a aportar al sistema en función de la resistencia seleccionada (ANEXO N)

$$Q_{aporte} = 8,6 \text{ KW}$$

$$T_i = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

El circuito térmico para analizar es el siguiente:

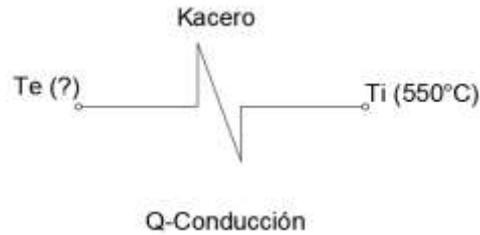


Figura 20-3. Análisis térmico para el acero

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Se calcula la temperatura exterior del reactor, con la ayuda de ecuación por conducción con un análisis estable.

$$Q_{\text{aporte}} = \frac{T_i - T_e}{R} \quad (35)$$

De la expresión planteada se despeja la resistencia térmica del acero.

$$R = \frac{\left(\ln \frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi K_{\text{acero}} L} \quad (36)$$

$$R = \frac{\left(\ln \frac{0,104 \text{ m}}{0,1 \text{ m}}\right)}{2\pi \left(58 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}\right) (0,3 \text{ m})}$$

$$R = 358,745 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Reemplazando el valor obtenido en la expresión (36), se encuentra la temperatura exterior del recipiente a presión.

$$8600 \text{ W} = \frac{T_e - 550 \text{ } ^\circ\text{C}}{358,745 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C/W}}$$

$$T_e = (8600 \text{ W})(358,745 \times 10^{-6}) + 550^\circ\text{C}$$

$$T_e = 553,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Análisis térmico del aislamiento

El aislante de fibra de cerámica seleccionado, según la oferta comercial cuenta con un espesor de:

$$e_{\text{aislante}} = 2 \text{ in} = 50,8 \text{ mm}$$

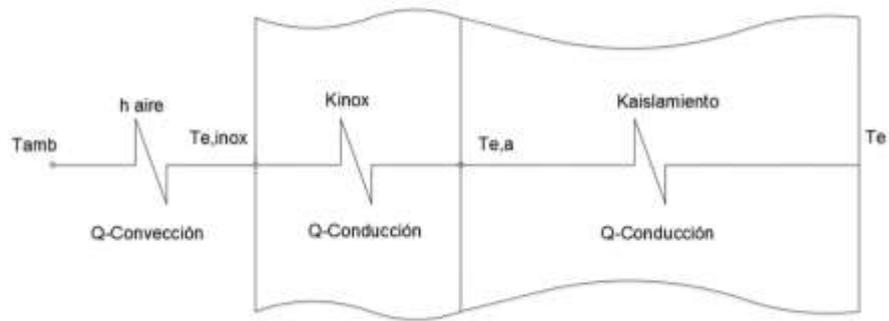


Figura 21-3. Análisis térmico para el aislamiento

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El calor por convección del aire es igual al calor por conducción en cualquier punto del circuito térmico.

$$Q_{\text{conduccion}} = Q_{\text{conveccion}}$$

$$\frac{T_e - T_{e,\text{inox}}}{R_{\text{cond}}} = \frac{T_{e,\text{inox}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{conv}}}$$

En donde, las resistencias en el circuito térmico se determinan a continuación.

$$R_{\text{cond}} = \frac{\left(\ln \frac{r_{e,a}}{r_{i,a}}\right)}{2\pi K_{\text{aislante}} L} + \frac{\left(\ln \frac{r_{e,\text{inox}}}{r_{i,\text{inox}}}\right)}{2\pi K_{\text{inoxidable}} L}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_{\text{aire}} A}$$

$$A = 2\pi r_{e,\text{inox}} L$$

$$A = 2\pi(0,1568 \text{ m})(0,254 \text{ m}) = 0,2502 \text{ m}^2$$

$$K_{\text{aislante}} = \frac{0,13 \text{ W}}{\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}} \text{ (ANEXO O)}$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{\left(\ln \frac{0,1548}{0,104}\right)}{2\pi \left(\frac{0,13 \text{ W}}{\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (0,254 \text{ m})} + \frac{\left(\ln \frac{0,1568}{0,1548}\right)}{2\pi \left(\frac{16 \text{ W}}{\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (0,254 \text{ m})}$$

$$R_{\text{cond}} = 1,9176 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{\left(20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}\right) (0,2502 \text{ m}^2)}$$

$$R_{\text{conv}} = 0,1998 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Reemplazando los valores de resistencias térmicas, se determina la temperatura en la superficie exterior del acero inoxidable

$$\frac{553,09\text{ °C} - T_{e,\text{inox}}}{1,9176} = \frac{T_{e,\text{inox}} - 20\text{ °C}}{0,1998}$$

$$T_{e,\text{inox}} = 70,3\text{ °C}$$

Según el reglamento de permiso de trabajo INSHT, la temperatura de la pared o superficie exterior del reactor se considera segura entre 40 a 55 °C para garantizar la seguridad de los operarios.

Debido a que la temperatura exterior encontrada es de 70,36 °C, la cual no se encuentra dentro del rango de seguridad permitido, se procede a determinar un espesor de aislante térmico (fibra de cerámica) adicional, que permita obtener una temperatura segura.

Tomando como referencia de un aislante de fibra de cerámica en el mercado, se fabrican de 1 y 2 in de espesor. Por ende, los cálculos realizados con dichos espesores adicionales se muestran a continuación:

$$e_{\text{adicional}} = 4\text{ in} = 101,6\text{ mm}$$

$$Q_{\text{conduccion}} = Q_{\text{conveccion}}$$

$$\frac{T_e - T_{e,\text{inox}}}{R_{\text{cond}}} = \frac{T_{e,\text{inox}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{conv}}}$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{\left(\ln \frac{r_{e,a}}{r_{i,a}}\right)}{2\pi K_{\text{aislante}} L} + \frac{\left(\ln \frac{r_{e,\text{inox}}}{r_{i,\text{inox}}}\right)}{2\pi K_{\text{inoxidable}} L}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_{\text{aire}} A}$$

$$A = 2\pi r_{e,\text{inox}} L$$

$$A = 2\pi(0,2076\text{ m})(0,254\text{ m}) = 0,3313\text{ m}^2$$

$$K_{\text{aislante}} = \frac{0,13\text{ W}}{\text{m °C}} \text{ (ANEXO O)}$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{\left(\ln \frac{0,2056}{0,104}\right)}{2\pi \left(\frac{0,13\text{ W}}{\text{m °C}}\right) (0,254\text{ m})} + \frac{\left(\ln \frac{0,2076}{0,2056}\right)}{2\pi \left(\frac{16\text{ W}}{\text{m °C}}\right) (0,254\text{ m})}$$

$$R_{\text{cond}} = 3,2854 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{(20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}})(0,3313 \text{ m}^2)}$$

$$R_{\text{conv}} = 0,15091 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

Se va a encontrar la temperatura que se encuentra en la superficie exterior del acero inoxidable.

$$\frac{553,09 \text{ } ^\circ\text{C} - T_{e,\text{inox}}}{3,2854} = \frac{T_{e,\text{inox}} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}}{0,15091}$$

$$T_{e,\text{inox}} = 43,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con los cálculos realizados, se garantiza que la temperatura externa está dentro de los límites permitidos para brindar seguridad laboral al operario, con un valor de 43,44 °C.

3.9.8 *Análisis en las tuberías de transporte de gases*

3.9.8.1 *Cálculo de la temperatura superficial de la tubería*

En primer lugar, se selecciona la tubería con la referencia de que el diámetro interior de la tubería no exceda a 16,928 mm al diámetro de toma vapores. Entonces:

Datos

Tubería cedula 40 (ANEXO P)

$$D_e = 21,34 \text{ mm}$$

$$D_i = 15,8 \text{ mm}$$

$$L = 400 \text{ mm}$$

$$V = 0,2 \text{ m/s}$$

$$T_1 = 400 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (valor tomado de las referencias bibliográficas)}$$

$$T_2 = 380 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_s = \dot{\iota}$$

Donde:

D_e : diámetro exterior de la tubería [mm]

D_i : diámetro interior de la tubería [mm]

L: longitud de la tubería [mm]

T_1 : temperatura de entrada a la tubería [°C]

T_2 : temperatura de salida entrada a la tubería [°C]

T_s : temperatura superficial de la tubería [°C]

Para obtener las propiedades del fluido que pasa por la tubería, se procede a calcular una temperatura promedio.

$$T_b = \frac{400 + 380}{2} = 390 \text{ °C}$$

Propiedades

El gas analizado es CO₂, sus propiedades fueron tomadas del ANEXO Q.

$$\rho = 0,8107 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 1106,8 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{°C}}$$

$$k = 0,044129 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$$

$$\mu = 3,0231 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\text{Pr} = 0,74572$$

Para el análisis se requiere determinar el número de Reynolds,

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (37)$$

Donde:

ρ : Densidad [kg/m³]

V: Velocidad del fluido [m/s]

D: Diámetro [m]

μ : Viscosidad Dinámica $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$

Pr: Número de Prandtl

k: Conductividad térmica [W/m. °C]

Entonces:

$$R_e = \frac{0,8107(0,2)(0,02134)}{3,0231 \times 10^{-5}}$$

$$R_e = 114,4$$

Se asume una temperatura superficial arbitraria de 100°C y la viscosidad dinámica a esa

temperatura es:

$$\mu_s = 1,841 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Ahora determinamos el Número de Nusselt, dado por la siguiente expresión:

$$\text{Nu} = 1,86 \left(\frac{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (38)$$

$$\text{Nu} = 1,86 \left(\frac{114,4 \times 0,74572 \times 0,02134}{0,4} \right)^{1/3} \left(\frac{3,0231 \times 10^{-5}}{1,841 \times 10^{-5}} \right)^{0,14}$$

$$\text{Nu} = 3,3$$

Entonces el coeficiente convectivo viene dado por la expresión:

$$h_\infty = \frac{\text{Nu} \cdot k}{D} \quad (39)$$

Donde:

Nu – Número de Nusselt

k – Conductividad térmica $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$

D – Diámetro [m]

Por lo tanto:

$$h_\infty = \frac{3,3(0,044129)}{0,02134}$$

$$h_\infty = 6,824 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Balance de energía

$$Q_{\text{conv}} = Q_s$$

$$h_\infty A (T_s - T_b) = \dot{m} C_p (T_2 - T_1)$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L = \pi(0,02134 \text{ m})(0,4 \text{ m}) = 0,02682 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A = 0,8107(0,2) \left(\frac{\pi(0,02134)^2}{4} \right) = 5,799 \times 10^{-5} \text{ Kg/s}$$

$$T_s = \frac{\dot{m} C_p (T_2 - T_1)}{h_\infty A} + T_b$$

$$T_s = \frac{(5,799 \times 10^{-5} \text{ Kg/s})(1106,8 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}})(-20 ^\circ\text{C})}{(6,824 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}})(0,02682 \text{ m}^2)} + 390 ^\circ\text{C}$$

$$T_s = 382,986 \text{ }^\circ\text{C}$$

Después de varias iteraciones, siguiendo el mismo procedimiento el valor de temperatura superficial es de:

$$T_s = 382,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.9.8.2 Convección Natural en la tubería

Se analiza el calor perdido de la tubería por convección natural. Donde se toma el dato calculado de la temperatura superficial en el ítem anterior.

Datos:

$$T_s = 382,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{382,5 + 20}{2} = 201,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Propiedades del Aire (ANEXO R)

$$k = 0,03787 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\nu = 3,4709 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Pr} = 0,69733$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{474,25}$$

La longitud característica en el análisis es:

$$L_c = D = 0,02134 \text{ m}$$

Para determinar el número de Rayleigh, se denota por la siguiente expresión.

$$\text{Ra}_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \text{Pr} \quad (40)$$

Donde:

Ra_D : Número de Rayleigh

g : Gravedad [m/s^2]

β : Coeficiente de expansión volumétrica

D : Diámetro [m]

ν : Viscosidad cinemática [m^2/s]

Pr : Número de Prandtl

T_s : Temperatura superficial [$^{\circ}C$]

T_{∞} : Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

Entonces reemplazando:

$$Ra_D = \frac{\left(\frac{9,81m}{s^2}\right) \left(\frac{1}{474,25} K\right) (382,5 - 20 K) (0,02134 m)^3}{\left(3,4709 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2} (0,69733)$$
$$Ra_D = 42180,048$$

Numero de Nusselt

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$
$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 (42180,048)^{1/6}}{[1 + (0,559/0,69733)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$
$$Nu = 6,214$$

Finalmente:

$$h = \frac{k}{D} Nu$$
$$h = \frac{0,03787}{0,02134} (6,214) = 11,027 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$$
$$A_s = \pi \cdot D \cdot L = \pi(0,02134 m)(0,4m) = 0,02682 m^2$$
$$Q = hA_s(T_s - T_{\infty})$$
$$Q = 11,027(0,02682)(382,5 - 20)$$
$$Q = 107,207 W$$

La tubería pierde calor por convección natural hacia el aire, a razón de 107,207 W

3.10 Validación del prototipo reactor de pirolisis a través de ANSYS Workbench

3.10.1 Análisis térmico del prototipo

Para el análisis térmico se consideran los siguientes elementos: el recipiente a presión que almacena los residuos plásticos, el aislante térmico y por último la chaqueta delgada de acero inoxidable.

3.10.1.1 Pre-proceso

Se definirán parámetros de configuración como son: material, geometría, cargas térmicas de diseño y designación del mallado.

3.10.1.1.1 Material

Para el sistema térmico intervienen los siguientes materiales que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 32-3: Propiedades térmicas de los materiales

Material	Conductividad térmica isotrópica (W/m°C)
Acero SA-516 Gr 70	58
Fibra de cerámica	0,13
Acero inoxidable 304	16

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.1.2 Geometría

El sistema térmico fue modelado en el software Solid Works, en una extensión compatible con ANSYS Workbench (.step). Para simplificar el estudio en ANSYS y obtener mallas con mayor calidad, se hará un análisis en 2D mediante el método axisimétrico, muy utilizado para sólidos de revolución. Por consiguiente, en la figura 29-3 se muestra dicho sistema térmico en 3D y el perfil se la sección transversal del sistema térmico en 2D (superficies planas).

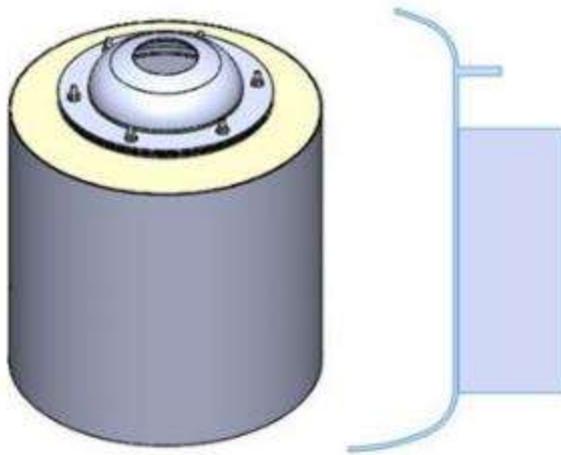


Figura 22-3. Modelado del sistema térmico

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.1.3 Variables térmicas de diseño

Las variables térmicas fueron definidas anteriormente en los cálculos del diseño.

Tabla 33-3: Cargas térmicas del sistema

Variable	Valor
Temperatura interna del recipiente	550 °C
Flujo de calor radial	8600 W
Temperatura convectiva del aire	20 °C
Coefficiente convectivo del aire	20 W/m ² °C

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Dichas variables de diseño térmico se asignaron como se muestra en la figura 30-3:

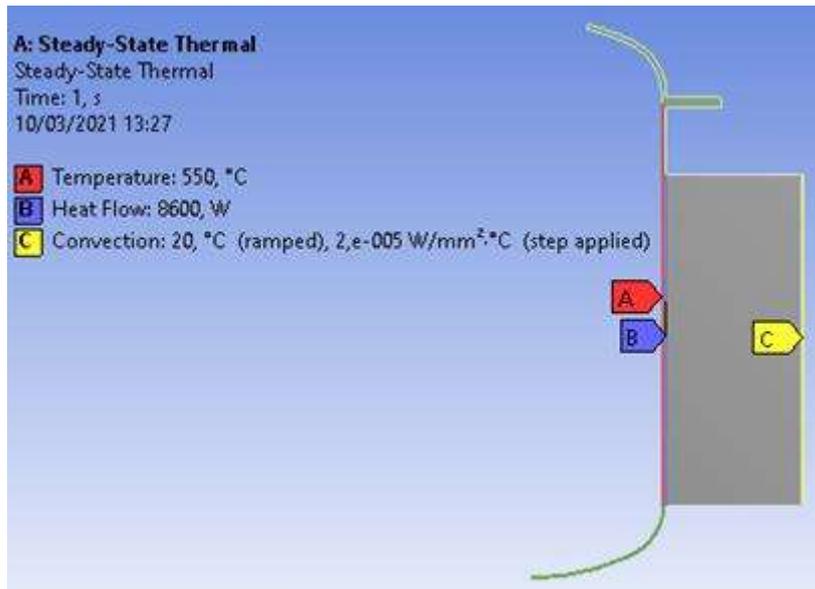


Figura 23-3. Asignación de parámetros térmicos en el reactor

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.1.4 Mallado

Se realizará el análisis con el evaluador Element Quality, el cual define que los resultados óptimos, son con calidades de malla igual o cercanas a 1. Por lo contrario, valores cercanos a cero, no brinda confiabilidad en sus resultados.

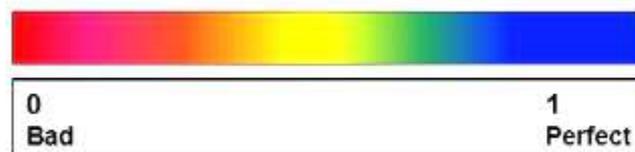


Figura 24-3. Paleta de colores Element Quality

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 32-3 se muestra el mallado de la geometría.

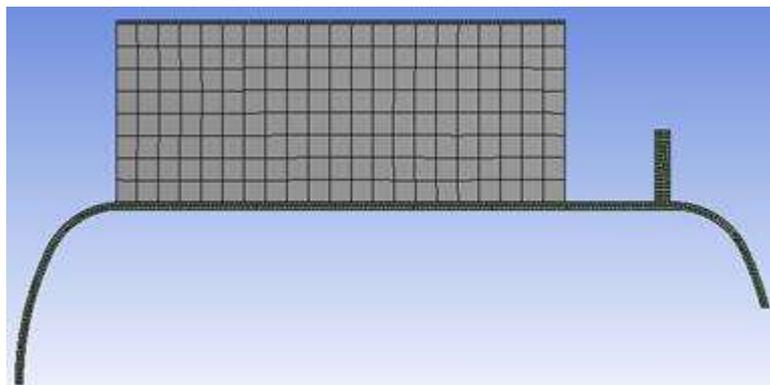


Figura 25-3. Mallado del sistema térmico

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.2 Post Proceso

Se obtuvieron resultados de las variables desconocidas mediante el análisis de la malla a calidades distintas.

3.10.1.2.1 Análisis por defecto

La calidad de malla en este análisis es de 0,84609.

Distribución de temperatura

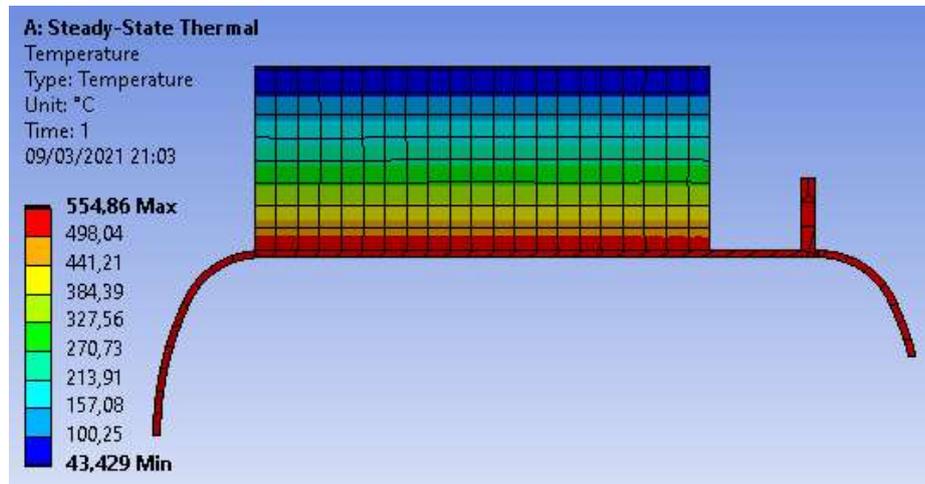


Figura 26-3. Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Por defecto”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.2.2 Análisis con Sizing 4 mm

La calidad de malla en este análisis es de 0,96471.

Distribución de temperatura

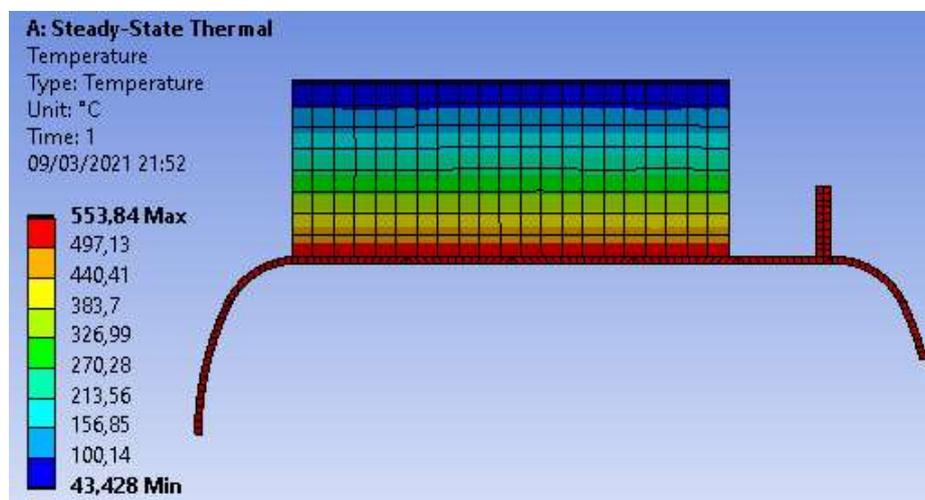


Figura 27-3. Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Sizing 4”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.1.2.3 Análisis con Sizing 2 mm

La calidad de malla en este análisis es de 0,97191

Distribución de temperatura

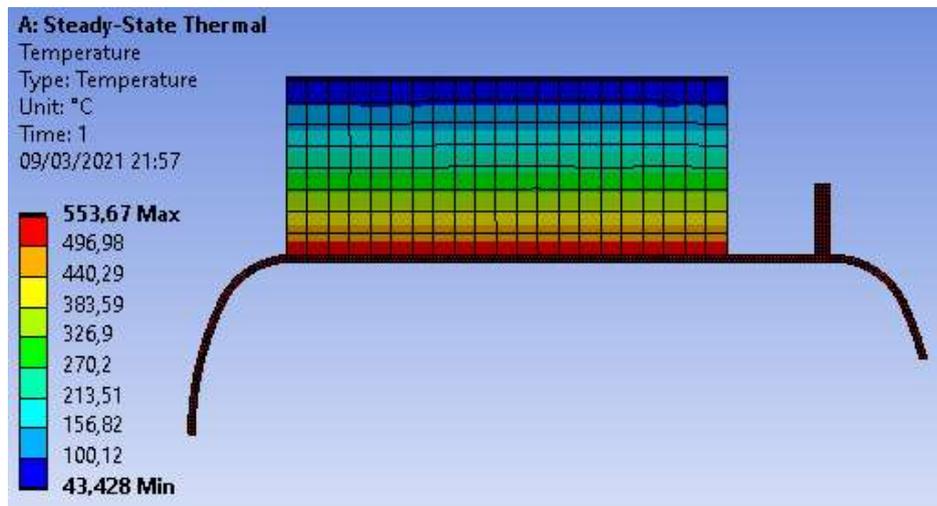


Figura 28-3. Distribución de temperatura en el reactor de pirolisis “Sizing 2”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2 Análisis estructural del prototipo

Para el análisis estructural se consideran los siguientes elementos: el cuerpo cilíndrico del recipiente a presión y las tapas toriesféricas.

3.10.2.1 Pre proceso

Se definirán parámetros de configuración como son: material, geometría, cargas aplicadas, condición de temperatura, soportes y designación del mallado.

