



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclo para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga

Balseca Falcón, Jessica Cristina y Carrera Agama, Daniel Ernesto

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio

08 de febrero de 2022

Latacunga



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga**” fue realizado por los señores **Balseca Falcón, Jessica Cristina y Carrera Agama, Daniel Ernesto** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 08 de febrero de 2022

.....
Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio

C.C.: 0502509995

Reporte de verificación de contenido



TESIS FINAL.docx

Scanned on: 13:9 February 4, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	1581
Words with Minor Changes	308
Paraphrased Words	1052
Ommited Words	0



Website | Education | Businesses

.....
Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio**DIRECTOR**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Balseca Falcón, Jessica Cristina** y **Carrera Agama, Daniel Ernesto**, con cédulas de ciudadanía n°1726685157 y n°1723760417, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 08 de febrero de 2022

Balseca Falcón, Jessica Cristina

C.C.: 1726685157

Carrera Agama, Daniel Ernesto

C.C.: 1723760417



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Balseca Falcón, Jessica Cristina** y **Carrera Agama, Daniel Ernesto** con cédulas de ciudadanía n°1726685157 y n°1723760417, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 08 de febrero de 2022

.....
Balseca Falcón, Jessica Cristina

C.C.: 1726685157

.....
Carrera Agama, Daniel Ernesto

C.C.: 1723760417

Dedicatoria

Todo lo que soy y he logrado es por la voluntad de Dios, a Él es dedicado este proyecto.

Sin duda alguna no lograría cumplir esta meta sin el inmenso amor, apoyo y esmero de mi madre Rosana mi muñequita querida, la mujer más valiente y de la cual siempre tengo que aprender día tras día. Gracias madre, para ti es este logro.

A mi padre Marco por su gran dedicación y esfuerzo en el trabajo, porque nunca permitió que nada me falte, siempre será el soporte constante e inquebrantable para conseguir este objetivo.

A mi hermana, mi siempre pequeña Gabrielita quien nunca dejo de confiar en mí, por todo el amor, apoyo y paciencia que me brindaba aun cuando sentía no poder más.

A mi ángel, mi querida Mami Maya porque siempre estuvo, está y estará pendiente de mí, nunca me ha dejado sola a pesar de la distancia su amor, confianza y apoyo es eterno.

A mi querido abuelito Isaías porque sé que en sus oraciones siempre pedía por mí, y en muchas ocasiones me ha brindado lo que tenía (incluido sus caramelitos) desde el fondo de su corazón.

A mis lindas tías Cecibel y María Elisa por sus consejos, el cariño y la inmensa ayuda que me brindaron para salir adelante en momentos muy difíciles.

Al consentido de la familia Dennis, porque siempre está predispuesto y nunca se ha negado a colaborar en cualquier favor. A Daniela y Valeria mis pequeñas valientes, quienes con sus ocurrencias siempre me alegraban tras una semana larga de estudio.

Dedico esta tesis a toda mi familia Balseca que me han inculcado valores como responsabilidad, honradez y puntualidad. Jamás olvidaré el cariño y atención que me han brindado.

Y con resignación pero nunca olvido, dedico este proyecto a mis abuelitos Miguel y Teresa que, aunque partieron al cielo hace algunos años, su recuerdo aún vive en mí y me motiva a ser una persona con valores y siempre dispuesta a luchar para salir adelante.

Jessica Balseca

Dedicatoria

Este trabajo de titulación va dedicado primeramente a Dios, a mis padres, a toda mi familia, a mis amigos y a todas las personas que me han dado su apoyo y han confiado en mí.

Daniel Carrera

Agradecimiento

En primer lugar, a Dios por darme sabiduría y constancia para culminar esta etapa importante en mi vida.

A mis padres que con su esmero, consejos y apoyo incondicional siempre me alentaban a salir adelante y no rendirme ante injusticias que se presentan. Gracias por nunca dudar y por estar a mi lado siempre en cada batalla que he superado y que solamente ustedes conocen.

A mi hermana por su amor, paciencia y complicidad a lo largo de esta etapa.

A mis amigos: Cristina, Katherine, Mayrita, Juan Pablo, Carlos, Roberto porque a lo largo de la universidad siempre nos apoyamos para terminar cada semestre y los momentos felices que compartimos jamás se olvidarán.

A mi amigo imprescindible Daniel por confiar en mí y siempre estar a mi lado, brindándome su apoyo incondicional y ayudándome a ser mejor cada día.

A mis amigas: Arlethe, Daysi, Gabriela y Jessica que siempre confiaron en mí. Gracias por estar conmigo cuando más las necesitaba y sin duda gracias por tantas alegrías que me han brindado.