3.10.2.1.1 Material

El material usado es el acero SA-516 Gr 70, en la tabla 42-3 se muestran sus propiedades:

Tabla 34-3: Propiedades del acero SA 516 Gr 70

Propiedad	Valor
Densidad	8030 Kg/m ³
Módulo de Young	190 GPa
Coeficiente de Poisson	0,3
Resistencia de fluencia a tensión	260 MPa

Resistencia de fluencia a compresión	260 MPa
Resistencia ultima a la tensión	485 MPa

Fuente: (Holman, 1999)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.1.2 Geometría

El recipiente a presión fue modelado en el software Solid Works, en una extensión compatible con ANSYS Workbench (.step). Para simplificar el estudio en ANSYS y obtener mallas con mayor calidad, se hará un análisis en 2D mediante el método axisimétrico, muy utilizado para solidos de revolución. Por consiguiente, en la figura 36-3 se muestra dicha geometría en 3D y el perfil se la sección transversal del recipiente a presión en 2D (superficie plana).

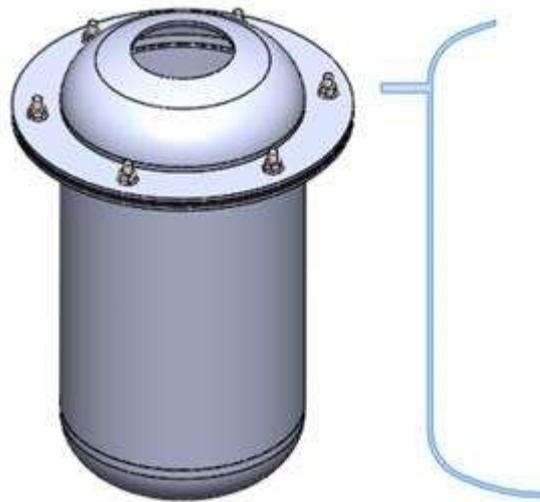


Figura 29-3. Geometría 3D y 2D del reactor de pirolisis

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.1.3 Cargas aplicadas

Las únicas cargas que actúan son: presión interna y peso de los residuos plásticos.

Tabla 35-3: Cargas aplicadas en el reactor

Carga	Valor
Presión interna	0,3681 MPa
Peso residuos plásticos	9,8 N
Condición de temperatura	550 °C

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.1.4 Soportes

Se aplica un soporte fijo en la tapa inferior del reactor, además se coloca unos desplazamientos en los bordes de las tapas, como se observa a continuación:

El soporte y las cargas aplicadas se asignaron como se muestra en la figura 37-3



Gráfico 1-3. Asignación de parámetros estructurales en el reactor

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.1.5 Mallado

Se realizará el análisis con el evaluador Element Quality, el cual define que los resultados óptimos, son con calidades de malla igual o cercanas a 1. Por lo contrario, valores cercanos a cero, no brinda confiabilidad en sus resultados.

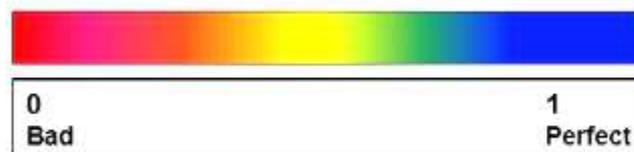


Figura 30-3. Paleta de colores Element Quality

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 39-3 se muestra el mallado de la geometría.

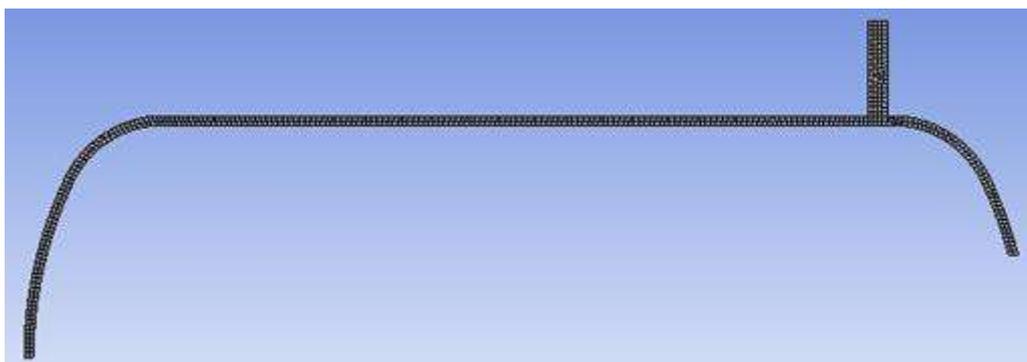


Figura 31-3. Mallado del reactor

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.2 Post proceso

Se obtuvieron resultados de los parámetros de interés mediante el análisis de la malla a calidades distintas.

3.10.2.2.1 Análisis por defecto

La calidad de malla en este análisis es de 0,88294.

Esfuerzo de Von Mises

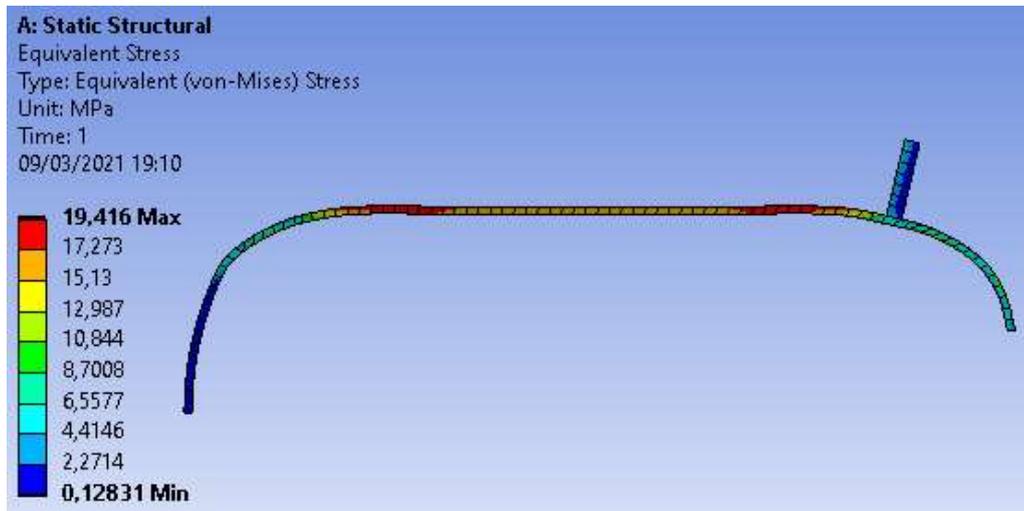


Figura 32-3. Resultados de esfuerzos en el reactor “Por defecto”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

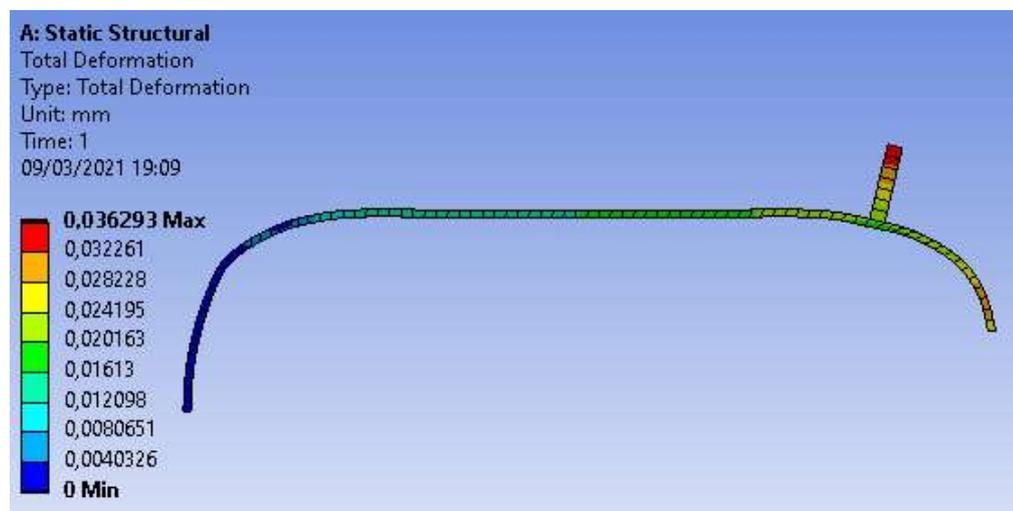


Figura 33-3. Resultados deformación total en el reactor “Por defecto”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

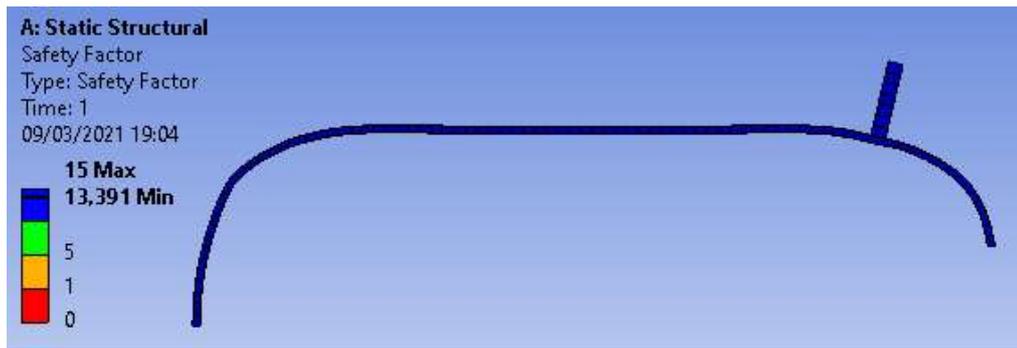


Figura 34-3. Resultados factor de seguridad del reactor “Por defecto”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.2.2 Análisis con Sizing 4 mm

La calidad de malla en este análisis es de 0,88294.

Esfuerzo de Von Mises



Figura 35-3. Resultados de esfuerzos en el reactor “Sizing 4 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

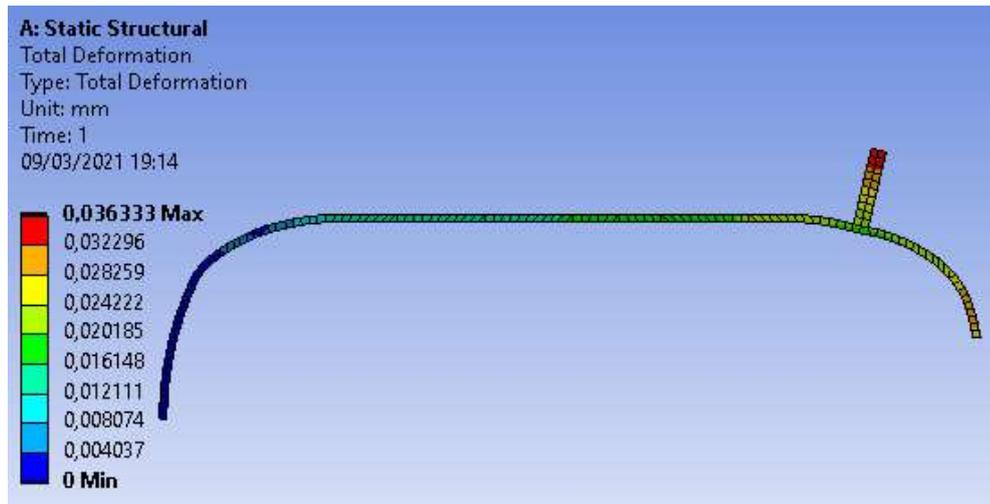


Figura 36-3. Resultados deformación total en el reactor “Sizing 4 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

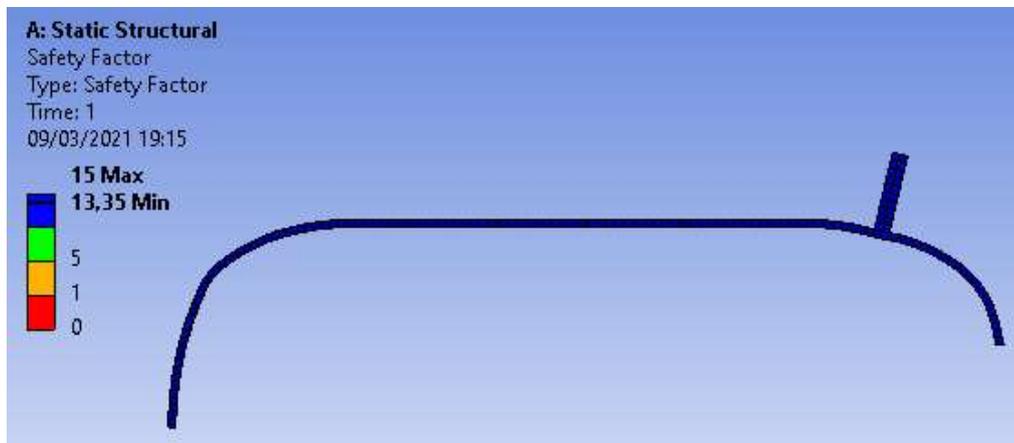


Figura 37-3. Resultados factor de seguridad del reactor “Sizing 4 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.2.3 *Análisis con Sizing 2 mm*

La calidad de malla en este análisis es de 0,9555.

Esfuerzo de Von Mises



Figura 38-3. Resultados de esfuerzos en el reactor “Sizing 3,5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

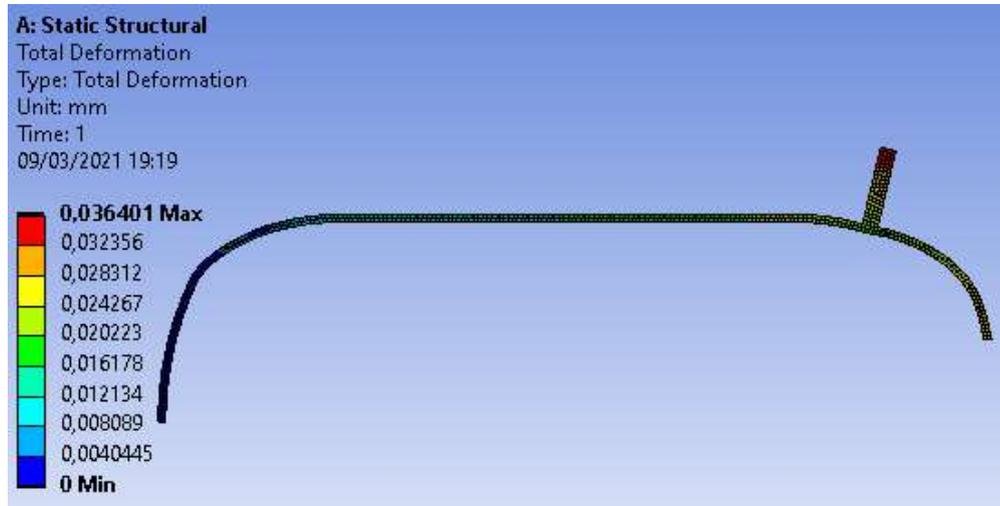


Figura 39-3. Resultados deformación total en el reactor “Sizing 3,5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

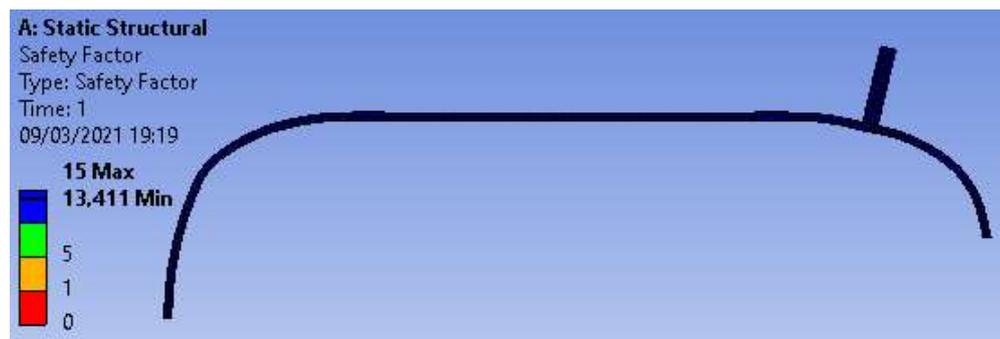


Figura 40-3. Resultados factor de seguridad del reactor “Sizing 3,5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3 Análisis estructural de los pernos entre la tapa y cuerpo cilíndrico.

Para el análisis estructural de los pernos se van a seccionar las partes de interés, como son los siguientes elementos: tapa superior toriesférica, empaque, pernos y brida inferior.

3.10.3.1 Pre-proceso

Se definirán parámetros de configuración como son: material, geometría, contactos, cargas aplicadas, condición de temperatura, soportes y designación del mallado.

3.10.3.1.1 Material

Para el análisis de pernos se va a utilizar 3 tipos de materiales, para el perno, empaque, tapa toriesférica y brida inferior.

Tabla 36-3: Propiedades del acero SA 516 Gr 70

Propiedad	Valor
Densidad	8030 Kg/m ³
Módulo de Young	190 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Resistencia de fluencia a tensión	260 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	260 MPa
Resistencia ultima a la tensión	485 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 37-3: Propiedades del perno grado métrico 5.8

Propiedad	Valor
Módulo de Young	206 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Resistencia de fluencia a tensión	420 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	420 MPa
Resistencia ultima a la tensión	520 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 38-3: Propiedades del empaque de asbesto

Propiedad	Valor
Densidad	2500 Kg/m ³
Módulo de Young	480 MPa
Coefficiente de Poisson	0,17
Resistencia de fluencia a tensión	255 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	255 MPa
Resistencia ultima a la tensión	1471 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.1.2 Geometría

El modelo fue generado en el software Solid Works, en una extensión compatible con ANSYS Workbench (.step). Para el estudio en ANSYS se hará un análisis en 3D, donde el principal análisis es obtener el factor de seguridad de los pernos. Por consiguiente, en la figura 49-3 se muestra la geometría.

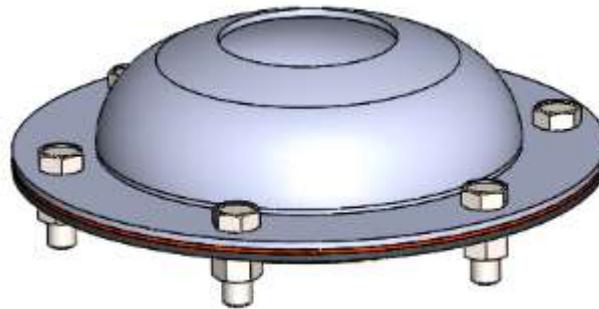


Figura 41-3. Conjunto de brida y pernos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.1.3 Contactos

Para el análisis correcto de los pernos de sujeción, se tiene en cuenta los contactos entre las diferentes geometrías, para este caso vamos a utilizar contactos tipo Bonded (eje-agujero) y Frictional (soportes, placas, caras planas). En total se asignaron 44 contactos para nuestro modelo.

Tabla 39-3: Coeficientes de fricción entre materiales de interés

Fricción entre materiales	Valor
Acero - Acero	0,15 - 0,2

Acero – Asbesto moldeado	0,2 - 0,5
--------------------------	-----------

Fuente:(8000vuelas.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.1.4 Cargas aplicadas

Las cargas que actúan para el análisis de los pernos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 40-3: Cargas asignadas para el análisis de pernos

Carga	Valor
Presión interna	0,3681 MPa
Precarga de los pernos	32775 N
Condición de temperatura	550 °C

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.1.5 Soportes

Se aplica un soporte fijo en la brida inferior (cuerpo cilíndrico del reactor) para analizar el estado más crítico de los pernos.

El soporte y las cargas aplicadas se asignaron como se muestra en la figura...

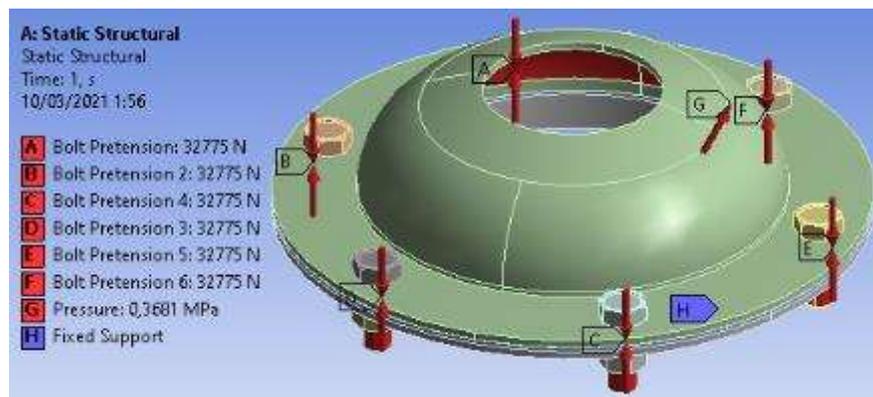


Figura 42-3. Asignación de parámetros estructurales para análisis de los pernos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.1.6 Mallado

Se realizará el análisis con el evaluador Element Quality, el cual define que los resultados óptimos, son con calidades de malla igual o cercanas a 1. Por lo contrario, valores cercanos a cero, no brinda confiabilidad en sus resultados.

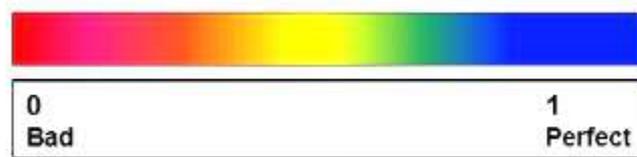


Figura 43-3. Paleta de colores Element Quality

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 52-3 se muestra el mallado de la geometría.

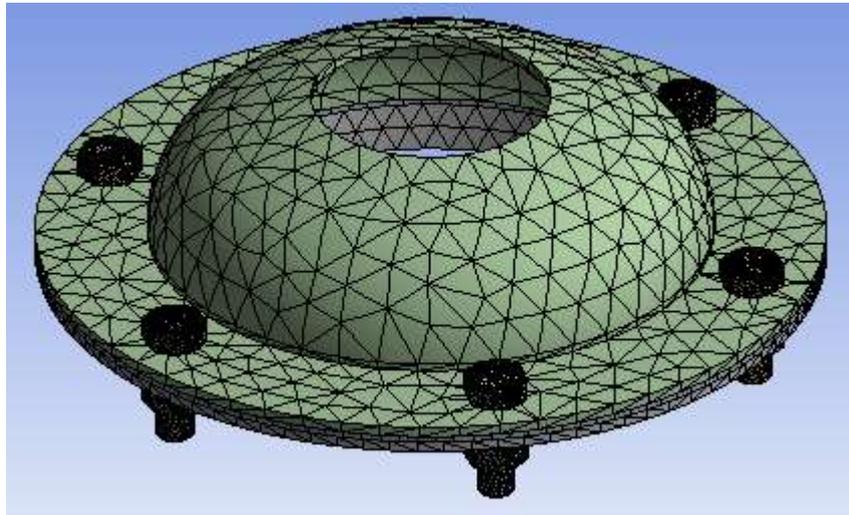


Figura 44-3. Mallado de los pernos y sección de interés

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.2 Post proceso

Se obtuvieron resultados de los parámetros de interés mediante el análisis de la malla a calidades distintas. Para ver claramente los resultados de los pernos, ocultamos los demás elementos.