Al ingeniero Freddy Salazar por ser el único que creía en mí, brindarme su sabiduría y consejos para salir adelante a lo largo de la universidad.

A la ingeniera Mayra Erazo y al ingeniero Fabricio Pérez jamás olvidaré el apoyo y la confianza que depositaron en mí. Al brindarme aquella oportunidad que me permitió creer en mis conocimientos y superarme día a día.

Al ingeniero Leonidas Quiroz y Marco Singaña por su gran apoyo en el presente proyecto, gracias por compartir con nosotros conocimientos indispensables para la culminación en este proceso de titulación.

Jessica Balseca

Agradecimiento

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por iluminarme con su sabiduría para concluir con su bendición esta etapa de mi vida.

Agradezco con infinita gratitud a mis padres Jaime e Hilda que con sus consejos y dedicación han hecho de mí una gran persona; gracias papito por todo su cariño y ejemplo, por enseñarme a ser una persona responsable, honesta y justa; gracias mamita por su ternura, comprensión y amor incondicional; gracias de todo corazón por su confianza y apoyo en cada paso de mi vida para lograr mis objetivos, verme feliz y buscar siempre mi bienestar y eudemonía.

A mi hermana Gaby y a mi cuñado Manuel que en esta etapa siempre me han apoyado y me han brindado su cariño, a mi sobrina Dahiam que con sus abrazos y afecto me han dado fuerzas para motivarme y seguir adelante.

A mis lindas abuelitas Celia y María Luisa que siempre me han demostrado su amor en todo momento, a mis abuelitos Jaime y Javier que desde el cielo siguen cuidándome y festejando mis logros.

A mis queridos tíos y primos por sus consejos, ayuda, cariño y porque siempre han cuidado de mí.

A Cristina que ha sido el motor principal en mi vida y una persona inexorable que ha estado conmigo en cada momento apoyándome y motivándome para cumplir mis objetivos.

A mis amigos incondicionales que siempre llevaré en mi corazón, gracias por todo el apoyo en esta etapa, en especial por los momentos inolvidables que pasamos juntos.

Agradezco a mi querida ESPE y a todos los docentes, en especial a los ingenieros Leonidas Quiroz, Marco Singaña y al doctor Trino Romero que con su dirección, conocimiento y experiencia permitieron el desarrollo de este proyecto.

Daniel Carrera

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte de verificación de contenido.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de tablas	17
Índice de figuras	19
Resumen	25
Abstract.....	26
Generalidades	27
Introducción.....	27
Antecedentes.....	27
Formulación del problema	28
Descripción resumida del proyecto.....	29
Objetivos del proyecto.....	31
<i>Objetivo general</i>.....	31
<i>Objetivos específicos</i>	31
Justificación e importancia.....	32

Hipótesis.....	33
Variables de la investigación.....	33
<i>Variable independiente</i>	33
<i>Variable dependiente</i>	33
Proceso por pirólisis de plástico	34
Polímeros.....	34
<i>El polipropileno (pp)</i>	34
Proceso por pirólisis para la obtención de combustible	35
<i>Pirólisis</i>	35
Factores relacionados con el proceso de pirólisis plástica.....	36
<i>Temperatura de reacción</i>	37
<i>Velocidad de calefacción</i>	37
<i>Tiempo de residencia de los gases en el medio de reacción</i>	37
<i>Cantidad de muestra y tamaño de partícula</i>	38
<i>Densidad y humedad de la muestra</i>	38
<i>Tipo de contacto material – catalizador</i>	39
Tipos de reactores.....	39
<i>Reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) o reactor batch</i>	40
<i>Reactor semicontinuo de tanque agitado (RSCTA) o reactor semibatch</i>	40
<i>Reactor de tornillo</i>	42
<i>Reactor extrusor</i>	42

<i>Reactor de esferas</i>	43
<i>Reactor riser</i>	44
<i>Reactor de lecho fijo</i>	45
<i>Reactor de lecho fluidizado</i>	45
<i>Reactor de cono rotatorio</i>	46
Transferencia de calor.....	47
<i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	47
<i>Transferencia de calor empleando software CAE</i>	48
Norma para el diseño y construcción de recipientes a presión	50
Reglas para la construcción de recipientes a presión	52
<i>Volumen de recipientes a presión</i>	52
<i>Presión y temperatura</i>	53
<i>Cargas</i>	55
<i>Tipos de recipientes</i>	55
<i>Cuerpos cilíndricos verticales</i>	56
<i>Tipos de cabezales</i>	60
<i>Eficiencia de las soldaduras (E)</i>	62
<i>Factor de seguridad</i>	63
<i>Requerimientos relacionados con las clases de materiales</i>	63
Pérdida de calor en el intercambiador	65

	13
<i>Propiedades químicas de los materiales</i>	65
Tipos de impulsores o agitadores.....	67
<i>Diseño estándar de turbina</i>	68
Metodología de diseño del sistema mecánico.....	74
Metodología de diseño	74
Especificaciones del equipo.....	75
Análisis de alternativas del sistema	76
Selección del material adecuado para la construcción del sistema	81
<i>Acero inoxidable austenítico 304</i>	82
Diseño y simulación del sistema de reacción.....	84
Diseño del reactor térmico.....	84
<i>Modelado del reactor térmico</i>	85
<i>Cálculo del espesor para los cabezales</i>	85
<i>Modelado de los cabezales superior e inferior</i>	86
<i>Análisis de las variables de diseño en el reactor térmico</i>	87
<i>Análisis de las variables de diseño en el cabezal superior</i>	93
Diseño de la columna de reflujo.....	97
<i>Modelado de la columna de reflujo</i>	98
<i>Análisis de las variables de diseño</i>	99
Diseño del reactor catalítico	104
<i>Modelado del reactor catalítico</i>	104

<i>Análisis de las variables de diseño</i>	105
Diseño del intercambiador de calor	110
<i>Dimensiones de las tuberías del intercambiador de calor</i>	111
<i>Cálculo de la pérdida de calor en el intercambiador</i>	112
<i>Modelado del intercambiador de calor</i>	112
Diseño del depósito	113
<i>Modelado del depósito</i>	114
<i>Análisis de las variables de diseño</i>	114
Diseño de la tolva.....	120
<i>Modelado de la tolva</i>	120
<i>Análisis de las variables de diseño</i>	121
Diseño del agitador	123
<i>Modelado del agitador</i>	124
<i>Análisis de las variables de diseño del agitador</i>	124
Selección de componentes normalizados	127
<i>Servoválvulas</i>	127
<i>Transductores de presión</i>	128
<i>Motor DC</i>	129
<i>Termocuplas</i>	130
<i>Resistencias eléctricas</i>	131

<i>Material aislante</i>	132
<i>Torre de enfriamiento</i>	134
<i>Perlas de vidrio</i>	134
<i>Componentes del sistema de condensación</i>	135
<i>Sensor de peso</i>	139
Ensamble del sistema de reacción de pirólisis.....	140
<i>CAD del subsistema de alimentación</i>	140
<i>CAD del subsistema del reactor térmico</i>	142
<i>CAD del subsistema de agitación</i>	146
<i>CAD del subsistema de alivio</i>	147
<i>CAD del subsistema de la columna de reflujo</i>	148
<i>CAD del subsistema de condensación</i>	149
<i>CAD del subsistema del depósito</i>	152
Simulación del funcionamiento del sistema de reacción.....	152
Simulación de transferencia de calor	154
<i>Simulación de transferencia de calor en la tolva de alimentación</i>	155
<i>Simulación de transferencia de calor en el reactor térmico</i>	156
<i>Simulación de la pérdida de calor en el intercambiador</i>	158
Construcción del sistema de reacción por pirólisis.....	160
Construcción mecánica	160
Ensamblaje de los subsistemas	163

<i>Subsistema de alimentación</i>	163
<i>Subsistema del reactor térmico</i>	163
<i>Subsistema de agitación</i>	166
<i>Subsistema de alivio</i>	168
<i>Subsistema de la columna de reflujo</i>	168
<i>Subsistema de condensación</i>	170
<i>Subsistema del depósito</i>	171
Montaje y desmontaje del reactor térmico.....	172
Pruebas de funcionamiento del sistema de reacción por pirólisis.....	175
Análisis de costos.....	179
Análisis de resultados	180
Pruebas de obtención de combustible a partir de polímeros.....	180
<i>Análisis de la cuarta prueba de funcionamiento</i>	183
Análisis cualitativos y cuantitativos del producto obtenido.....	191
Validación de la hipótesis.....	196
Conclusiones.....	198
Recomendaciones	200
Trabajos futuros.....	201
Bibliografía.....	202
Anexos	213