3.10.3.2.1 Análisis con Sizing 2 mm “Pernos y tuercas”

La calidad de malla en este análisis es de 0,77867

Esfuerzo de Von Mises

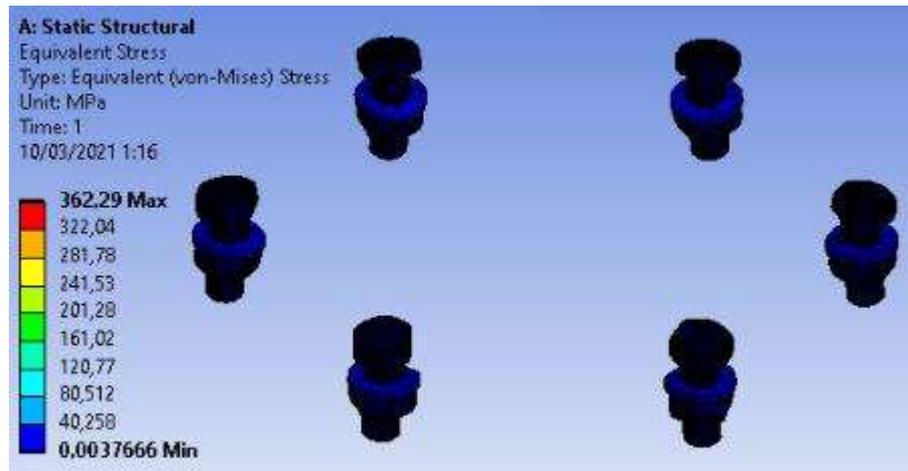


Figura 45-3. Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 2 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

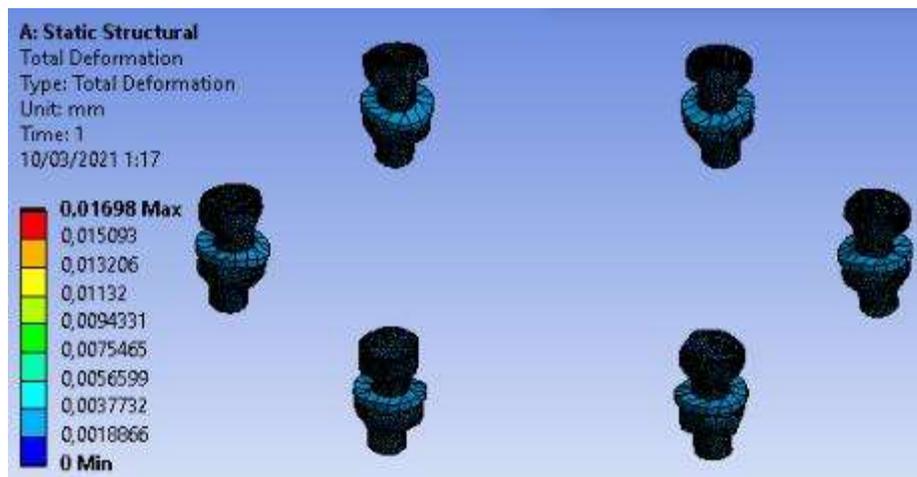


Figura 46-3. Resultados deformación total en los pernos “Sizing 2 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

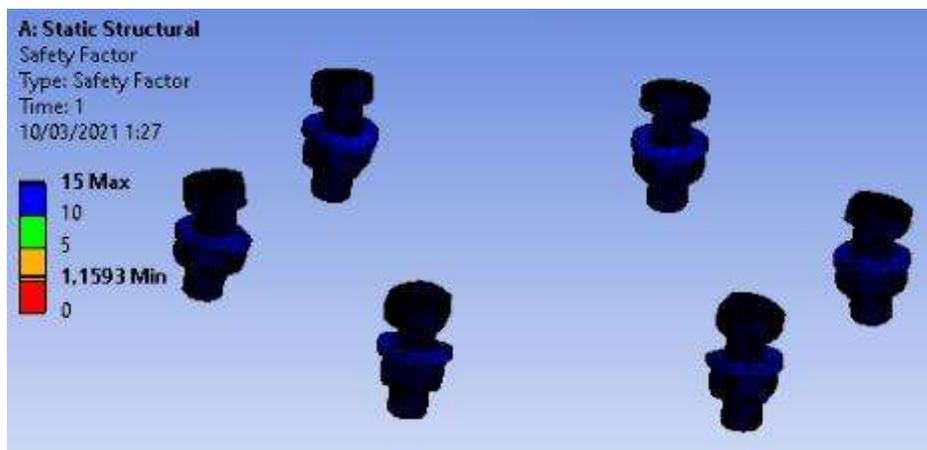


Figura 47-3. Resultados factor de seguridad en los pernos y tuercas “Sizing 2 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.2.2 Análisis con Sizing 15 mm “Tapa superior”

La calidad de malla en este análisis es de 0,77966

Esfuerzo de Von Mises

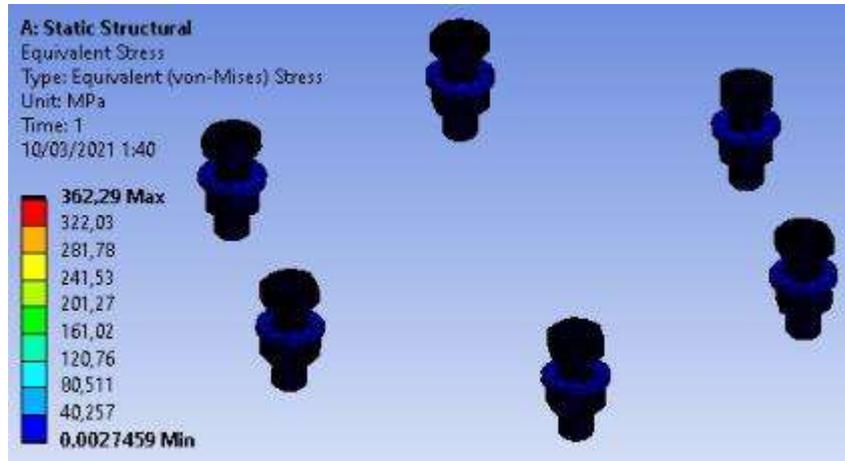


Figura 48-3. Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 15 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

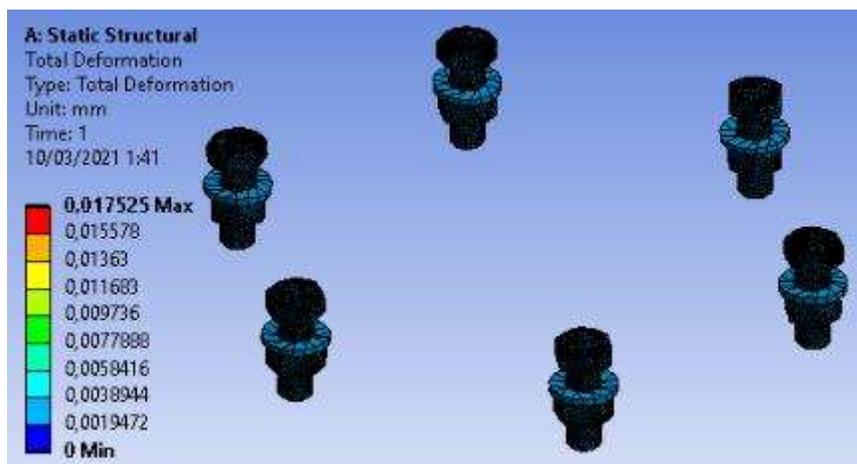


Figura 49-3. Resultados deformación total en los pernos “Sizing 15 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

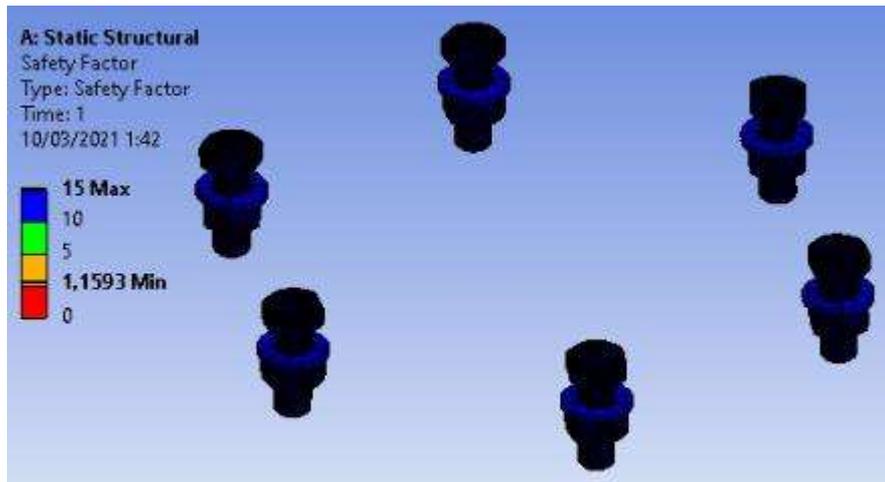


Figura 50-3. Resultados factor de seguridad en los pernos “Sizing 15 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.3.2.3 Análisis con Sizing 10 mm “Brida inferior”

La calidad de malla en este análisis es de 0.77906

Esfuerzo de Von Mises

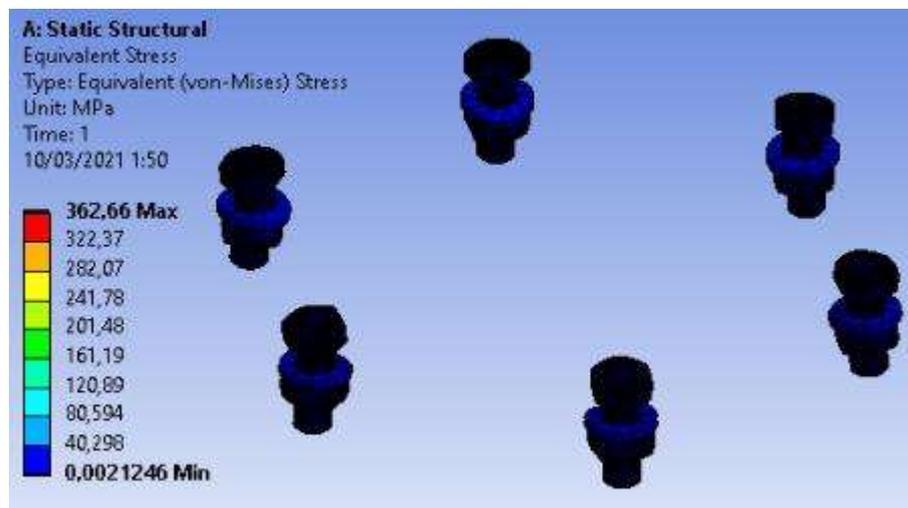


Figura 51-3. Resultados de esfuerzos en los pernos “Sizing 10 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

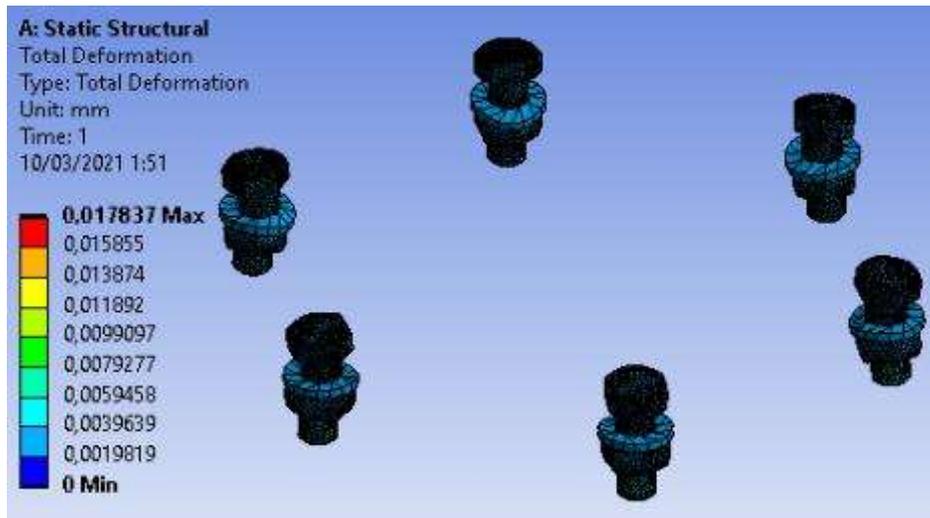


Figura 52-3. Resultados deformación total en los pernos “Sizing 10 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

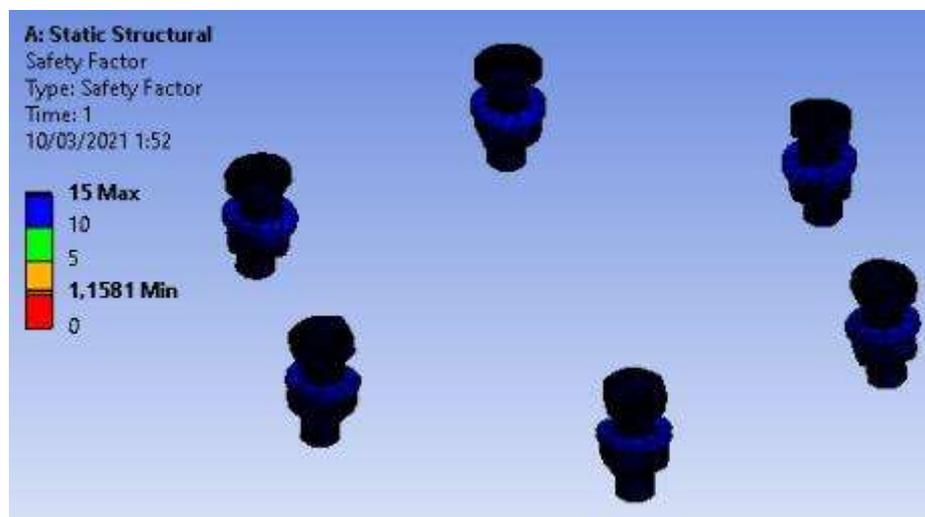


Figura 53-3. Resultados factor de seguridad en los pernos “Sizing 10 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4 Análisis estructural de la alimentación de los plásticos

Para este análisis estructural de los pernos se van a seccionar las partes de interés, como son los siguientes elementos: tapa plana, empaque, pernos, cuello cilíndrico.

3.10.4.1 Pre-proceso

Se definirán parámetros de configuración como son: material, geometría, contactos, cargas aplicadas, condición de temperatura, soportes y designación del mallado.

3.10.4.1.1 Material

Para el análisis de pernos se va a utilizar 3 tipos de materiales, para el perno, empaque, tapa plana y brida.

Tabla 41-3: Propiedades del acero SA 516 Gr 70

Propiedad	Valor
Densidad	8030 Kg/m ³
Módulo de Young	190 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Resistencia de fluencia a tensión	260 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	260 MPa
Resistencia ultima a la tensión	485 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 42-3: Propiedades del perno grado métrico 5.8

Propiedad	Valor
Módulo de Young	206 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Resistencia de fluencia a tensión	420 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	420 MPa
Resistencia ultima a la tensión	520 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 43-3: Propiedades del empaque de asbesto

Propiedad	Valor
Densidad	2500 Kg/m ³
Módulo de Young	480 MPa
Coefficiente de Poisson	0,17
Resistencia de fluencia a tensión	255 MPa
Resistencia de fluencia a compresión	255 MPa
Resistencia ultima a la tensión	1471 MPa

Fuente:(Budynas y Nisbett, 2008)

3.10.4.1.2 Geometría

El modelo fue generado en el software Solid Works, en una extensión compatible con ANSYS Workbench (.step). Para el estudio en ANSYS se hará un análisis en 3D, donde el principal análisis es obtener el factor de seguridad mínimo del conjunto. Por consiguiente, en la figura 62-3 se muestra la geometría.

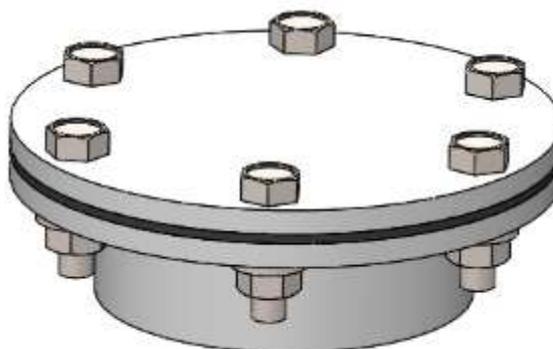


Figura 54-3. Conjunto de abastecimiento de plástico

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.1.3 Contactos

Para el análisis correcto de los pernos de sujeción, se tiene en cuenta los contactos entre las diferentes geometrías, para este caso vamos a utilizar contactos tipo Bonded (eje-agujero) y Frictional (soportes, placas, caras planas). En total se asignaron 44 contactos para nuestro modelo.

Tabla 44-3: Coeficientes de fricción entre materiales de interés

Fricción entre materiales	Valor
Acero - Acero	0,15 - 0,2
Acero – Asbesto moldeado	0,2 - 0,5

Fuente:(8000vueltas.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.1.4 Cargas aplicadas

Las cargas que actúan para el análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 45-3: Cargas asignadas para el análisis estructural de la alimentación

Carga	Valor
Presión interna	0,3681 MPa
Precarga de los pernos	10431 N

Condición de temperatura	550 °C
--------------------------	--------

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.1.5 Soportes

Se aplica un soporte fijo al cuello cilíndrico para analizar el estado más crítico de los pernos.

El soporte y las cargas aplicadas se asignaron como se muestra en la figura 63-3

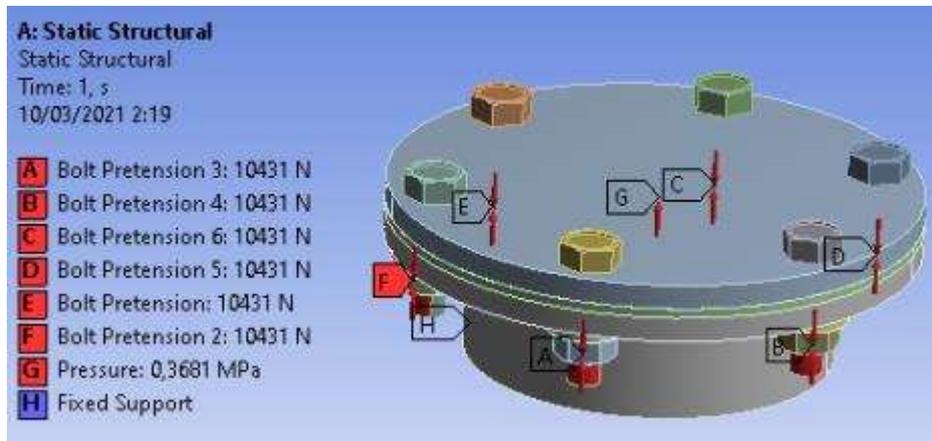


Figura 55-3. Parámetros estructurales del conjunto de alimentación de plásticos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.1.6 Mallado

Se realizará el análisis con el evaluador Element Quality, el cual define que los resultados óptimos, son con calidades de malla igual o cercanas a 1. Por lo contrario, valores cercanos a cero, no brinda confiabilidad en sus resultados.

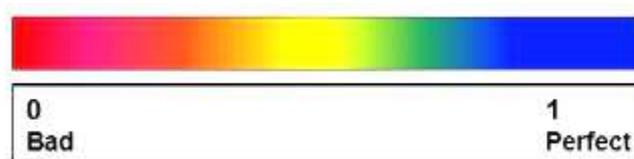


Figura 56-3. Paleta de colores Element Quality

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 67-3 se muestra el mallado de la geometría.

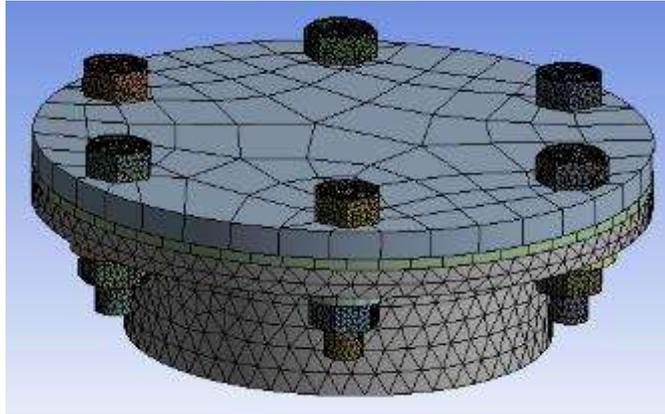


Figura 57-3. Mallado del conjunto de alimentación de plásticos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.2 Post proceso

Se obtuvieron resultados de los parámetros de interés mediante el análisis de la malla a calidades distintas.

3.10.4.2.1 Análisis con Sizing 1,5 mm “Pernos y tuercas”

La calidad de malla en este análisis es de 0,80244.

Esfuerzo de Von Mises

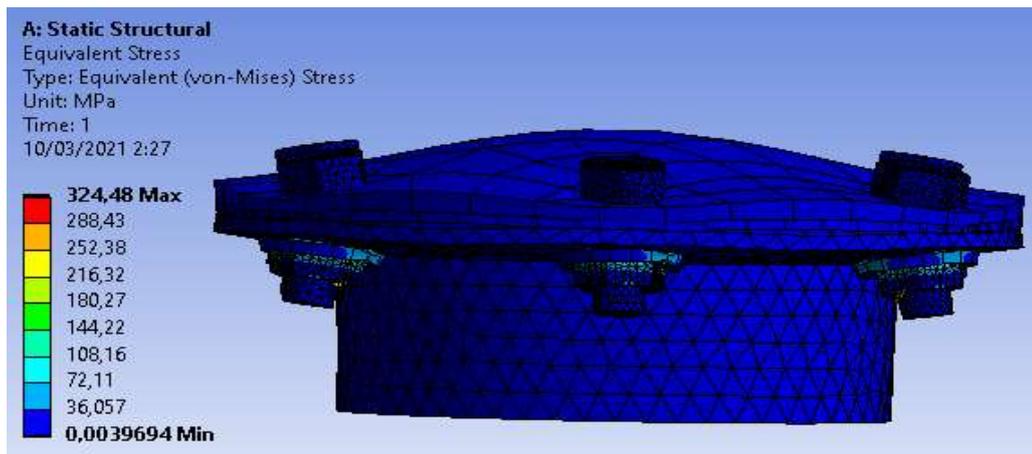


Figura 58-3. Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 1,5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

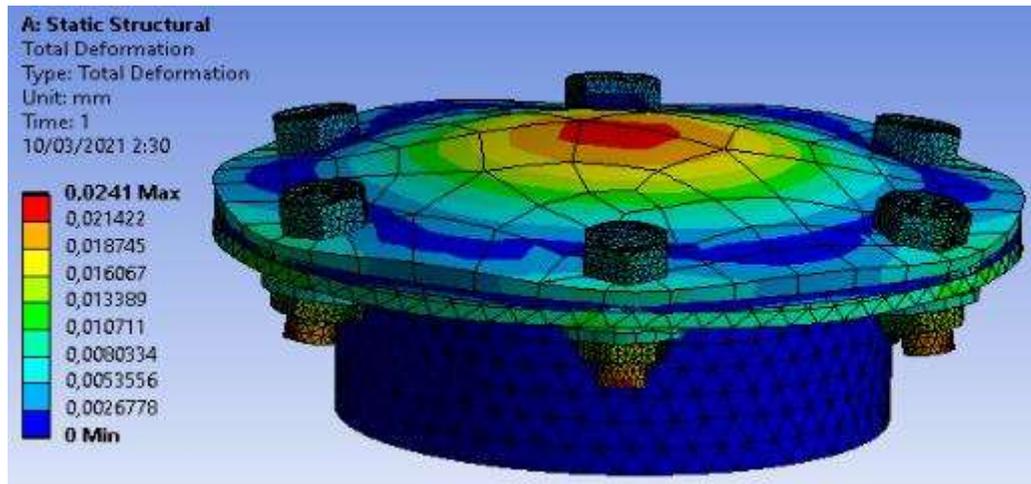


Figura 59-3. Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 1,5 mm”
 Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

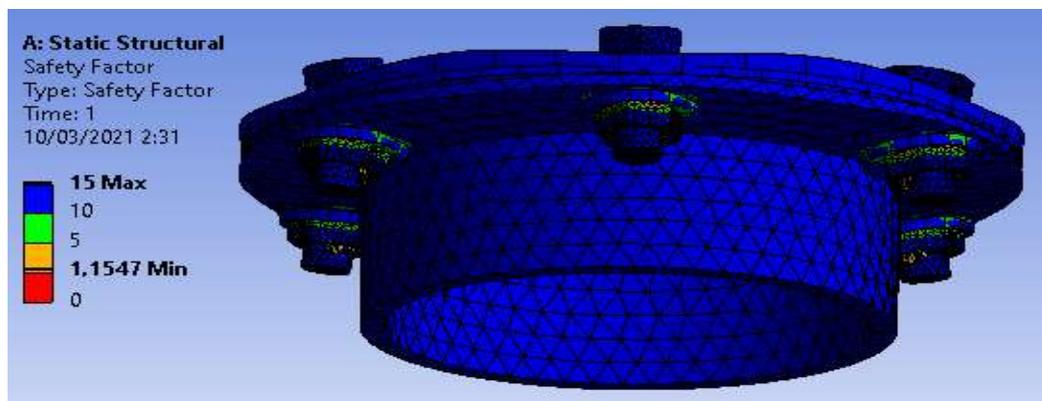


Figura 60-3. Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 1,5 mm”
 Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.2.2 Análisis con Sizing 8 mm “Tapa plana”

La calidad de malla en este análisis es de 0,80305.

Esfuerzo de Von Mises

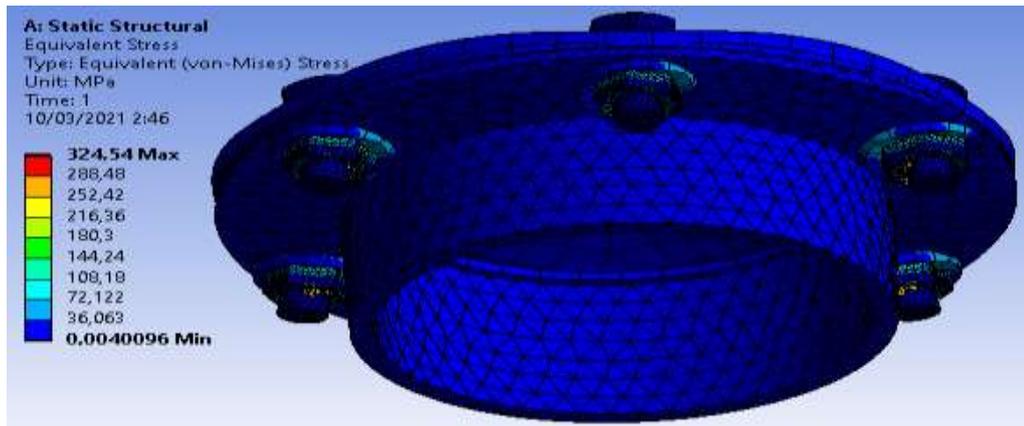


Figura 61-3. Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 8 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

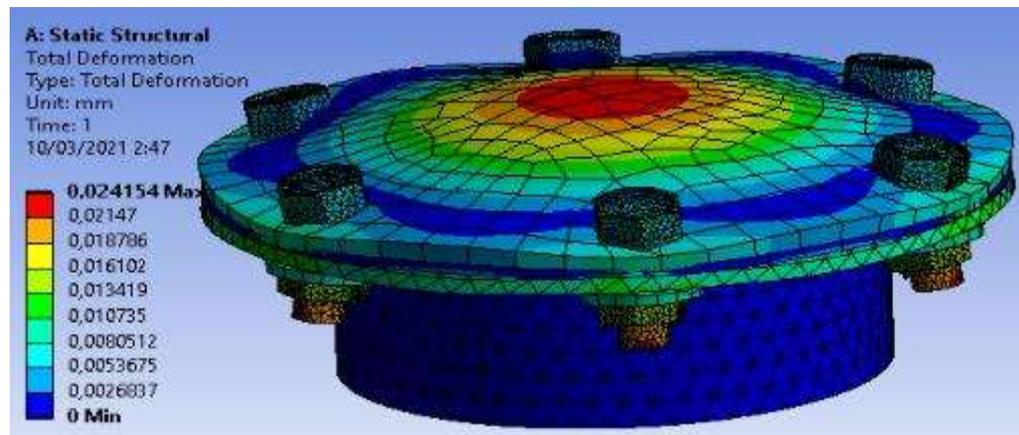


Figura 62-3. Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 8 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

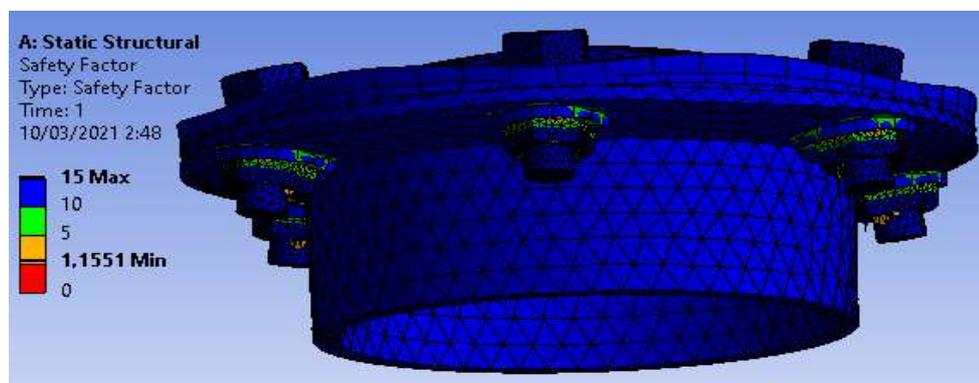


Figura 63-3. Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 8 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.10.4.2.3 Análisis con Sizing 5 mm “Empaque”

La calidad de malla en este análisis es de 0,80311.

Esfuerzo de Von Mises

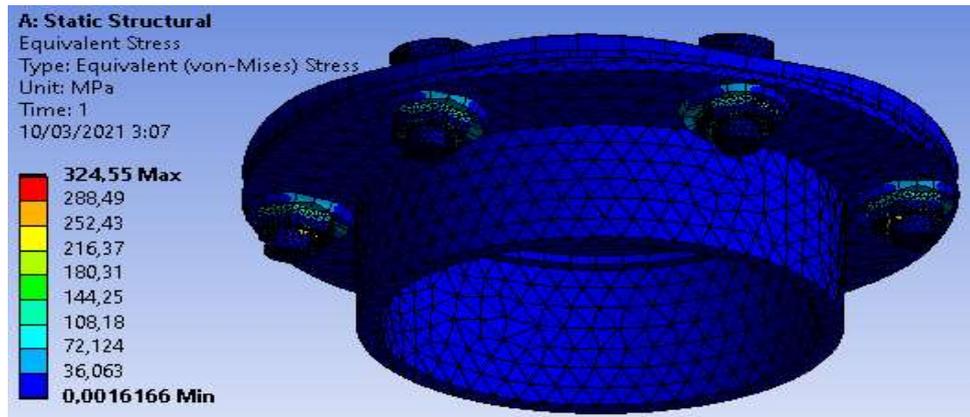


Figura 64-3. Resultados de esfuerzos en la alimentación “Sizing 5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Deformación total

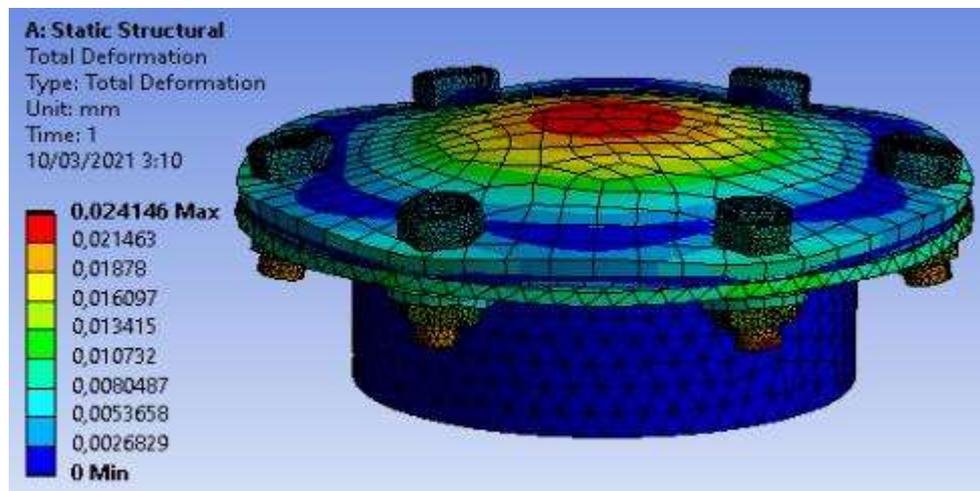


Figura 65-3. Resultados deformación total en la alimentación “Sizing 5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Factor de seguridad

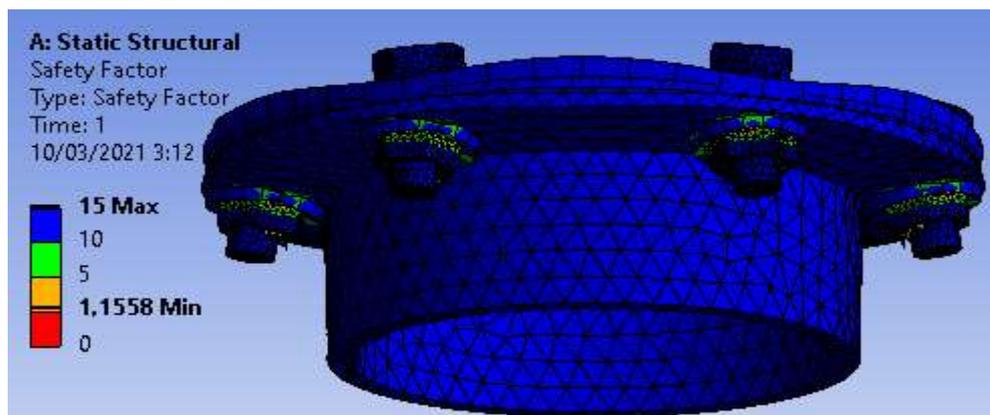


Figura 66-3. Resultados factor de seguridad en la alimentación “Sizing 5 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11 Análisis de la velocidad de flujo en la tubería.

Para este análisis se va a considerar las tuberías por donde transporte el gas (Dióxido de Carbono).

3.11.1 Pre-proceso

Se definirán parámetros de configuración como son: geometría, mallado condiciones iniciales (temperatura y velocidad de flujo).

3.11.1.1 Geometría

El modelo fue generado en Space Claim de ANSYS Workbench., como se muestra en la siguiente figura:



Figura 67-3. Geometría del fluido CO2

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.1.1.1 Mallado

Se realizará el análisis con el evaluador Skewness, que es muy utilizado y recomendado para análisis CFD, el cual define que los resultados óptimos, son con calidades de malla más cercanas a cero. Por lo contrario, valores cercanos a 1, no brinda confiabilidad en sus resultados.

Tabla 46-3: Valores de calidad de malla para Skewness

Valor Skewness	Calidad de malla
0 – 0,25	Excelente

0,25 – 0,5	Bueno
0,5 – 0,8	Aceptable
0,8 - 0,95	Pobre
0,95 - 1	Deficiente

Fuente:(Carrera Galárraga, 2019)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 46-3 se muestra el mallado de la geometría.

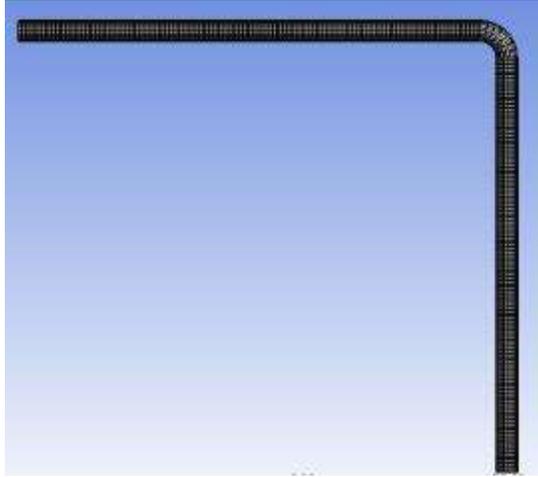


Figura 68-3. Mallado de la tubería

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.1.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales para el análisis del flujo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 47-3: Condiciones iniciales para análisis de velocidad del flujo

Carga	Valor
Temperatura de entrada	400 °C
Velocidad de entrada	0,2 m/s

Fuente:(Carrera Galárraga, 2019)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.2 Post proceso

Se obtuvieron resultados del parámetro de interés mediante el análisis de la malla a calidades distintas.

3.11.2.1 Análisis de flujo “Element Size -Por Defecto”

La calidad de malla se muestra en este análisis es 0.22

Velocidad del fluido

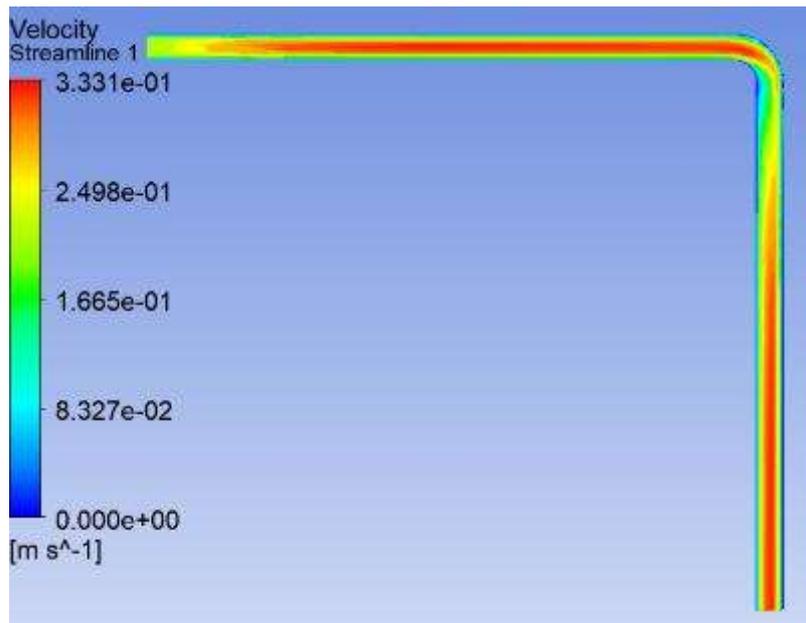


Figura 69-3. Resultados de velocidades del fluido “Element Size-Por Defecto

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.2.2 Análisis de flujo “Element Size 1.5 mm”

La calidad de malla se en este análisis es de 0,1686

Velocidad del fluido

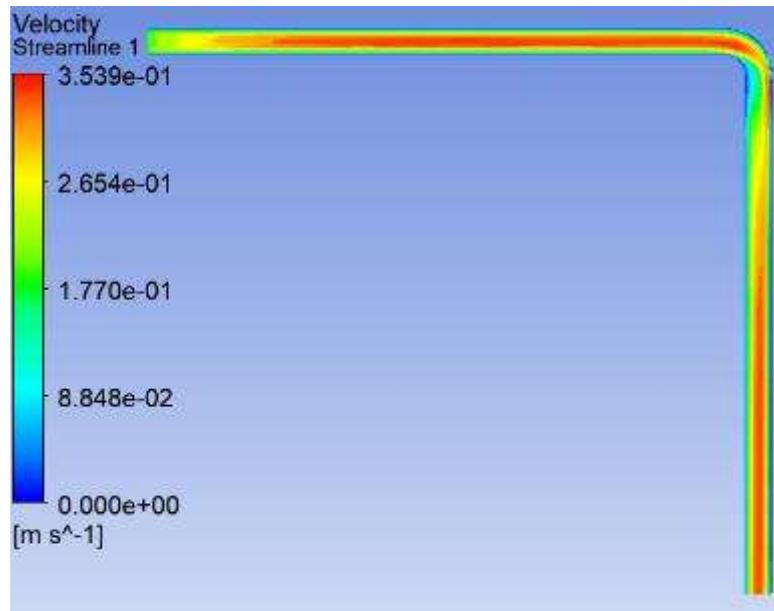


Figura 70-3. Resultados de velocidades del fluido “Element Size 1,5 mm

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.2.3 Análisis de flujo “Element Size 1 mm”

La calidad de malla en este análisis es 0,11141

Velocidad del fluido

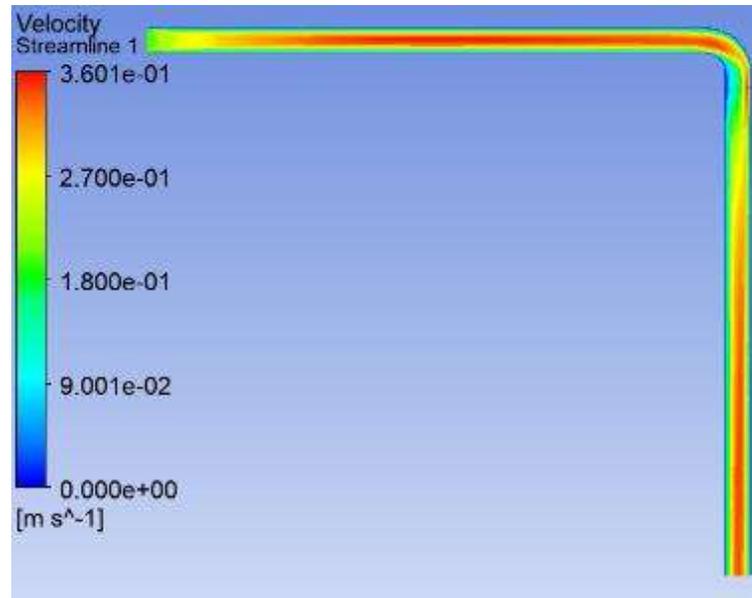


Figura 71-3. Resultados de velocidades del fluido “Element Size 1 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.11.2.4 Análisis de flujo “Element Size 0,75 mm”

La calidad de malla en este análisis es 9.778e-2

Velocidad del fluido

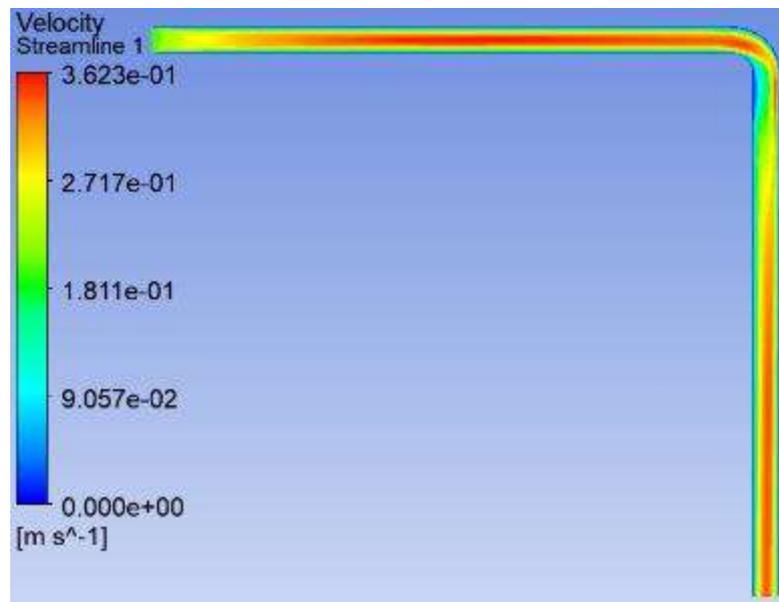


Figura 72-3. Resultados de velocidades del fluido “Element Size 0,75 mm”

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.12 Análisis de la estructura de soporte mediante SAP 2000

Para el fácil acceso y manipulación del equipo se hace necesario el diseño de una estructura que permita soportar todo el peso del reactor y sus componentes, para ello se realiza el diseño mediante el uso del software Solid Works y posteriormente se analiza su comportamiento estructural con la ayuda del software SAP 2000. Los parámetros para considerar se muestran a continuación.

3.12.1 Pre-proceso

Los parámetros de configuración necesarios para el análisis son: Material, Geometría, Cargas de diseño.

3.12.1.1 Geometría.

La geometría de la estructura en la cual se especifican sus dimensiones y su posible configuración se realiza mediante el software Solid Works, como se muestra a continuación.

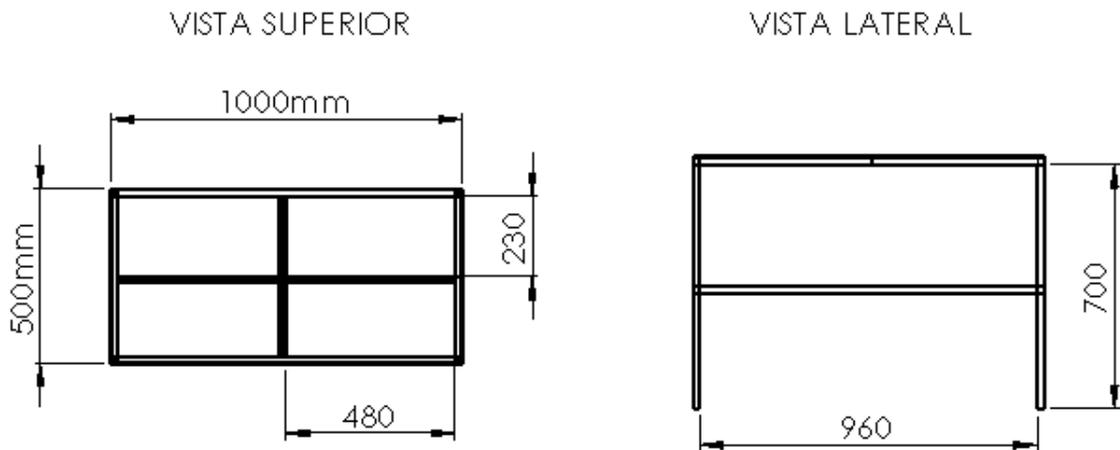


Figura 73-3. Dimensiones generales para estructura de soporte

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.12.1.2 Material

Para el diseño de la estructura de soporte se hace necesario la asignación de perfiles estructurales, cuyas características se muestran a continuación.

Tabla 48-3: Especificaciones de los perfiles estructurales

Especificaciones	Material	Dimensiones (mm)
------------------	----------	------------------

Tubo estructural cuadrado	ASTM A 36	20X20X2
Tee estructural	ASTM A 36	20X20x2
Ángulo Estructural L	ASTM A 36	20x2
Plancha de acero	ASTM A 36	1000x1000

Fuente: Dipac.2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

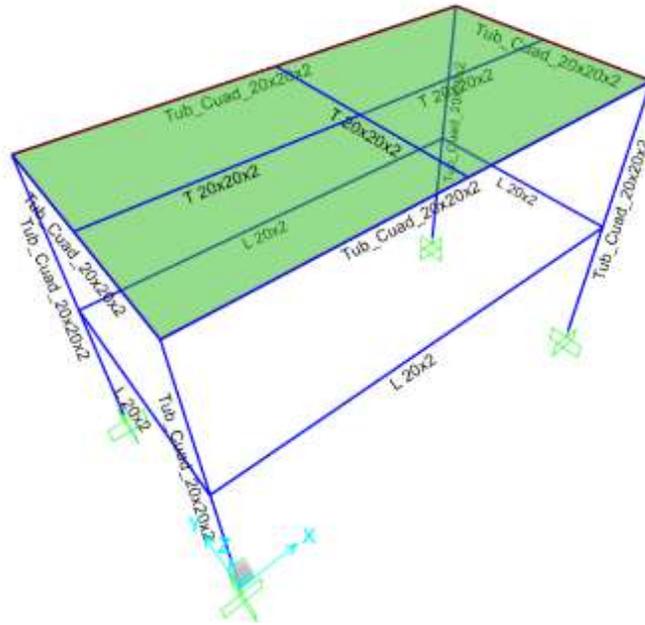


Figura 74-3. Asignación de perfiles estructurales en SAP 2000

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.12.1.3 Parámetros de diseño

Para el análisis en SAP 2000 se debe considerar las condiciones mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 49-3: Parámetros de diseño para análisis de estructura en SAP

Descripción	Detalle
Patrones de carga	Carga viva y carga muerta
Combinaciones de carga	Comb1= 1.4D
	Comb2= 1.2D + 1.6 L
Normas de Diseño	AISC 360-10
	NEC-SE-CG
Método	LRFD
Tipo de apoyos	Fijos
Puntos de apoyo	1A, 1C, 2A, 2C

Tipo de estructura	OMF
--------------------	-----

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.12.1.4 Cargas de diseño.

Para el análisis del diseño tomamos en consideración la carga muerta, la misma que corresponde al peso propio de la estructura y al peso del equipo; este último se determinó gracias a la memoria de cálculo de Solid Works aplicado al ensamble y asignado las propiedades de materiales correspondientes a cada pieza como se muestra a continuación.

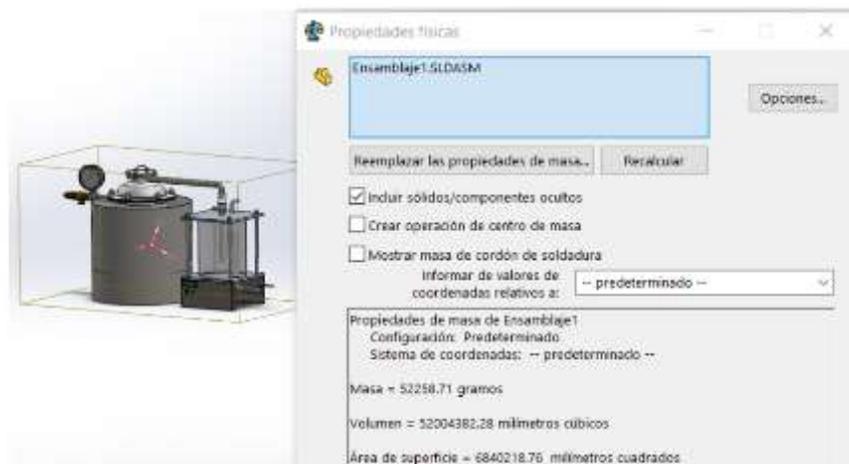


Figura 75-3. Cálculo de peso del equipo mediante Solid Works

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El valor otorgado como masa por el software, es el peso propio del equipo, además a esta se le considera el peso de la materia prima a ser degradada, y el peso de agua contenida en el condensador, por consiguiente:

$$\text{Carga de diseño} = \text{Peso del equipo} + \text{peso de materia prima} + \text{peso de agua en el cond.}$$

$$\text{Carga de diseño} = (52,25 + 1 + 2)\text{kg}$$

$$\text{Carga de diseño} = 55,22 \text{ kg}$$

Para la asignación de la carga de diseño antes determinada, en el software SAP 2000 recurrimos al análisis de carga distribuida en una superficie por medio del concepto de ancho tributario, lo que permite que dicha carga se distribuya en la estructura.

La distribución de carga en la estructura en SAP se muestra de la siguiente manera.

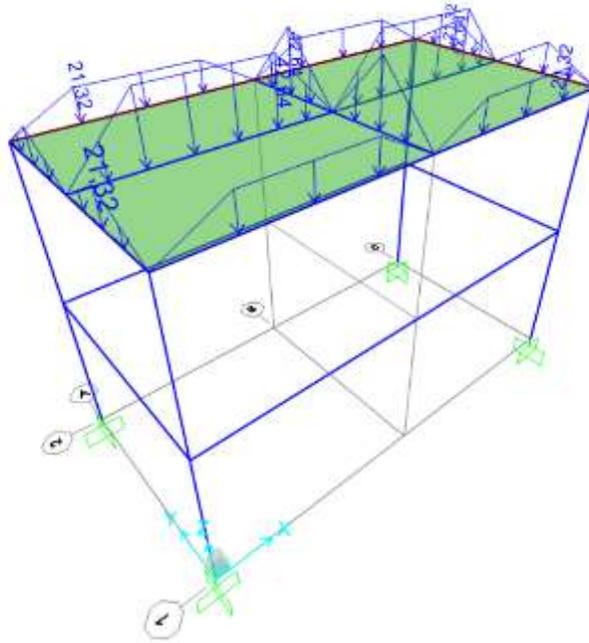


Figura 76-3. Asignación de cargas en SAP 2000

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.12.2 *Post proceso*

Para analizar la resistencia mecánica que tiene la estructura, y verificar que ésta soporte las cargas generadas por el equipo, se hace necesario simular en SAP2000 los siguientes parámetros:

-Razón demanda capacidad:

Se entiende por demanda las cargas que inciden sobre la estructura y capacidad es la resistencia asociada a compresión, tracción, corte, etc.; que soportan los elementos.

Permite visualizar que tan cerca está un determinado elemento de la estructura a exceder su capacidad, en el caso de que $D/C > 1$, se interpreta que la estructura está sometida a cargas mayores de las que podría soportar.

-Deformación máxima

Indica que tanto puede llegar a deformarse un determinado elemento por efecto de las cargas, y que dicha deformación esté dentro del rango elástico, caso contrario la estructura se deformaría de manera permanente.

-Esfuerzos

En la estructura a ser analizada se generan esfuerzos de compresión y tracción.

Los resultados obtenidos, de mencionados parámetros se analizan de manera detallada en el capítulo IV.

3.13 Selección de componentes

En el diseño del prototipo de reactor intervienen componentes que permiten el correcto funcionamiento, a continuación, se detalla cada componente y sus respectivas especificaciones.

3.13.1 Resistencia eléctrica

El calor necesario de aporte, para que el proceso de pirólisis se lleve a cabo, se lo consigue gracias a una resistencia térmica de banda cerámica, alcanza temperaturas máximas de 800°C, y esta puede ser regulada en función de la potencia. Envuelve completamente el recipiente a presión o cilindro que contiene los residuos plásticos.

Del catálogo BMS Resistencias Calefactoras, se selecciona el modelo CBB205 254, cuyas características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 50-3: Especificaciones técnicas – Resistencia eléctrica tipo banda cerámica

	<p>Modelo: CBB 205 254</p> <p>Marca: BMS (Resistencia Calefactora)</p>
ESPECIFICACIONES	
Voltaje	110V
Potencia	8,6 KW
Espesor del aislante cerámico	2 in
Temperatura máxima de trabajo	800°C
Diámetro Interno	205 mm
Ancho	254 mm
Salida de trenza	50mm
Densidad Superficial	6W/cm ²
Control de temperatura	Termostato

Fuente: (BMS-Resistencias Calefactoras. 2019)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.2 Arduino

Para controlar el rango de temperatura el cual debe oscilar entre 450 y 500 °C se hace necesario una placa Arduino, cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Tabla 51-3: Especificaciones técnicas-Controlador Arduino

	<p>Modelo: UNO R3</p> <p>Marca: Arduino</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	
<p>Microcontrolador</p>	<p>Atmega328P DIP28 desmontable</p>
<p>Entradas Analógicas</p>	<p>6</p>
<p>Entradas digitales</p>	<p>14</p>
<p>Alimentación</p>	<p>7-12 VCD</p>
<p>Regulador incorporado</p>	<p>AMS1117-5.0 de 5V / 1A</p>
<p>Memoria</p>	<p>ATmega328 tiene 32 KB</p>

Fuente: (proyectoarduino.com)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.3 Pantalla Display LCD 20x4

Permite visualizar los valores de temperatura tomados por el termopar, dichos valores son necesarios para controlar y verificar los rangos de temperatura de funcionamiento, para que se lleve a cabo el proceso de pirólisis.

Tabla 52-3: Especificaciones técnicas-Pantalla Display LCD 20x4

	<p>Modelo: Lcd 20x4</p> <p>Marca: LCD-ARDUINO</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	
<p>Dimensiones de pantalla</p>	<p>20x4</p>
<p>Display</p>	<p>Fondo Azul Letras Blancas</p>
<p>Compatibles</p>	<p>Controlador Hitachi HD44780</p>

Para Microcontroladores	PIC-AVR-ARDUINO
Dimensiones	98x60x12 (LxWxH)
Peso	80g

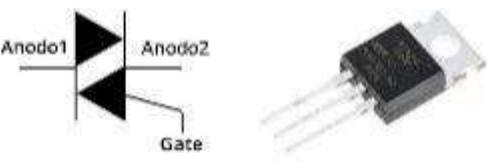
Fuente: Tecmikro.com, 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.4 Triac

La resistencia calefactora funciona con alimentación de corriente alterna, por ende, se requiere de un triac que me permita conmutar o permitir el paso o no de la corriente.

Tabla 53-3: Especificaciones técnicas-Triac

	<p>Modelo: BTA16-600B 16 A</p> <p>Marca: Genérico</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	
<p>Voltajes conmutables</p>	<p>600V to 220V</p>
<p>Amperaje</p>	<p>8A</p>

Fuente: mercadolibre.com.ec

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.5 Termopar tipo K

Para monitoreo y control de temperatura se hace necesario el uso de un termopar tipo K, mencionado instrumento, puede ser programado con la ayuda de la placa Arduino, debido a que produce una salida de tensión la cual es posible relacionarla con la temperatura que está siendo medida, se seleccionó un termopar del catálogo JMIndustrial, cuyas especificaciones se muestran a continuación.

Tabla 54-3: Especificaciones técnicas- Termopar tipo K

	<p>Modelo: JMI-102-723-54-1</p> <p>Marca: JMI</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	

Tipo de sensor	Termopar k-PT100 clase "B"
Rango de temperaturas	Hasta 850 °C
Número de elementos	2 hilos (Termopar y RTD)
Diámetro del tubing	1/4
Material	Acero Inoxidable 304
Aislante de la extensión	Fibra de vidrio con malla (400°C)
Terminales	Espada

Fuente: JMIndustrias,2019

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.6 Optoacoplador

Para detectar el pulso de disparo, es decir el punto en el cual se requiere establecer la temperatura, se hace necesario el uso de un optoacoplador, el mismo que activa la puerta de un triac, de esta manera se controla la cantidad de energía aplicada al calentador.

Tabla 55-3: Especificaciones técnicas-Optoacoplador

	Modelo: Optoacoplador Sharp Mejor Marca: Genérico
ESPECIFICACIONES	
Voltaje Alto de aislamiento	500Vrms
Tensión de aislamiento	5KV
Corriente de entrada	20mA
Encapsulado	DIP

Fuente: mercadolibre.com.ec

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.7 Manómetro 200 psi

Para medir la presión a la cual se encuentran los gases internos generados por el proceso de pirólisis, se hace uso de un manómetro de uso general, del catálogo Swagelok se selecciona un manómetro de acero inoxidable para uso general, Modelo C, las características técnicas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 56-3: Especificaciones técnicas- Manómetro

	Modelo: C PGI-100C-PG200B-AP2-A Marca: Swagelok
ESPECIFICACIONES	
Rango de las esferas	De vacío a 0 psi hasta vacío a 200 psi
Precisión	100 mm (4 pulg): $\pm 1,0$ % de span (ASME B40.100, Grado 1A, EN 837-1 Clase 1,0, JIS B7505 Clase 1,0)
Configuraciones	100 mm (4 pulg): montaje posterior inferior e inferior
Conexiones finales	1/4 y 1/2 pulg NPT macho
Protección en exteriores	Resistente a la intemperie (NEMA 4X/IP65)
Aislante de la extensión	Fibra de vidrio con malla (400°C)
Fluido de llenado (si se pide)	Glicerina, glicerina para baja temperatura o silicona

Fuente: ASGCROFT,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.8 Válvula de alivio

Ayuda al control de la presión interna del reactor, en caso de que esta tienda a exceder el límite de diseño establecido, evitando posibles accidentes, se selecciona una válvula HPRV series, fabricada por Generant.co sus especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Tabla 57-3: Especificaciones técnicas-Válvula de alivio

	Modelo: HPREVM Series Marca: Generant
ESPECIFICACIONES	
Rango de presiones de calibración	De 10 a 2400 Psi
Fluido	Para gas

Tolerancia	+/- 5% en incremento de presión
Sellado	Elastomer seals 90%-95%
Inline valves	Serie HPVR
Materiales	Brass ss, ASTM A

Fuente: Generant.com ,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.9 Tubería de acero inoxidable

Para el transporte de los gases de condensación se hace necesario el uso de una tubería de acero inoxidable de ½” cédula 40, cuyas especificaciones técnicas son las siguientes.

Especificaciones técnicas de la tubería.

Tabla 58-3: Especificaciones técnicas-Tubería de acero inoxidable

	Modelo: Cedula 40 Marca: Tuberia Acero Inoxidable
ESPECIFICACIONES	
Cédula	40
Diámetro Nominal	½”
Grosor de pared	2,77 mm
Presión de trabajo	4610 psi
Peso aproximado	1,27 kg/m
Acero Inoxidable	ASTM A269. A249. A 304

Fuente: DIPAC ,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.10 Llave de paso

Instrumento que nos permite extraer el aceite o condensado producto del proceso de pirólisis, las especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Tabla 59-3: Especificaciones técnicas-Llave de paso

	Modelo: Válvula de cierre rápido
	Marca: Wurth
ESPECIFICACIONES	
Diámetro de rosca entrada	1/2''
Diámetro de rosca a la salida	3/4''
Temperatura máxima de trabajo	180°C
Presión de trabajo	25kg/cm ²

Fuente: Wurth.es ,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.11 Planchas de acero Inoxidable 304

Para la construcción de la carcasa del recipiente a presión, así como también la construcción de la mesa de soporte del equipo se hace necesario planchas de acero laminado en caliente, cuyas características se muestran a continuación.

Tabla 60-3: Especificaciones técnicas – Planchas de acero inoxidable

	Modelo: Planchas laminadas en caliente
	Marca: DIPAC-Acero Inoxidable
ESPECIFICACIONES	
Norma de fabricación	NTE INEN 115
Calidad	ASTM A 304
Espesores	De 0,4 mm hasta 15mm
Acabados	2B-N4-N1
Dimensiones estándar	1220x2440 mm
Esfuerzo Máximo A304	550 MPa
Fluencia para A304	250 MPa

Fuente: Wurth.es ,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.12 Tubo estructural cuadrado

Se requiere de tubo estructural cuadrado para la construcción de la mesa de soporte del equipo; las especificaciones se muestran a continuación.

	<p>Modelo: Tubo estructural cuadrado negro</p> <p>Marca: DIPAC-Tubo Estructural</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	
<p>Norma de fabricación</p>	<p>NTE INEN 2415</p>
<p>Calidad</p>	<p>ASTM A 36-SAE J 403 1008</p>
<p>Presentación</p>	<p>Acero Negro y Galvanizado</p>
<p>Espesores</p>	<p>1,20mm a 5 mm</p>
<p>Largos estándar</p>	<p>6m</p>
<p>Dimensiones de perfil</p>	<p>De 20 a 100 mm</p>
<p>Esfuerzo Máximo A36</p>	<p>550 MPa</p>

Fuente: Wurth.es ,2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.13 Manta de fibra cerámica

Para garantizar una temperatura segura entre 40 a 55°C, según el reglamento de permiso de trabajo, se debe colocar un aislante térmico, el espesor para garantizar mencionada temperatura fue calculado en apartado de análisis térmico. Se seleccionó un aislante de manta de fibra de cerámica, cuyas especificaciones son.

Tabla 61-3: Especificaciones técnicas- Manta de fibra de cerámica

	<p>Modelo: 1450 HZ Manta de Fibra de Cerámica</p> <p>Marca: CCEWOOL</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	

Temperatura de servicio	Hasta 1350 °C
Densidad	64-100 kg/m ³
Cambio Permanente en calor	1350°Cx24<-3
Espesor	2''
Conductividad térmica	0,13 W/m°C
Estabilidad Química	Excelente

Fuente: Ccewool_InsulationFiber, 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.14 Acero SA-516 Gr 70

Para la construcción del recipiente a presión dentro del cual se realiza el proceso de pirólisis se hace necesario de Acero SA-516 Gr 7, cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Tabla 62-3: Especificaciones técnicas- Acero SA-516 Gr 70

		<p>Modelo: T-Carbon steel plate</p> <p>Marca: ZLYS</p>
ESPECIFICACIONES		
Densidad	8030 kg/m ³	
Módulo de Young	190 GPa	
Dimensiones	1000x2200	
Espesor	0,2 – 200 mm	
Certificado	ISO 9001:2008/SGS/BV	
Resistencia a Tensión	260 MPa	

Fuente: AISI-ASTM-Steel-plates, 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.15 Recipiente a presión

El reactor en el cual se lleva a cabo el proceso de pirólisis fue diseñado como un recipiente a presión, según la norma ASME SECCIÓN VIII DIV 1, que se fabrica con un proceso de rolado y prensado respectivamente; para luego ser unidas con un riguroso proceso de soldadura las especificaciones técnicas del recipiente se muestran a continuación.

Tabla 63-3: Especificaciones técnicas- Recipiente a presión

	<p>Diseño realizado por:</p> <p>Figueroa, J.; Chela, W. 2020</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>	
<p>Norma de fabricación</p>	<p>ASME VIII DIV I</p>
<p>Altura</p>	<p>431mm</p>
<p>Diámetro Interno</p>	<p>20 mm</p>
<p>Material</p>	<p>Acero SA-516 Gr 70</p>
<p>Conductividad térmica</p>	<p>58 W/m°C</p>
<p>Presión máxima de trabajo</p>	<p>0,503 MPa</p>
<p>Capacidad</p>	<p>1kg</p>

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.16 Modelado del sistema mecánico

Una vez determinados los componentes que se requieren para la construcción del reactor de pirólisis térmica se modela en el software Solid Works, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 77-3. Modelado de Reactor en SolidWorks

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.13.17 Modelado del sistema eléctrico

Para llevar a cabo el proceso de calentamiento, se requiere establecer un esquema eléctrico que permita el correcto control y monitoreo de la temperatura, con los componentes ya seleccionados, el esquema eléctrico diseñado es el siguiente:

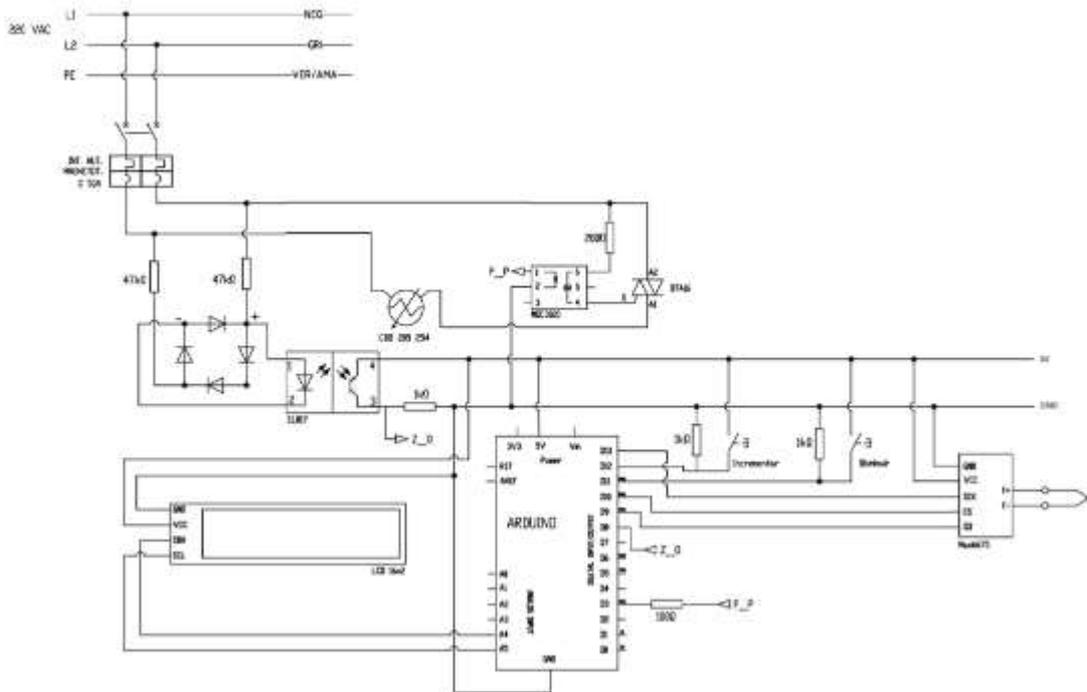
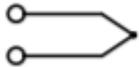
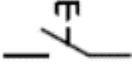
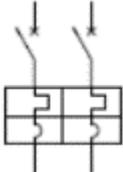


Figura 78-3. Esquema de la Instalación eléctrica

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 64-3: Representación de elementos eléctricos

SIMBOLO	DENOMINACIÓN
	Termocupla
	Resistencia
	Resistencia Calefactora

	Triac
	Pulsador
	Interruptor magnético

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.14 ANÁLISIS DE COSTOS

Para poder estimar el costo de producción del prototipo de reactor de pirólisis ya diseñado, se hace necesario acudir a conceptos que permitan clasificar los costos, como se indica a continuación.

El recipiente a presión debe ser construido según las especificaciones de diseño establecidas, por lo que para estimar su costo se realiza un análisis detallado enfocado solo ha mencionado recipiente, como se muestra a continuación.

3.14.1 Costo del recipiente a presión.

Para el proceso de construcción del recipiente a presión con acero ASTM SA 516 Gr 70, se toma como referencia a (Castro Mosquera, 2015), en donde se identifica los procesos y costos involucrados. Para estimar el costo inicial se debe tomar en consideración que el peso del recipiente a presión es de 13kg.

Tabla 65-3: Costo Neto del recipiente a presión

Insumos	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Plancha (1000x2200x4) mm	51	102
Costo Mano de Obra (\$/kg)	2,50	32,5
Consumibles (\$/kg)	1,25	16,25
Pintura	50.75	50,75
	TOTAL	201,50

Fuente: (Castro Mosquera, 2015)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Dentro de los costos de consumibles se considera el costo de equipos, electrodos, energía

eléctrica; para lo cual se establece el costo por hora del equipo y este es multiplicado por el rendimiento diario que presenta en kg, de esta manera se estima el costo por kg. (Castro Mosquera, 2015, p. 85)

3.14.2 Materia prima directa:

Costos de aquellos materiales que son indispensables y parte directa para la construcción y funcionamiento del equipo, dicho análisis se divide en dos sistemas, mecánico y eléctrico, los cuales son mostrados en las siguientes tablas.

Tabla 66-3: Costos del sistema mecánico.

Pieza	Cantidad	Descripción	Precio \$ (Cotización)
Recipiente a presión	1	De acero SA 516 Gr 70	201,50
Manta de fibra de cerámica	1	7200x610 (2'' espesor)	105
Tubo estructural Cuadrado	2	20x20x2	21,46
Tubo acero inoxidable 304	1	1/2'' Ced 40	15,63
Plancha de Acero inoxidable 304	1	1220x2440 (2mm espesor)	170
Llave de paso	1	1/2''	8
Válvula de alivio	1	1/2''	48,80
Manómetro	1	1/2''	15
Termopar tipo K	1	Sonda de acero Inoxidable	15
Pernos y Arandelas	6	M14- M10- M8	10
Codo de acero inoxidable	1	1/2''	4,25
Cruz hembra de acero inoxidable	1	1/2''	4,25
Empaque de presión	2	2.3 mm de espesor	15
TOTAL			633,89

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 67-3: Costos del sistema eléctrico

Pieza	Cantidad	Descripción	Precio \$ (Cotización)
Resistencia Eléctrica	1	CBB 205 254	420
Arduino uno	1	R3 Dip Atmega 328	10
Pantalla Display	1	LCD 20x4	9,50
Interruptor	1	Botonera On/Off	5,40
Cable conductor eléctrico	5m	1,5 mm ²	4,20
Puente Rectificador	1	Plano 50 un. KBL406 4A600V	11,39
Optoacoplador	1	50pcs Pc817 El817c ltv817 pc817-1 Dip-4	1,51
Micro Switch Pulsador	2	100pcs, Pulsador 6 * 6 * 5 Mm	1,24
Triac	1	600 V TO-220 5PCS BTA16-600B 16	1,25
TOTAL			464,49

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.14.3 Materia prima indirecta:

Son aquellos materiales e insumos que de manera indirecta intervienen en el proceso de construcción del equipo pero que forman parte de este, en la tabla 60-3 se muestra los costos estimados, debido a que el presente trabajo no contempla construcción.

Tabla 68-3: Estimación de materia prima indirecta

Pieza	Cantidad	Observación	Precio \$ (Cotización)
Discos de corte para acero	5	ABREK 4 ½	5,50
Disco de pulido de acero	1	Bases O Disco con Velcro	8
Brocas para Acero	1	Juego de brocas	20
Flexómetro	1	5 m	3,10
Mano de obra Indirecta		Para procesos de soldadura y revisión del proyecto	100

Imprevistos			100
TOTAL			236,6

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Tabla 69-3: Costo total

Tipos de sistema	Precio \$ (Cotización)
Sistema Mecánico	633,89
Sistema Eléctrico	464,49
Costos Indirectos	236,60
TOTAL	1334,98

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El costo estimado para la construcción del proyecto es de 1334,98 dólares, en el costo mencionado no se toma en cuenta costos de diseño.

3.15 Comparación de costos de producción

Para determinar qué tan viable es la producción de energía a partir de la recolección y aprovechamiento de los residuos plásticos producidos a partir del PP, PS y PE; se debe analizar la capacidad de competir con los costos de venta de otros tipos de combustibles.

3.15.1 Costo de producción de plastic-oil

Se denominará plastic oil al producto primario generado por el reactor de pirólisis térmica, el mismo que tiene propiedades similares al gas oil, combustibles que en mencionados estados pueden ser usados en calderas, plantas de energía eléctrica, y hornos.

3.15.1.1 Costo del plástico reciclado

Para determinar el costo de producción de un litro de plastic oil se determina el costo de adquisición de residuos plásticos en la ciudad de Riobamba.

Según encuestas realizadas por (Delgado y Kurinthy, 2019) , en Riobamba existen 12 instituciones dedicadas a la adquisición de productos reciclados, y los costos de venta de plástico reciclado son los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 70-3: Precio de plástico reciclado en la ciudad de Riobamba

N°	Recicladora-Centro de Acopio	Precio de venta (\$/kg)	Locación
1	ASO 21 de abril	0,36	Vía a Cerro Negro
2	ASO El Progreso	0,36	García Moreno y Barón de Carondelet
3	El Portal	0,30	Salida a Quito
4	Recicladora Chimborazo	0,55	Av. Circunvalación y Caracas
5	Recicladora las Acacias	0,30	Loja y Circunvalación
6	Recicladora MAX METAL	0,60	Ciudadela Las Acacias
7	Recicladora RH #4	0,60	Av. Cóndor atrás del Mercado Mayorista
8	Recicladora Riobamba	0,30	Vía a Cerro Negro
9	Recicladora Virgen de Guadalupe	0,60	Panamericana Norte y Pasaje
10	RECICLAR	0,32	Av. Circunvalación 7 y Costa Rica
11	NOVACERO	0,36	Sector del Parque Industrial
12	Vulcanizadora Copa	0,40	10 de agosto y calle Madrid

Fuente: (Delgado y Kurinthy, 2019)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Según los datos mostrados en la tabla se obtiene que el costo de adquisición en promedio de un kilogramo de plástico es:

$$m = \frac{0.36 + 0.36 + 0.30 + 0.55 + 0.30 + 0.60 + 0.60 + 0.30 + 0.60 + 0.32 + 0.36 + 0.40}{12}$$

$$\text{Costo del Plástico Reciclado} = 0.42 \text{ \$/kg}$$

3.15.1.2 Costo de la energía eléctrica

Según la regulación establecida por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (Arconel, 2020), en Ecuador el costo de la tarifa plana es de 10,5 ctvs por Kwh.

La resistencia eléctrica seleccionada está diseñada para trabajar a una potencia máxima de 8,6

KW para alcanzar una temperatura máxima de 800°C; sin embargo, dicha potencia puede ser contralada para obtener la temperatura deseada en nuestro caso de 550°C, para la cual la potencia requerida es de 5,9 kW.

El reactor de pirólisis térmica es de tipo batch, es decir que no realiza un proceso continuo de funcionamiento, por lo que el tiempo que la resistencia estará en funcionamiento en cada lote es alrededor media hora. (Anuar Sharuddin et al., 2016, p.17).

Por ende, el costo de la energía eléctrica por cada kilogramo de residuo plástico procesado es de.

$$\begin{aligned}\text{Costo de la energía eléctrica: } & \text{Potencia} * t * \text{Precio/kwh} \\ \text{Costo de la energía eléctrica: } & 5.9\text{kw} * 0.5\text{h} * 10,5\text{ctvs/kwh} \\ \text{Costo de la energía eléctrica: } & 5.9\text{kw} * 0.5\text{h} * 10,5\text{ctvs/kwh} \\ \text{Costo de la energía eléctrica: } & 30.97 \text{ ctvs/kg}\end{aligned}$$

Como se mencionó en el marco teórico, se estima que, por cada kilogramo de residuos plásticos, fabricados a partir de PE, PP, y PS se genera un litro de plastic oil por lo tanto:

$$\begin{aligned}\text{Precio de plastic oil} &= \text{Costo de residuos plásticos} + \text{Costo de energía eléctrica} \\ \text{Precio de plastic oil} &= (30.97 + 42) \text{ ctvs/litro} \\ \text{Precio de plastic oil} &= \$0.7292/\text{litro}\end{aligned}$$

Las propiedades químicas que se obtienen a partir del combustible, producto del proceso de pirólisis de residuos plásticos PP, PE, PS compiten con aquellas que son características del gas oil, por lo que se realiza una comparativa directa en los precios de venta entre estos dos tipos.

Según la Cámara Nacional de Distribuidores de Derivados del Petróleo del Ecuador (Camddepe, 2021), el precio de venta del combustible gas oil está establecido en \$1,358 por galón.

Por consiguiente, el precio del gas oil por cada litro sería:

$$\text{Precio de gas oil} = \frac{\$1,358}{\text{galón}} * \frac{1 \text{ galón}}{3.78 \text{ litros}} = 0,36 \text{ \$/litro}$$

Como se pudo determinar el precio de venta del plastic oil, tomando en cuenta los costos de adquisición de los residuos plásticos, es superior al del gas oil ofertado por el gobierno estatal, por lo que para que el producto sea rentable, se debería establecer leyes gubernamentales y políticas de reciclaje que permitan desprestigiar esos rubros, compitiendo así con el precio del gas oil como se muestra en el siguiente gráfico.

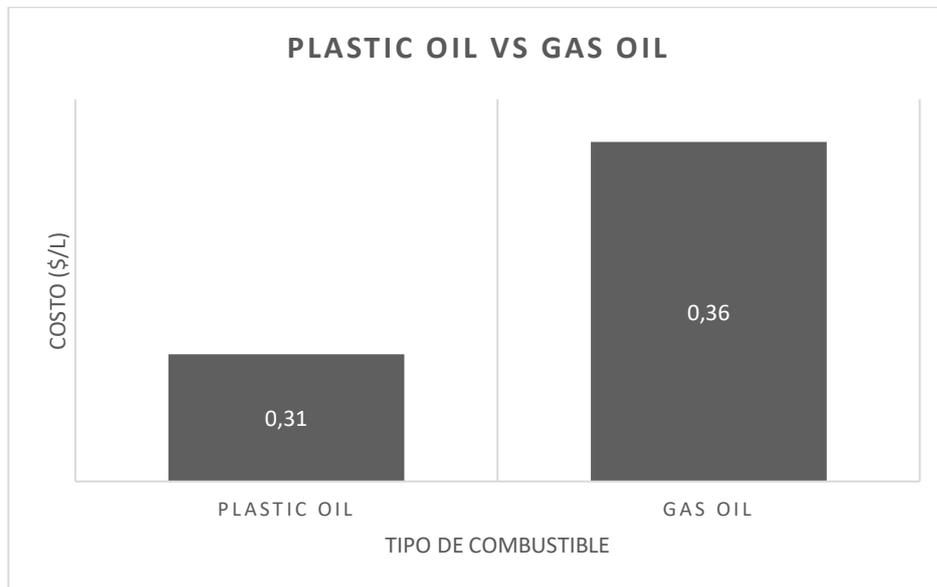


Gráfico 2-3. Comparación-Precios de venta de plastic oil vs Gas oil

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

3.16 Análisis del impacto ambiental

3.16.1 Caracterización del origen de los desechos plásticos a nivel nacional.

La determinación de la cantidad de desechos plásticos generados, se lo obtiene a partir de los datos estadísticos ofrecidos por el Instituto nacional de Estadística y Censo (INEC), referentes a la disposición de residuos sólidos.

En el territorio ecuatoriano se producen alrededor de 12739,01 toneladas por día de desechos sólidos, esto referente al área urbana, de los cuales los porcentajes correspondientes a residuos orgánicos e inorgánicos se muestra en el siguiente gráfico.



Gráfico 3-3. Caracterización de residuos sólidos generales área urbana (%)

Fuente: AME-INEC.2018

El 43,8 % correspondiente a la materia inorgánica representaría alrededor de 5579,68 toneladas. A continuación, se muestra la caracterización de estos residuos.

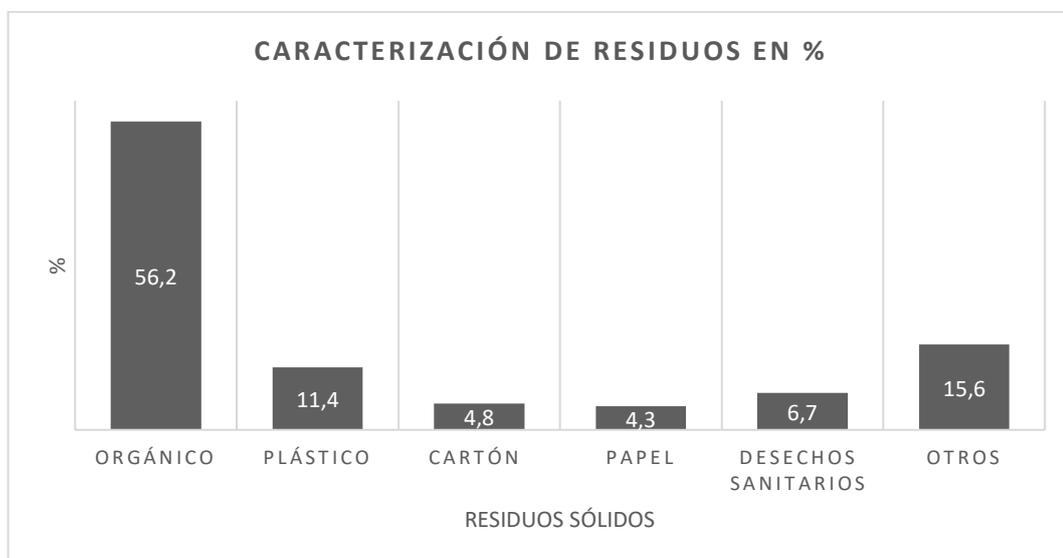


Gráfico 4-3. Caracterización de residuos sólidos específicos en área urbana (%)

Fuente: AME-INEC.2018

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El 11,4 % correspondiente a los residuos plásticos generados en el país, representa alrededor de 1452,24 toneladas, de las cuales se considera que el 25% es reciclado o aprovechado de alguna manera; mientras que el 75% restante termina en rellenos sanitarios mal gestionados, botaderos a cielo abierto, o celdas emergentes. (AME-INEC.2018)

Es decir que alrededor de 1089,18 toneladas de plástico están siendo desechadas diariamente en el Ecuador, sin ningún tratamiento, lo que conlleva a la contaminación de suelos, ríos, lagos, océano. (AME-INEC.2018)

La caracterización de los residuos en función del tipo de plástico se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 71-3: Cantidad de desechos plásticos según sus diferentes tipos

Tipos de polímeros	Porcentajes %	Cantidad ton/día
PET	0,24	261,40
Polipropileno	0,12	130,70
PEHD Soplado	0,24	261,40
PEHD Fundas	0,12	130,70
PELD	0,12	130,70
PS	0,06	65,35
PVC	0,04	43,56
línea Blanca	0,06	65,35
TOTAL	1	1089,18

Fuente: (Salinas Villacis y Vasquez Fuel, 2010)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El prototipo de reactor de pirolisis térmica fue diseñado para la descomposición de residuos plásticos fabricados a partir de PE, PS Y PP, por lo que la cantidad de material aprovechable para la generación de combustible es:

$$\text{Materia Prima Disponible} = (130,70 + 261,40 + 130,70 + 130,70 + 65,35)$$

$$\text{Materia Prima Disponible} = 718,85 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

En Ecuador se tiene aproximadamente 718,85 toneladas de residuos plásticos aprovechables.

3.16.2 Determinación de desechos disponibles en Riobamba

Según el estudio realizado por (Espín Oleas, 2018, p.86); se menciona que en gran parte de los residuos sólidos generados en la ciudad de Riobamba, terminan en el relleno sanitario de basura de Porlón, en donde la composición física de dichos recursos se muestra a continuación.

Tabla 72-3: Composición física de residuos sólidos

Materia Orgánica	66,36%
Plástico	16,37%
Papel y cartón	4,91%
Metales	0,81%
Vidrio	2,15%
Textiles	2,14%
Otros	2,13%
Total	100%

Fuente: (Espín Oleas, 2018)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Según datos estadísticos del (INEC; 2001-2010), la cantidad de desechos sólidos que llegan cada año al relleno sanitario de Porlón es de 691244 toneladas al año; es decir que diariamente se recolectan alrededor de 1839.81 toneladas.

Mencionados residuos están simplemente siendo enterrados sin ningún tipo de tratamiento, por ende, no se aprovecha, y contribuyen a la contaminación del sector.

La cantidad de residuos sólidos en kg por día se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 73-3: Caracterización de residuos sólidos en kg

MATERIAL	CANTIDAD EN Kg
Plástico	21 144
Papel y cartón	1305.97
Metales	1865.67
Vidrio	4353.233
Textiles	5271.393

Fuente: (Espín Oleas, 2018)

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Como muestra la tabla 73-3 el plástico es el residuo sólido con más incidencia, con alrededor de 21144 kg diarios.

Siguiendo la tendencia presentada en la tabla 71-3 se tiene que el 66% del total de residuos plásticos corresponde aquellos fabricados a partir del PP, PE y PS; por lo que en el relleno sanitario de Porlón se tendrían 13955.04 kg de materia prima disponible.

En base a los datos analizados en el presente trabajo se tiene que por cada kg de residuo plástico se genera aproximadamente un litro de combustible aprovechable (Anuar Sharuddin et al., 2016); por ende con el tratamiento de los desechos aprovechables, encontrados en el relleno sanitario de Porlón, provenientes de la ciudad de Riobamba se puede obtener alrededor de 13 mil litros.

La capacidad del prototipo del reactor es de 1 kg, es decir se lo consideraría de uso doméstico. Según datos del INEC en Riobamba existen 264048 de habitantes por lo que la generación de residuos plásticos aprovechables per cápita es de:

$$\text{Materia prima Disponible Per Cápita} = \frac{13955.04 \text{ kg}}{264048}$$

$$\text{Materia prima Disponible Per Cápita} = 0,0528 \text{ kg}$$

Número de personas a las que cada reactor ayudaría a descomponer y aprovechar los residuos plásticos en Riobamba.

$$\text{N}^\circ \text{ Personas} = \frac{(1 \text{ persona} * 1 \text{ kg})}{0.0528 \text{ kg}} = 18.92 \text{ personas}$$

Cada prototipo ayudaría aproximadamente a 19 personas a eliminar sus desechos plásticos diarios, en caso de que el reactor trabajara una vez al día; sin embargo, el equipo está en condiciones de procesar 4 lotes de residuos plásticos al día, es decir 4 kg diarios.

En consecuencia, el número total de personas que podrían eliminar sus residuos plásticos generados diariamente es de 76, producirían combustible aprovechable y ayudarían inmensamente a evitar la contaminación de fuertes hidrográficas, suelos, ríos, y los océanos que son los más afectados.

Cabe mencionar que el diseño de prototipo presentado en este trabajo, se lo considera para una escala de laboratorio, con el cual se podría caracterizar los compuestos derivados del proceso de pirólisis; sin embargo, para tratar la cantidad de desechos plásticos aprovechables estimados en Riobamba, se debería diseñar una planta de manera industrial que permita aprovechar toda esa cantidad de residuos.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados totales del sistema térmico

En la tabla 1-4 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos a distintas calidades de mallas, para realizar un análisis de convergencia de elementos finitos.

Tabla 1-4: Resumen de resultados “Análisis térmico”

N°	Mallado	N° de nodos	T ext recipiente (°C)	T ext Inoxidable (°C)
1	Por defecto	929	554,86	43,429
2	Sizing 4mm	1921	553,84	43,428
3	Sizing 2mm	3558	553,67	43,428

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se dibuja los gráficos del número de nodos vs temperatura.

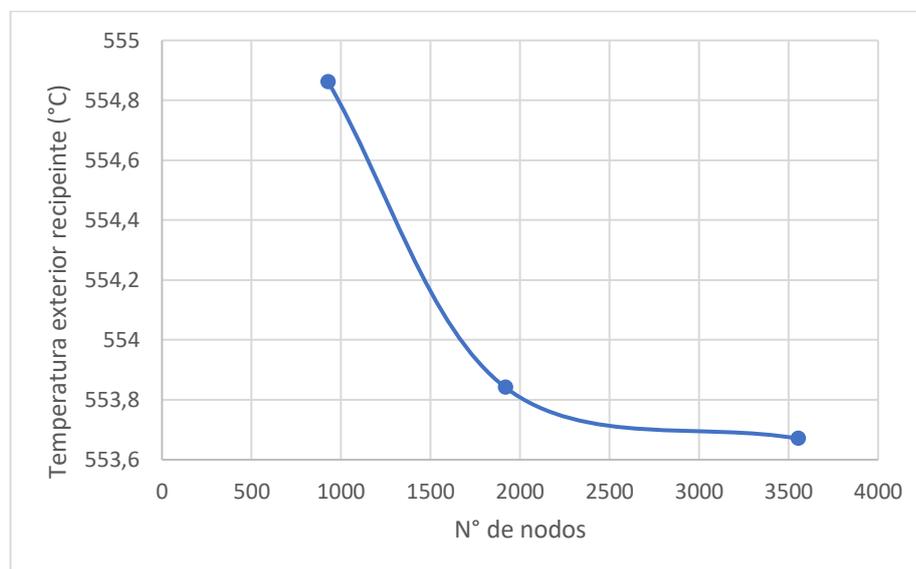


Gráfico 1-4. : Temperatura exterior del recipiente vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 1-4, se aprecia la temperatura exterior del recipiente a presión vs el número de nodos generados por la calidad de malla. En base a los resultados obtenidos de la simulación y al análisis de convergencia, la temperatura exterior del recipiente se encuentra en un rango de 553,67 a 553,84 °C, donde se observó la estabilización rápida de los resultados debido a la utilización de un análisis bidimensional, el cual nos garantiza mejor calidad de mallado y geometrías más fáciles de analizar. Como se puede apreciar la variación es mínima de apenas 0,17 °C.

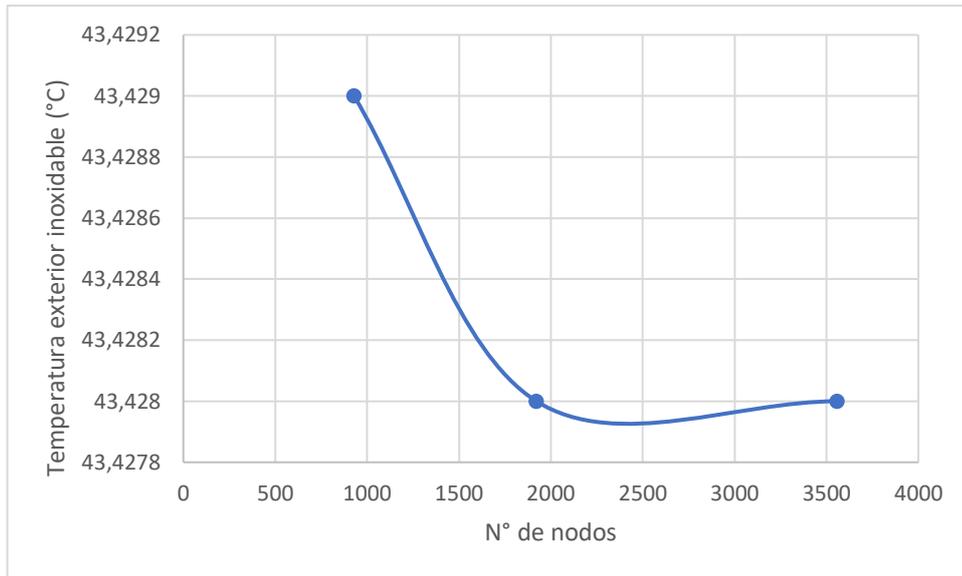


Gráfico 2-4. : Temperatura exterior del acero inoxidable vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W, 2020

En el gráfico 2-4, se aprecia la temperatura exterior del acero inoxidable vs el número de nodos generados por la calidad de malla. En base al análisis de convergencia, la temperatura exterior del acero inoxidable se encuentra en un rango de 43,428 a 43,429 °C, así asegurando que los usuarios no estén expuestos a riesgos laborales o posibles quemaduras y a su vez cumpliendo con el reglamento del trabajo INSHT. Del rango obtenido, la variación es mínima de apenas 0,001 °C, ya que los resultados se estabilizaron rápidamente.

Para complementar este análisis térmico, es necesario acotar que las deformaciones producidas por el efecto de la temperatura fueron abarcadas en el análisis estructural del recipiente a presión, mediante la asignación de una condición de temperatura, donde se apreció deformaciones muy bajas que son presentadas en el siguiente análisis.

4.2 Análisis de resultados totales del estudio estructural

En la tabla 2-4 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos a distintas calidades de mallas, para realizar un análisis de convergencia de elementos finitos.

Tabla 2-4: Resumen de resultados “Análisis estructural”

N°	Mallado	N° de nodos	Esfuerzo (Mpa)	Deformación total (mm)	Factor de seguridad
1	Por defecto	471	19,416	0,036293	13,391
2	Sizing 4mm	774	19,476	0,036333	13,35
3	Sizing 2mm	2265	19,387	0,036401	13,411

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se grafica con los datos obtenidos de la tabla anterior.

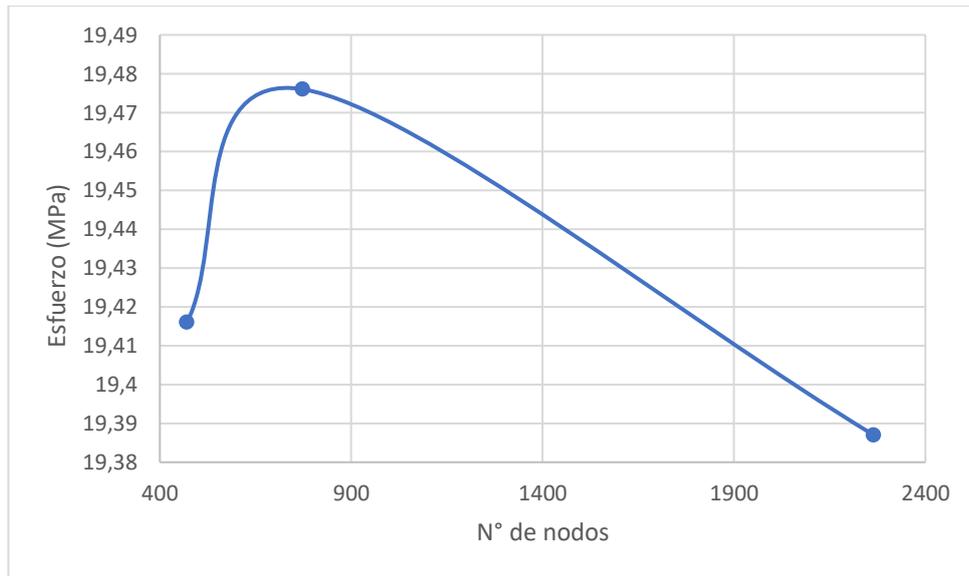


Gráfico 3-4. Esfuerzo máximo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W

En el gráfico 3-4, se aprecia el esfuerzo máximo producido en el recipiente a presión vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base a los resultados obtenidos de la simulación y al análisis de convergencia, el esfuerzo máximo se encuentra en un rango de 19,416 a 19,476 MPa, donde se observó la estabilización rápida de los resultados debido a la utilización de un análisis bidimensional, el cual nos garantiza mejor calidad de mallado y geometrías más fáciles de analizar. La variación del rango obtenido es de 0,06 MPa.

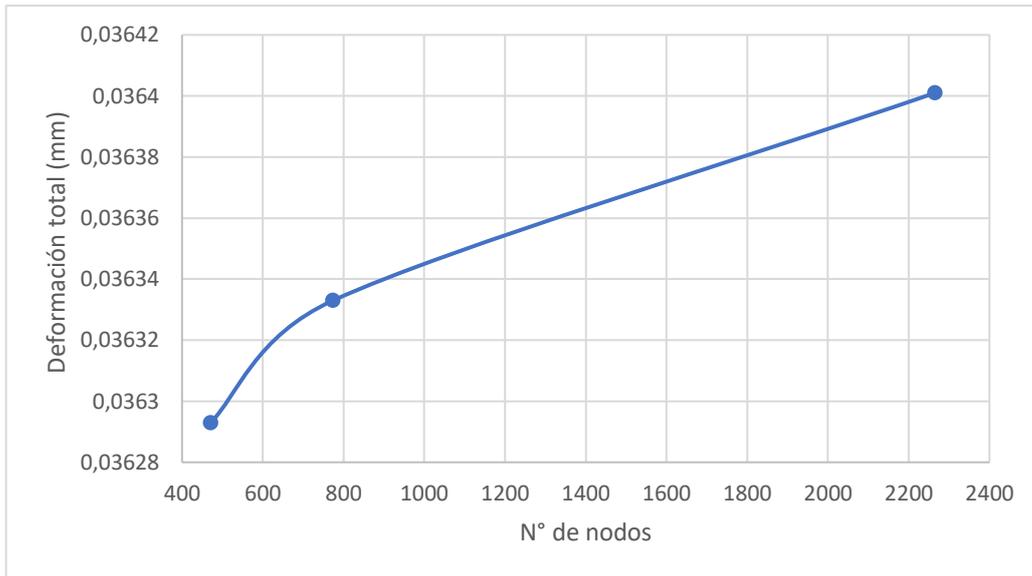


Gráfico 4-4. Deformación total vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W

En el gráfico 4-4, se aprecia la deformación total del reactor vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base al análisis de convergencia, la deformación total se encuentra en un rango de 0,036293 a 0,036333 mm, esta deformación máxima es aceptable ya que es muy pequeña y se encuentra ubicada en tapa superior del reactor. Por consiguiente, la variación mínima en el rango obtenido es de 0,000037 mm, debido a que los resultados se estabilizaron rápidamente.

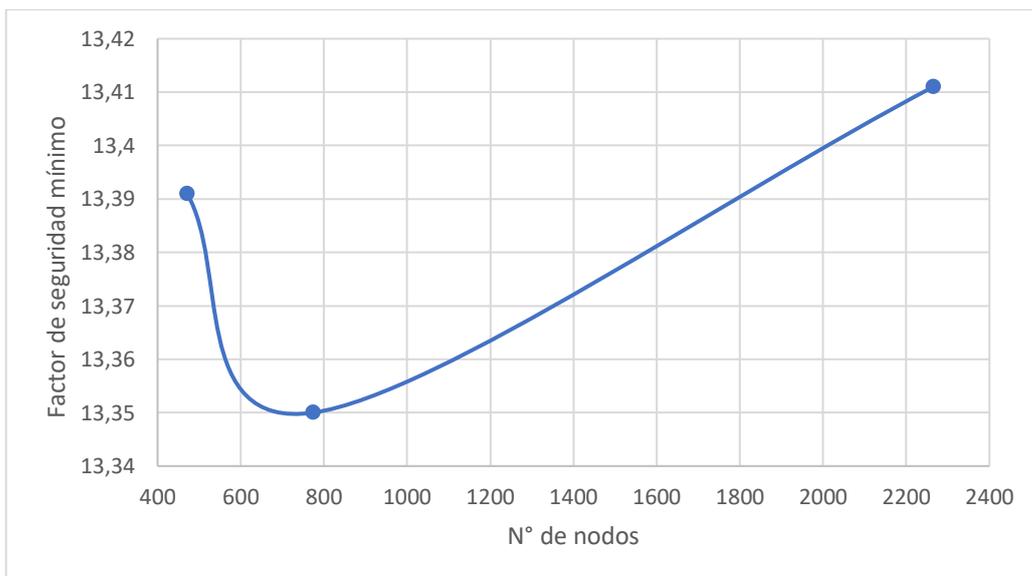


Gráfico 5-4. Factor de seguridad mínimo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W

Con respecto al factor de seguridad del recipiente a presión, se encuentra en un rango de 13,35 a 13,391, donde se observó la estabilización rápida de los resultados debido a la utilización de un análisis bidimensional, el cual nos garantiza mejor calidad de mallado y geometrías más fáciles de analizar. La variación del rango obtenido es de 0,041. Este coeficiente de seguridad es conservador, ya que para el diseño del recipiente a presión se tomó un material exclusivo para este tipo de aplicaciones y un espesor comercial de 4 mm, es decir aproximadamente 1 mm adicional al espesor requerido para una presión de 0,3681 MPa.

4.3 Análisis del estudio estructural de pernos de la brida principal

En la tabla 3-4 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos a distintas calidades de mallas, para realizar un análisis de convergencia de elementos finitos

Tabla 3-4: Resumen de resultados “Análisis estructural pernos”

N°	Mallado	N° de nodos	Esfuerzo (Mpa)	Deformación total (mm)	Factor de seguridad
1	Sizing 2mm - Pernos y tuercas	153126	281,78	0,007546	1,1593
2	Sizing 8mm - Tapa superior	153239	281,78	0,007788	1,1593
3	Sizing 10mm - brida inferior	156862	282,07	0,007927	1,1581

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se grafica con los datos obtenidos de la tabla anterior.

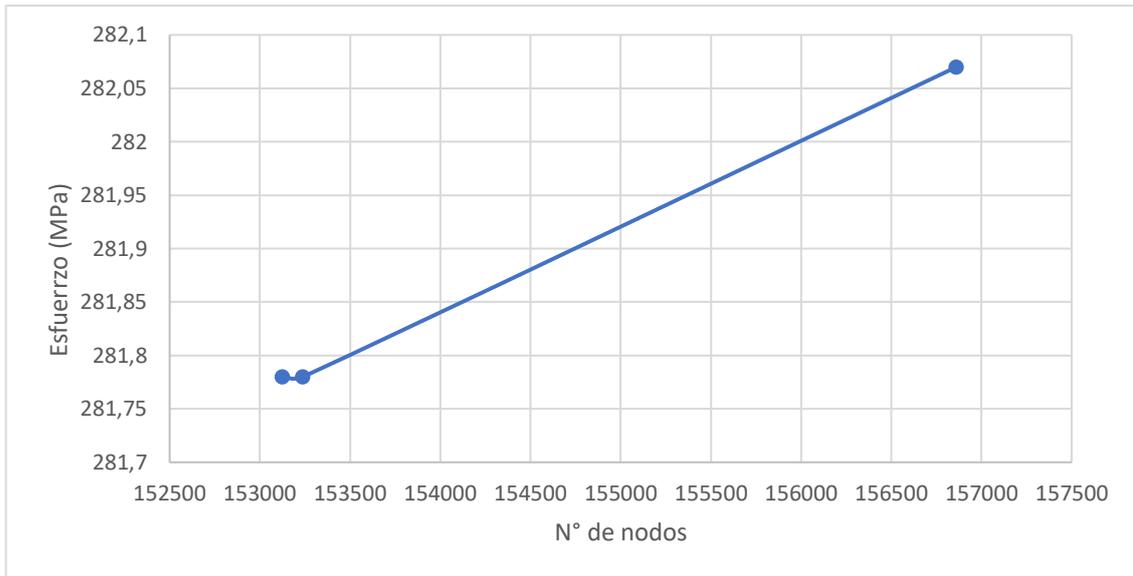


Gráfico 6-4. Esfuerzo máximo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 6-4, se aprecia el esfuerzo máximo producido en los pernos de la brida principal vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base a los resultados obtenidos de la simulación y al análisis de convergencia, el esfuerzo máximo se encuentra en un rango de 281,78 a 282,07 MPa, donde se realizó una optimización de la geometría para facilitar el análisis de los pernos. La variación del rango obtenido es de 0,29 MPa.

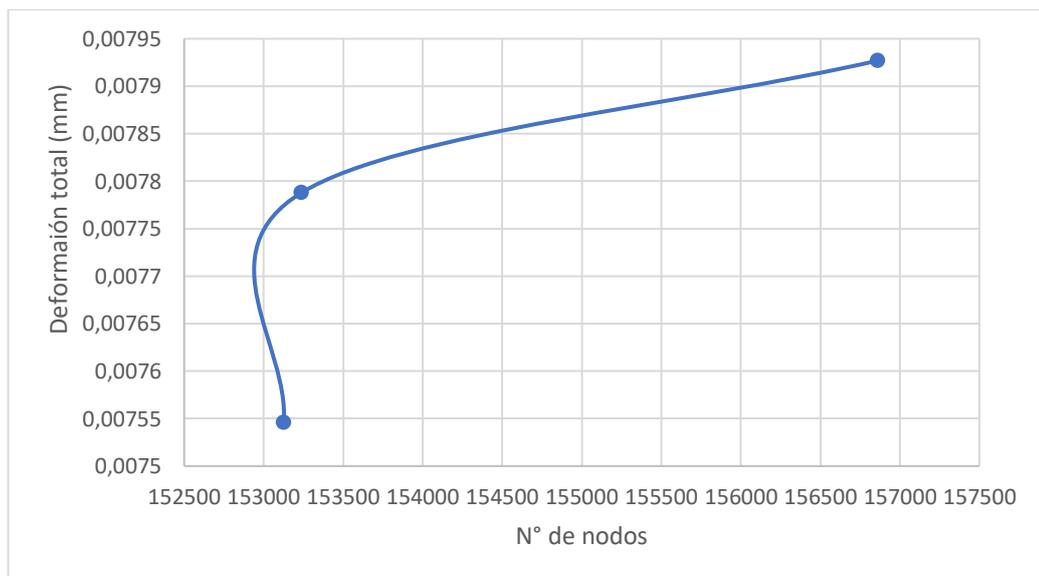


Gráfico 7-4. Deformación total vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 11-4, se aprecia la deformación total en los pernos de la brida principal vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base al análisis de convergencia, la deformación total se encuentra en un rango de 0,007788 a 0,007927 mm, dónde la deformación máxima en los pernos es aceptable ya que es muy pequeña. Por consiguiente, la variación en el rango obtenido es mínima, con un valor de 0,00014 mm, debido a que los resultados se estabilizaron rápidamente.

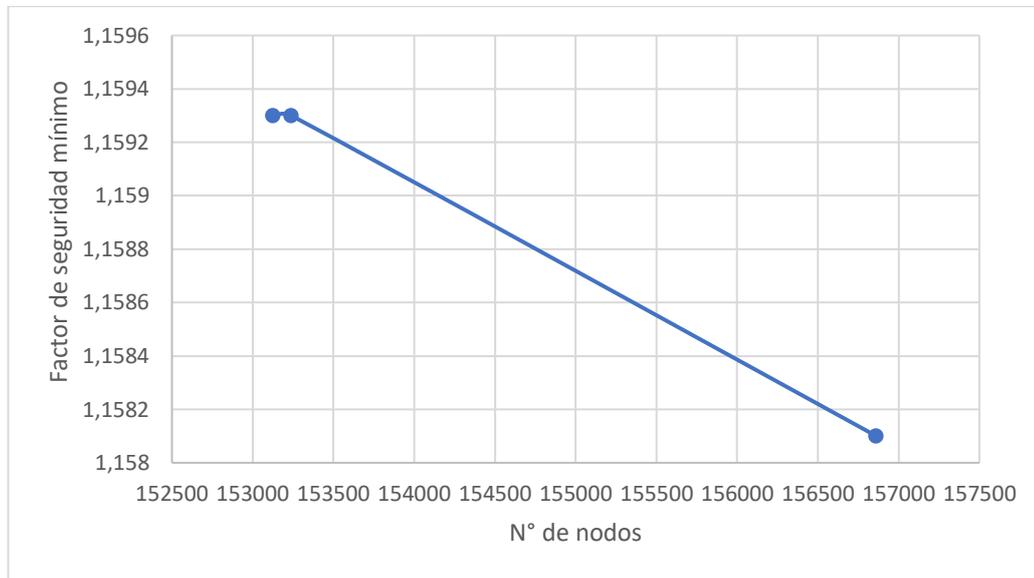


Gráfico 8-4. Factor de seguridad mínimo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 8-4, se aprecia el factor de seguridad mínimo en los pernos de la brida principal vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base al análisis de convergencia, el factor de seguridad mínimo se encuentra en un rango de 1,1581 a 1,1593, teniendo una variación de 0,0012, así garantizando un factor de seguridad óptimo en los pernos y evitando la separación de las bridas en el caso de presentarse sobrecargas en el reactor. En el caso de requerir el aumento del factor de seguridad, lo más viable es el aumento en el tamaño y número de pernos.

4.4 Análisis de resultados del estudio estructural del conjunto de alimentación

En la tabla 4-4 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos a distintas calidades de mallas, para realizar un análisis de convergencia de elementos finitos

Tabla 4-4: Resumen de resultados “Conjunto de alimentación”

N°	Mallado	N° de nodos	Esfuerzo (Mpa)	Deformación total (mm)	Factor de seguridad
1	Sizing 1,5mm	96970	324,48	0,0241	1,1547
2	Sizing 8mm	98572	324,54	0,02415	1,1551
3	Sizing 5mm	99666	324,55	0,024146	1,1558

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se grafica con los datos obtenidos de la tabla anterior.

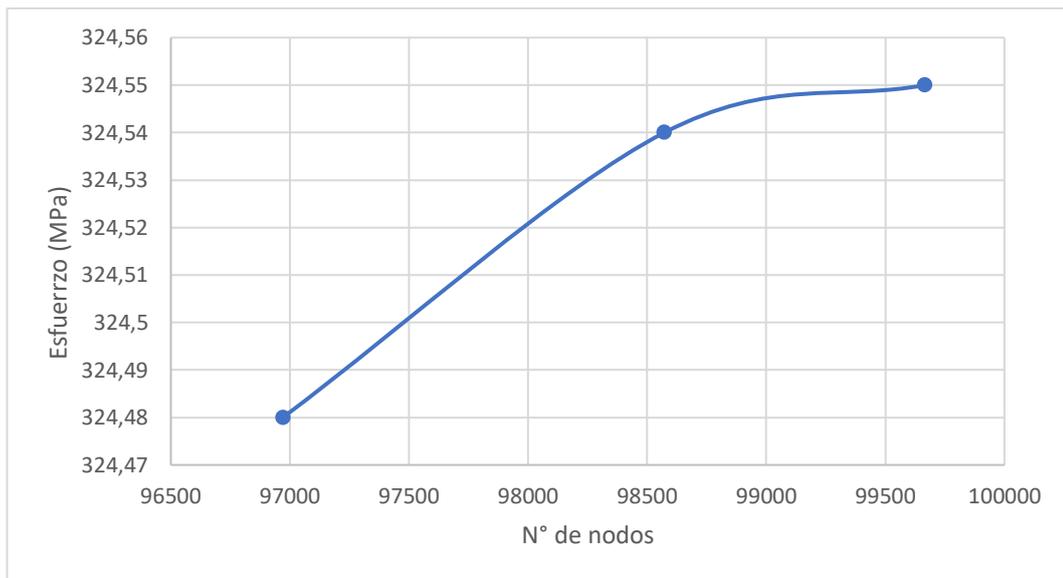


Gráfico 9-4. Esfuerzo máximo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 9-4, se aprecia el esfuerzo máximo producido en el conjunto de alimentación vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base a los resultados obtenidos de la simulación y al análisis de convergencia, el esfuerzo máximo se encuentra en un rango de 324,54 a 324,55 MPa, donde se realizó una optimización de la geometría para facilitar el análisis de los pernos. La variación del rango obtenido es de 0,01 MPa.

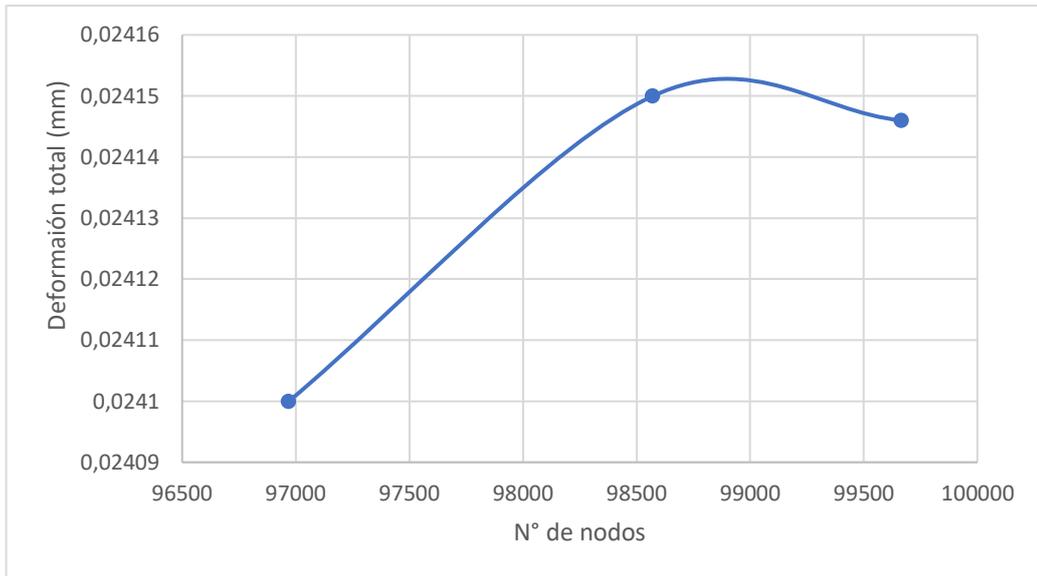


Gráfico 10-4. Deformación total vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 10-4, se aprecia la deformación total en el conjunto de alimentación vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base al análisis de convergencia, la deformación total se encuentra en un rango de 0,0241 a 0,02415 mm, donde la deformación máxima es aceptable ya que es pequeña. Por consiguiente, la variación en el rango obtenido es mínima, con un valor de 0,00005 mm, debido a que los resultados se estabilizaron rápidamente.

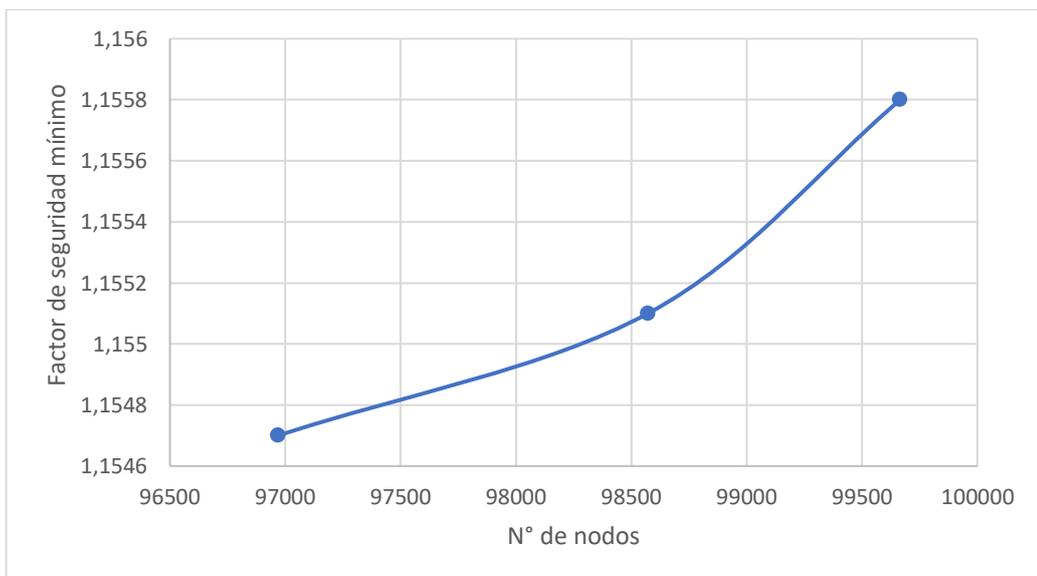


Gráfico 11-4. Factor de seguridad mínimo vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 11-4, se aprecia el factor de seguridad mínimo en el conjunto de alimentación vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base al análisis de convergencia, el

factor de seguridad mínimo se encuentra en un rango de 1,1551 a 1,1558, teniendo una variación de 0,0007, siendo este coeficiente mínimo correspondiente al de los pernos de sujeción; sin embargo, se garantiza un factor de seguridad óptimo en los pernos y evitando la separación de las bridas en el caso de presentarse sobrecargas en el reactor. Con respecto al factor de seguridad del cuello cilíndrico y tapa plana son los que mayor valor tienen, 15. En el caso de requerir el aumento del factor de seguridad, lo más viable es el aumento en el tamaño y número de pernos

4.5 Análisis de resultados del soporte estructural

4.5.1 Demanda Capacidad

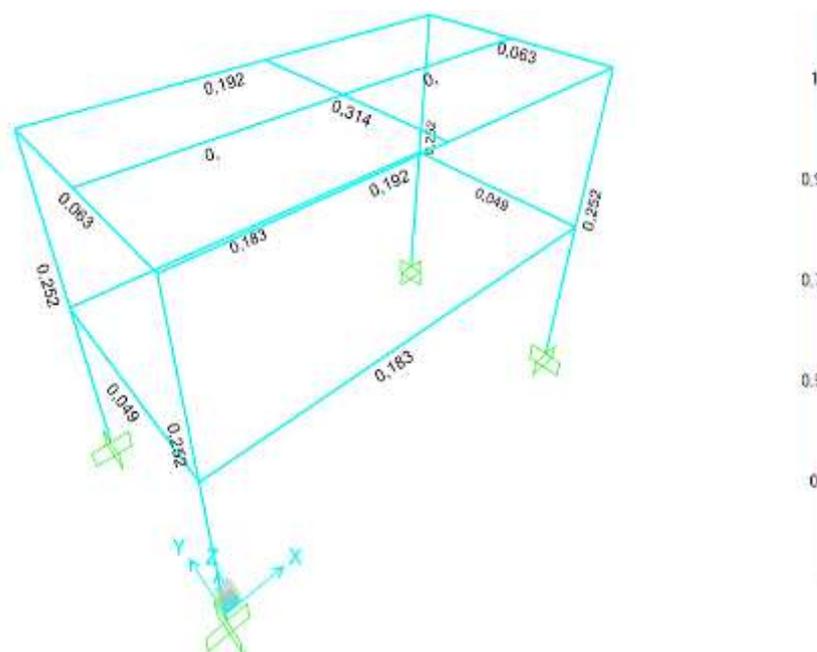


Figura 1-4. Análisis Demanda/Capacidad de la estructura en SAP2000

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 1-4 se muestra la razón demanda/capacidad, donde SAP2000 otorga una referencia de que tan segura es la estructura en función de un código de colores, en donde el color rojo significa que la estructura colapsaría, y el resto de gama de colores presentan buena resistencia. En efecto, el color de todos los elementos de la estructura mostrada es celeste, se aprecia que ningún miembro de la estructura supera el valor de uno, por lo que se comprueba que la mesa estructural es segura para soportar el peso del prototipo e incluso cuando se cargue con peso adicional.

4.5.2 Deformación

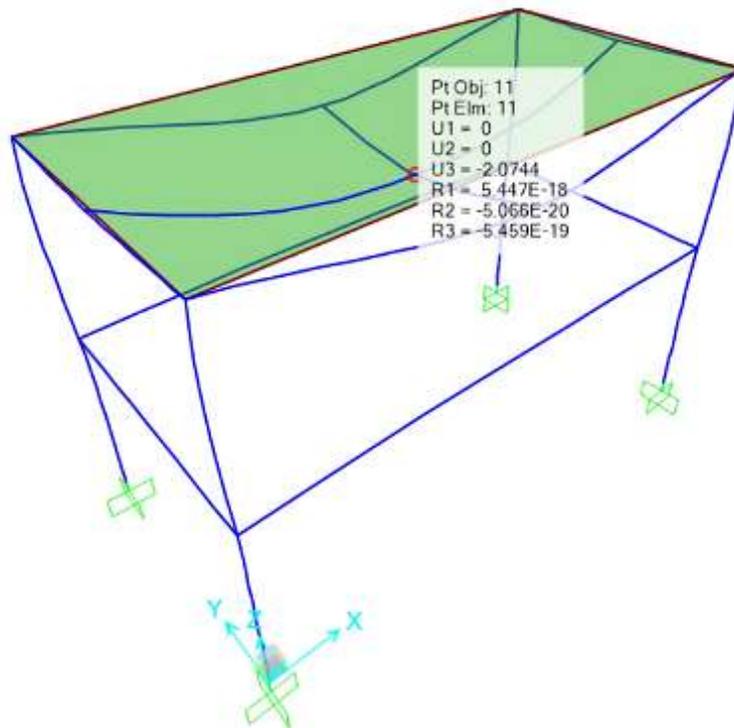


Figura 2-4. Análisis de deformación en SAP 2000

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 2-4 Se muestra la deformación que sufren los elementos estructurales; el elemento con mayor deformación es el señalado, en donde el U3 representa la deformación en mm en la dirección que se aplica la carga, por lo que se puede afirmar que la deformación máxima en la estructura es baja e imperceptible con un valor de 2.0744 mm.

4.5.3 Esfuerzos

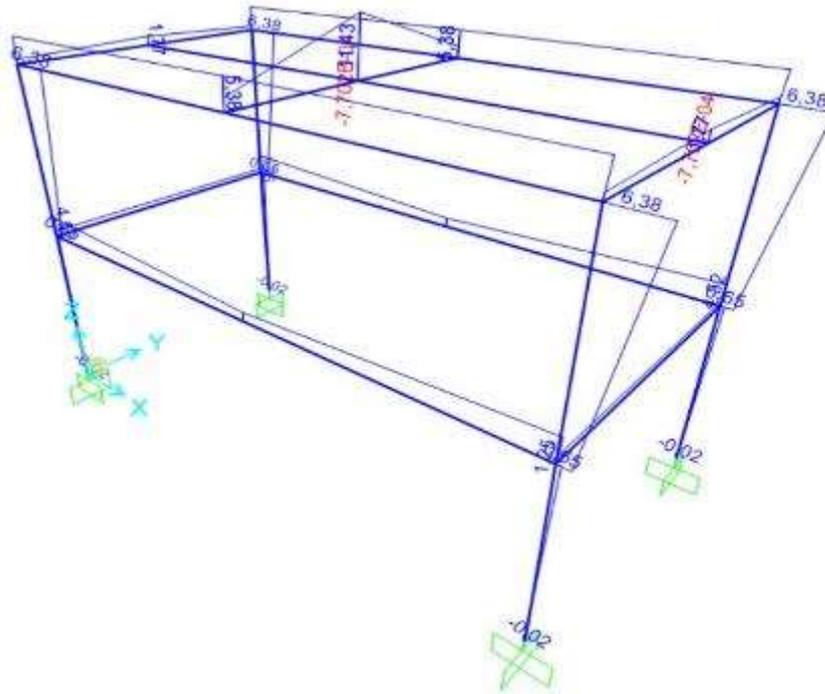


Figura 3-4. Análisis de Esfuerzos en SAP 2000

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En la figura 3-4 se aprecia los esfuerzos producidos en los diferentes elementos estructurales. Aquellos elementos en color azul están sometidos a compresión y los rojos a tracción. El esfuerzo máximo presente en la estructura tiene un valor de 11,43 Kgf/mm², por lo que la estructura no falla a causa de ninguno de estos esfuerzos como se analizó en la razón demanda capacidad.

4.6 Análisis de resultados del flujo en la tubería

4.6.1 Análisis de resultados totales de la velocidad de flujo en la tubería

En la tabla 5-4 se muestra un resumen de las velocidades obtenidas, a distintas calidades de mallas.

Tabla 5-4: Resumen de resultados “Análisis velocidad de flujo”

N°	Mallado	N° de nodos	Velocidad máxima (m/s)
1	Element Size por defecto	21204	0,3331
3	Element Size 1,5 mm	113620	0,3539
4	Element Size 1 mm	357368	0,3601
5	Element Size 0,75 mm	834462	0,3623

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

A continuación, se grafica con los datos obtenidos de la tabla anterior.

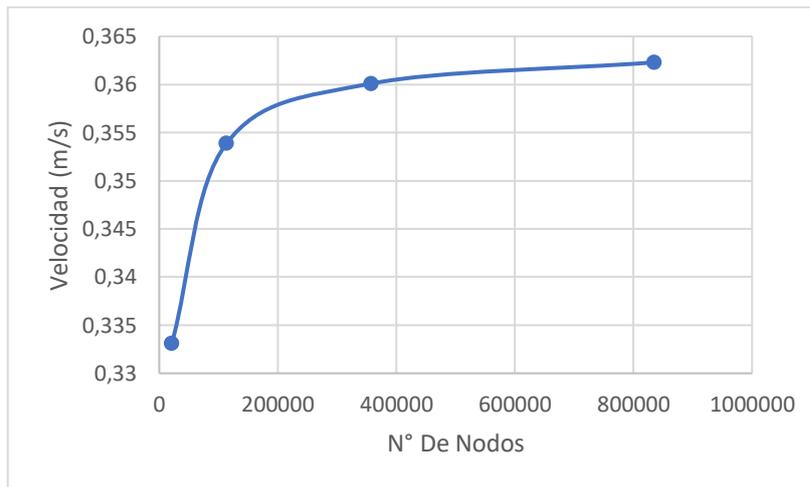


Gráfico 12-4. Velocidad máxima vs N° nodos

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

En el gráfico 12-4, se aprecia la velocidad máxima del dióxido de carbono en la tubería vs el número de nodos generados por los diversos mallados. En base a los resultados obtenidos de la simulación y al análisis de convergencia, la velocidad máxima se encuentra en un rango de 0,3451 a 0,3619 m/s, obteniendo una variación pequeña de 0,0168 m/s. Estos resultados son confiables ya que la calidad de malla obtenida (Skewness) se encuentra en el rango de excelente calidad (0 – 0.25) muy cercano a cero.

Finalmente, en la figura 4-4 se aprecia que la velocidad del gas en la pared interior de la tubería es cero y mientras más se acerca al centro, la velocidad va en aumento. Además, se logró visualizar que la velocidad ligeramente va aumentando hasta llegar al codo con un valor alto, y al descender la velocidad es incrementa debido al efecto de la gravedad.

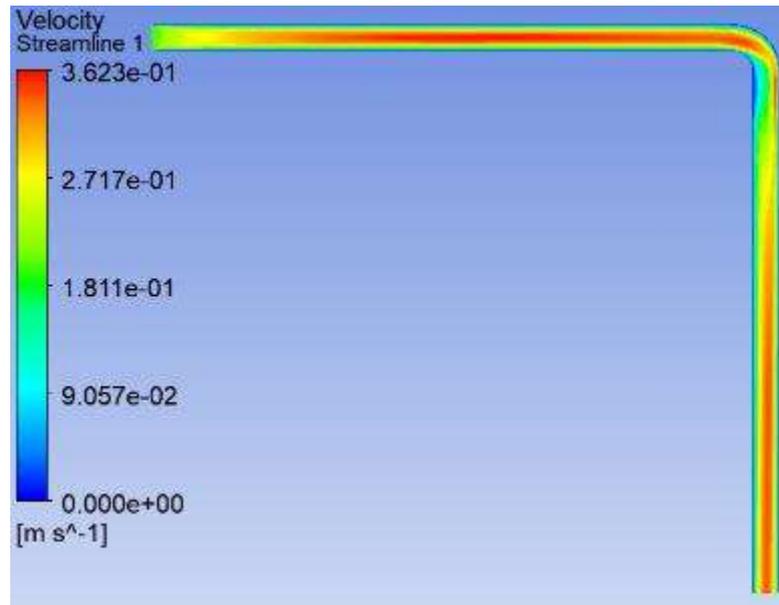


Figura 4-4. Simulación de la velocidad del flujo en la tubería.

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

4.7 Comparación de resultados “Análisis térmico”

En la tabla se presentan los resultados obtenidos mediante cálculos y simulación en ANSYS WORKBENCH. Para los valores obtenidos en la simulación y análisis de convergencia se hará con el promedio de los rangos obtenidos.

Tabla 6-4: Comparación de resultados “Análisis térmico”

Variable	Cálculos	Simulación	Error (%)
Temperatura exterior del reactor (°C)	553,09	553,755	0,12
Temperatura exterior del acero inoxidable (°C)	43,41	43,428	0,041

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El error porcentual para la temperatura exterior del reactor es de 0,12 %, para la temperatura exterior del acero inoxidable es de 0,041 %, errores muy pequeños e insignificantes, por lo que los resultados son altamente confiables.

4.8 Comparación de resultados “Análisis estructural de pernos”

En la tabla 7-4 se presentan los resultados obtenidos para los pernos mediante cálculos y simulación en ANSYS WORKBENCH. Para los valores obtenidos en la simulación y análisis de convergencia se hará un promedio de los rangos obtenidos.

Tabla 7-4: Comparación de resultados “Análisis estructural de pernos”

Variable	Cálculos	Simulación	Error (%)
Esfuerzo máximo	296,765	281,925	5,3
Factor de seguridad	1,415	1,159	13

Fuente: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

Realizado por: Figueroa, J.; Chela, W. 2020

El error porcentual para el esfuerzo máximo de los pernos y del factor de seguridad es de 5,3 %, de 13 % respectivamente. Los errores son relativamente significativos, principalmente al del factor de seguridad y esto se debe a que ANSYS WORKBENCH toma en cuenta la fricción entre los elementos en contactos y agarres en las roscas de los pernos, mientras que en los cálculos del diseño no se toman en cuenta estos parámetros. Otro factor que puede estar influyendo en estos errores, es el efecto de no tomar en cuenta la forma de la tapa toriesférica en las ecuaciones de la bibliografía. De igual manera va a suceder con los pernos de la alimentación. En definitiva, los resultados obtenidos con la simulación de ANSYS WORKBENCH se asemeja más a la realidad, debido a que toma en cuenta todos los parámetros antes descritos, por lo que sus resultados son más confiables que los calculados.

CONCLUSIONES

Se concluye que el prototipo diseñado cumple con los parámetros fundamentales requeridos para el correcto proceso de pirolisis, ya que se obtuvo datos referenciales de un compendio bibliográfico altamente confiable y además los elementos incorporados de control y monitoreo permitirá el buen funcionamiento del reactor de pirolisis una vez implementado.

Se apreció que las tapas toriesféricas le bridan una mejor resistencia estructural al diseño del prototipo debido a que soportaron mayores cargas de presión interna y concentradores de esfuerzos.

Los conjuntos brida-pernos, que une el cuerpo y las tapas del recipiente a presión son altamente eficiente, ya que se necesita alrededor de 49 veces la carga del perno en estudio para poder separar la junta principal.

Al someter el prototipo de reactor pirolítico a una simulación estructural, se concluye que la deformación máxima del equipo no excede el valor permisible ya que se encuentra aproximadamente en un rango de 0,00786 a 0,0364 mm, siendo la deformación más alta la del recipiente a presión. El factor de seguridad de todos los elementos estructurales involucrados varía entre 1,155 a 15, donde el valor mínimo concierne a los pernos del abastecimiento y el máximo de todo recipiente a presión, de tal manera se evidenció y garantizó que el recipiente a presión soporta sobrepresiones altas debido a que su valor de seguridad es mayor a 4, valor mínimo recomendado por el código ASME sección VIII división 1. En definitiva, el reactor en conjunto si soportará estructuralmente una vez puesta en marcha el proceso de pirólisis.

Al efectuar el estudio térmico del prototipo de reactor pirolítico, se llega a la conclusión que no existe grandes deformaciones por efecto de la elevada temperatura en las paredes del cuerpo cilíndrico y tapas, ya que su valor es tan solo de 0,0364 mm. Además, se garantizó una temperatura baja en la última superficie externa del reactor con un valor de 43,428 °C, así asegurando que los usuarios no estén expuestos a posibles quemaduras y a su vez cumpliendo con el reglamento del trabajo INSHT.

El costo del prototipo es de \$1334,98, obteniendo un precio relativamente accesible para el usuario y competitivo en el mercado, ya que comercialmente el valor mínimo de un reactor de pirolisis de similar capacidad es de \$2000, sin embargo, no existe proveedores en el país, por lo que se debería importar. El costo de producción del combustible que se obtendrá a partir del

proceso de pirólisis será rentable, comparado con el precio de venta de un combustible de similares propiedades químicas “gas oil”, ya que el costo de cada litro de combustible de gas oil es de 0,36 ctvs de dólar mientras que para el combustible derivado del plástico es de 0,31 ctvs de dólar, 5 ctvs inferior al combustible disponible en el mercado.

El diseño del equipo propuesto tiene la capacidad de procesar 1kg por lote, de residuos plásticos fabricados a partir de Polietileno, Polipropileno y Poliestireno; que ayudaría a la reducción de desechos plásticos y disminución de la contaminación ambiental en Riobamba, tomando en cuenta que la producción Per-Cápita de este tipo de residuos es de 0,0528 kg al día, por lo que se concluye que el reactor ayudaría a procesar el plástico diario producido por 19 personas, en cada lote; pero si se toma en cuenta, que el equipo trabaja 4 lotes al día, es decir 4kg; el número de personas beneficiadas sería de 76.

RECOMENDACIONES

Seleccionar materiales e instrumentos en catálogos normalizados disponibles en el mercado nacional, para que al momento de hacer el mantenimiento o reemplazar algún componente del prototipo se pueda adquirir fácilmente en distribuidoras locales.

Considerar un condensador con tubería de serpentín para mejorar la transferencia de calor entre el gas y el agua de enfriamiento y además obtener la fracción líquida sin presencia de partículas de agua.

Se recomienda agregar a la junta bridada una compuerta en la tapa superior para facilitar el ingreso de la materia prima que va a ser sometida al proceso de pirolisis y así no ensamblar y desensamblar constantemente la brida.

Priorizar los materiales a utilizar de acuerdo a su grado de importancia, ya que en algunos puede cambiarse por materiales de menores costos y no repercuta significativamente en los parámetros deseados. Además, utilizar una resistencia de banda eléctrica de menor precio para optimizar costos, pero a su vez garantizar el calentamiento del equipo a la temperatura deseada.

Se recomienda diseñar el reactor con una mayor capacidad que permitirá tener una perspectiva más amplia de como ayudará a la reducción de los residuos plásticos a través de la obtención de productos aprovechables.

Se recomienda leer el manual de operación, seguridad y mantenimiento una vez implementado el prototipo para prevenir riesgos laborales y asegurar la durabilidad de la máquina.

GLOSARIO

Análisis de convergencia: es el estudio de mallas más refinadas, así obteniendo resultados más precisos. Si embargo, mientras más refinada sea la malla mayor será el tiempo de cálculo. (Wade, 2013, p.3)

Condensador: es un sistema que se emplea para convertir el vapor o gas en líquido y transmitir su calor a un medio refrigerante o de enfriamiento. (Jasso Juárez et al., 2019, p.4)

Factor de seguridad: Es el cociente resultante entre la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que será sometido. Este coeficiente se trata de un número mayor que uno, que indica la capacidad de exceso que tiene el sistema sobre sus requerimientos. (Shigley et al., 1990, p.187)

PLC: se denomina a un Controlador Lógico Programable, son dispositivos electrónicos industriales que permiten la automatización de procesos requeridos por la industria debido a que controlan tiempos de ejecución y regulan secuencias de las acciones. (Pérez, Acevedo y Silva, 2009, p.25)

QFD: Es un método para el diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los usuarios o clientes y las traduce en especificaciones técnicas y operativas satisfactorias. (Revelle, Moran y Cox, 1998, p.2)

Resistencia eléctrica de calentamiento: es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en calor que se acopla a la forma de la superficie a calentar, su rango de temperatura varía entre 200 a 900.

TRIAC: es un componente electrónico que se utiliza para el control de la corriente, su función básica es de interruptor de un transistor, pero este componente lo hace en corriente alterna. (Pérez, Acevedo y Silva, 2009, p. 35)

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA MONGUA, Jair Alberto & PÉREZ MORENO, Rolando José., *Estudio experimental y simulación de la saponificación del acetato de etilo en tres reactores CSTR en serie*. 2012. Tesis Doctoral. S.l.: Universidad de Cartagena.

ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana, AROUA, Mohamed Kheireddine, et.al; *A review on pyrolysis of plastic wastes. Energy Conversion and Management* [en línea], 2016. vol. 115, pp. 308-326. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.037. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>.

ARACIL, Ignacio, *Formación de contaminantes y estudio cinético de la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*. Universidad de Alicante [en línea], 2008. pp. 414. Disponible en: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf.

ARANDES ESTEBAN, José; LÓPEZ VALERIO, Danilo, et.al; *Reciclado de residuos plásticos*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2004. vol. 5, no. 1, pp. 3. ISSN 0121-6651.

ARTERO, Óscar Torrente, *Arduino. Curso práctico de formación*. 2013. S.l.: RC libros. ISBN 8494072501.

BARNES, David K;A; ... BARLAZ, Morton, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009. vol. 364, no. 1526, pp. 1985-1998. ISSN 14712970. DOI 10.1098/rstb.2008.0205.

BASU, Prabir, *Biomass Gasification and Pyrolysis*. 2010. S.l.: s.n. ISBN 9780123749888.

BILLMEYER JR, FRED W,; *Ciencia de los Polimeros*, Editorial Reverté, S. A., Barcelona/Spain, 1975.

BRIDGWATER, A; V, *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. En: *Overcoming Barriers to Bioenergy: Outcomes of the Bioenergy Network of Excellence 2003 – 2009, Biomass and Bioenergy* [en línea], 2012. vol. 38, pp. 68-94. ISSN 0961-9534. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638>.

BROWN, Logan Jeremy; GÖRGENS, Johann, et.al, *Fast pyrolysis of fibre waste contaminated with plastic for use as fuel products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*

[en línea], 2019. vol. 138, no. October 2018, pp. 261-269. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2019.01.007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.007>.

BUDYNAS, Richard Gordon & NISBETT, J; Keith, *Shigley's mechanical engineering design*. 2008. S.l.: McGraw-Hill New York.

CARRERA GALÁRRAGA, Jenny Fernanda, *Modelación numérica de la unión de dos conducciones a presión de diferente geometría, aplicando el programa ANSYS CFX*. 2019. S.l.: Quito, 2019.

CASTELLS, X;E; & DE GRACIA, L;J;, *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración: Reciclaje de residuos industriales* [en línea]. 2012. S.l.: Editorial Diaz de Santos, S.A. ISBN 9788499693712. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=F0BeF0mQpnwC>.

CASTRO MOSQUERA, Silvia Carolina, *Estudio del diseño para la construcción de un tanque aéreo normado para almacenamiento de GLP líquido de 8m³ de capacidad*. 2015 S.l.: Espol.

CONESA, Juan A;, *Diseño de reactores heterogéneos. Diseño de Reactores II*, 2010. ISSN 8479086521.

CONTRERAS CANTEROS, Francisco Eduardo, *Estudio De La Pirólisis Catalítica De Polietileno En Un Reactor Semi-Batch. Tesis Para Optar Al Grado De Magíster En Ciencias De La Ingeniería Mención Química* [en línea], 2014. no. Universidad de Chile, pp. 1-81. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116264/cf-contreras_fc.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

CORONEL, Julio Cesar, *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*. 2015 S.l.: s.n.

CRESPO, Sara Monserrat & PROAÑO, Oswaldo, *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch*. 2013. S.l.: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

DELGADO, Morocho & KURINTHY, Samya, *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado*. 2019. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

DIANA LUCIA, Polanco Suarez, *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de fuel oil a partir de residuos plásticos mediante un proceso pirolítico en Arequipa*. [en línea], 2019. pp. 1-227. Disponible en: <http://repositorio.ucsp.edu.pe/jspui/handle/UCSP/16097>.

DÍAZ-CONCEPCIÓN, Armando, MARRERO-OSORIO, Sergio et.al, *Análisis para la modelación y optimización geométrica de un reactor tipo tornillo sin-fin empleando el método de grafos dicromáticos*. *Ingeniería Mecánica*, 2015. vol. 18, no. 3, pp. 139-147. ISSN 1815-5944.

DÍAZ CALEÑO, Fardy, *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente*. , 2020.

ENCINAR, J;M; & GONZÁLEZ, J;F;, *Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes. Kinetic study*. *Fuel Processing Technology*, 2008. vol. 89, no. 7, pp. 678-686. ISSN 03783820. DOI 10.1016/j.fuproc.2007.12.011.

ESPÍN OLEAS, Eduardo Rubén, *Proyecto de factibilidad para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos generados en la ciudad de Riobamba*. , 2018.

EUROPE, Plastics & EPRO, *Plastics - the Facts*. [en línea], 2019. Disponible en: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.

FAKHRHOSEINI, Seyed Mousa & DASTANIAN, Majid, *Predicting Pyrolysis Products of PE, PP, and PET Using NRTL Activity Coefficient Model*. En: D. SAMPEDRO (ed.), *Journal of Chemistry* [en línea], 2013. vol. 2013, pp. 487676. ISSN 2090-9063. DOI 10.1155/2013/487676. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2013/487676>.

FLÓREZ CORTÉS, Diana Marcela & POSADA NOREÑA, Juliana., *Diseño conceptual de un reactor de lecho fluidizado a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales*. 2007. S.l.: Ingeniería de Procesos.

GEYER, Roland ... LAW, Kara Lavender, *Production, use, and fate of all plastics ever made*. *Science Advances*, 2017. vol. 3, no. 7, pp. 25-29. ISSN 23752548. DOI 10.1126/sciadv.1700782.

GUEVARA, Christofer & PABLO, Manuel, *Diseño de un Reactor de Pirólisis experimental para pruebas de biomasa agroforestal*. [en línea], 2016. pp. 45-60. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/36933/D-CD88354.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.

HERNÁNDEZ, Maria Del Remedio, *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de*

polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. , 2007. pp. 291.

HOLMAN, J;P;, *Transferencia de calor. 10a reimpresión. México, Compañía Editorial Continental*, 1999. vol. 624.

ILBAY, Pinajota & GEOVANNY, Oscar, 2018. *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno*. 2018. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

INTRIAGO MOLINA, Sonia Kelly & RODRÍGUEZ VELARDE, Pepín Alex, 2017. *Degradación térmica de poliestireno en un reactor pirolítico tipo Batch para la producción de combustible alternativo*. S.l.: Escuela Superior Politencica Del Litoral.

JASSO JUÁREZ, Annya M; PEREZ SALINAS, Jorge A; et.al;, *Condensador de agua ambiental.* , 2019.

JIN, Zechen; HONG, Liu; et.al, *Molten waste plastic pyrolysis in a vertical falling film reactor and the influence of temperature on the pyrolysis products. Chinese Journal of Chemical Engineering* [en línea], 2018. vol. 26, no. 2, pp. 400-406. ISSN 10049541. DOI 10.1016/j.cjche.2017.08.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.001>.

JORDÁN, William David & ZURITA, Paul Omar, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH*”.2015; S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

KIRAN, N; ... SNAPE, C;E;, *Recycling of plastic wastes via pyrolysis. Fuel and Energy Abstracts*, 2000. vol. 41, no. 6, pp. 417-418. ISSN 01406701. DOI 10.1016/s0140-6701(00)94792-1.

PÉREZ, Enrique Mandado; SILVA, Celso Fernández, et.al, *Automatas programables y sistemas de automatizacion/PLC and Automation Systems*. 2009. S.l.: Marcombo. ISBN 8426715753.

QURESHI, Muhammad Saad, LAINE-YLIJOKI, Jutta et.al, *Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020. vol. 152, no. October 2019. ISSN 01652370. DOI 10.1016/j.jaap.2020.104804.

RANA, Mahendra D; & KALNINS, Arturs, *Technical basis for Code Cases on design of ellipsoidal and torispherical heads for ASME Section VIII vessels. J. Pressure Vessel Technol.*, 2000. vol. 122, no. 1, pp. 55-59. ISSN 0094-9930.

REVELLE, Jack B; COX, Charles A; et.al, *The QFD handbook*. 1998. S.l.: John Wiley & Sons. ISBN 0471173819.

RÍOS, Pedro & CALVO, Matías, *Proyecto De Biocombustible: Planta De Pirólisis. Instituto Tecnológico de Buenos Aires*, 2011. pp. 167.

SALINAS VILLACIS, J;E; & VASQUEZ FUEL, R;S;, *Diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo. Sangolquí-Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército*, 2010.

SAVINO, Atilio, CAROLINA CORREAL, Magda; et.al, *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe* [en línea]. 2018. S.l.: s.n. ISBN 9789280737158. Disponible en: <https://www.unenvironment.org/es/resources/informe/perspectiva-de-la-gestion-de-residuos-en-america-latina-y-el-caribe>.

SCHEIRS, J; & KAMINSKY, W;, *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics Into Diesel and Other Fuels* [en línea]. 2006. S.l.: Wiley. Wiley Series in Polymer Science. ISBN 9780470021521. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=_foJAQAAMAAJ.

SHIGLEY, Joseph Edwarda; CORREA, Cuitláhuac Osornio, et.al, *Diseño en ingeniería mecánica.* , 1990.

SOGANCIOGLU, Merve ; YEL, Esra, et.al, *A Comparative Study on Waste Plastics Pyrolysis Liquid Products Quantity and Energy Recovery Potential. Energy Procedia* [en línea], 2017. vol. 118, pp. 221-226. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.07.020. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.020>.

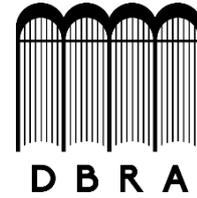
TULASHIE, Samuel Kofi; DAPAAH, Samuel; et.al, *Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. Thermal Science and Engineering Progress* [en línea], 2019. vol. 11, no. September 2018, pp. 417-424. ISSN 24519049. DOI 10.1016/j.tsep.2019.05.002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.05.002>.

WADE, Andy, *Tips and Tricks: Design Modeler & ANSYS Meshing*. Ansys UK, United Kingdom, 2013.

XU, Fanfan; TIAN, Yuanyu; et.al, *Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis*. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2018. vol. 171, no. June, pp. 1106-1115. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2018.06.047. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.047>.



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE**

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 07 / 05 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres – Apellidos: JUAN DANIEL FIGUEROA MORENO
STALIN WLADIMIR CHELA HINOJOSA

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: MECÁNICA

Carrera: MECÁNICA

Título a optar: INGENIERO MECÁNICO

f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc.