Índice de tablas

Tabla 1 Proceso de pirólisis y productos obtenidos	39
Tabla 2 Normativas que regulan el diseño de recipientes a presión	51
Tabla 3 Factor de seguridad según el código ASME	63
Tabla 4 Valores de la constante KL	71
Tabla 5 Especificaciones del equipo.....	75
Tabla 6 Características relevantes de los tipos de reactores.....	77
Tabla 7 Evaluación del peso específico de cada criterio	79
Tabla 8 Evaluación del peso específico del criterio semicontinuo	79
Tabla 9 Evaluación del peso específico del criterio modular.....	80
Tabla 10 Evaluación del peso específico del criterio costo.....	80
Tabla 11 Evaluación del peso específico del criterio agitación.....	80
Tabla 12 Evaluación del peso específico del criterio inyección.....	81
Tabla 13 Tabla de conclusiones.....	81
Tabla 14 Análisis cualitativo de los materiales mencionados en el código ASME.....	82
Tabla 15 Constantes para el diseño.....	84
Tabla 16 Cálculos para el reactor térmico	84
Tabla 17 Cálculos para el cabezal superior	86
Tabla 18 Cálculos para la columna de reflujo	97
Tabla 19 Cálculos para el reactor catalítico	104
Tabla 20 Cálculos para el intercambiador de calor	112
Tabla 21 Cálculos para el depósito	113
Tabla 22 Cálculos para la tolva	120
Tabla 23 Cálculos para el agitador	123

Tabla 24 Pruebas de funcionamiento de los subsistemas.....	176
Tabla 25 Análisis de costos.....	179
Tabla 26 Pruebas de funcionamiento para obtener combustible.....	181
Tabla 27 Resultados de la cromatografía GCMS.....	191
Tabla 28 Agrupación de las moléculas según el número de carbonos	194

Índice de figuras

Figura 1 Producción de combustible a partir de polímeros urbanos de recicló.....	29
Figura 2 Planta de producción de combustible	30
Figura 3 Reactor tipo batch.....	40
Figura 4 Reactor tipo semi batch.....	41
Figura 5 Reactor de tornillo.....	42
Figura 6 Reactor extrusor.....	43
Figura 7 Reactor de esferas.....	44
Figura 8 Reactor riser a escala de laboratorio	45
Figura 9 Reactor de cono rotatorio acoplado a una zona de combustión	46
Figura 10 Proceso de convección.....	48
Figura 11 Tipos de recipientes a presión.....	55
Figura 12 Cuerpo cilíndrico de costura longitudinal	56
Figura 13 Distribución de esfuerzos en recipientes de pared delgada sometidos presión.....	58
Figura 14 Recipiente cilíndrico presurizado.....	58
Figura 15 Tapa semielíptica	61
Figura 16 Agitadores para líquidos de viscosidad moderada	67
Figura 17 Mediciones de turbina.....	68
Figura 18 Modelado del reactor térmico	85
Figura 19 Modelado del cabezal superior del reactor térmico.....	87
Figura 20 Modelado del cabezal inferior del reactor térmico	87
Figura 21 Von Misses del reactor térmico para presión de diseño.....	88
Figura 22 Deformación del reactor térmico para presión de diseño	89
Figura 23 Factor de seguridad del reactor térmico para presión de diseño	90

Figura 24 Von Misses del reactor térmico para presión de trabajo máxima	91
Figura 25 Deformación del reactor térmico para presión de trabajo máxima.....	92
Figura 26 Factor de seguridad del reactor térmico para presión de trabajo máxima.....	93
Figura 27 Von Misses del cabezal superior para presión de diseño	94
Figura 28 Deformación del cabezal superior para presión de diseño.....	94
Figura 29 Factor de seguridad del cabezal superior para presión de diseño	95
Figura 30 Von Misses del cabezal superior para presión de trabajo máxima.....	96
Figura 31 Deformación del cabezal superior para presión de trabajo máxima	96
Figura 32 Factor de seguridad del cabezal superior para presión de trabajo máxima	97
Figura 33 Modelado de la columna de reflujo.....	98
Figura 34 Von Misses de la columna de reflujo para presión de diseño.....	100
Figura 35 Deformación de la columna de reflujo para presión de diseño	100
Figura 36 Factor de seguridad de la columna de reflujo para presión de diseño.....	101
Figura 37 Von Misses de la columna de reflujo para presión de trabajo máxima	102
Figura 38 Deformación de la columna de reflujo para presión de trabajo máxima.....	103
Figura 39 Factor de seguridad de columna de reflujo para presión de trabajo máxima.....	103
Figura 40 Modelado del reactor catalítico.....	105
Figura 41 Von Misses del reactor catalítico para presión de diseño	106
Figura 42 Deformación del reactor catalítico para presión de diseño.....	107
Figura 43 Factor de seguridad del reactor catalítico para presión de diseño	107
Figura 44 Von Misses del reactor catalítico para presión de trabajo máxima.....	108
Figura 45 Deformación del reactor catalítico para presión de trabajo máxima	109
Figura 46 Factor de seguridad del reactor catalítico para presión de trabajo máxima	109
Figura 47 Temperaturas a través de la tubería del intercambiador de calor.....	110

Figura 48 Transferencia de calor en las tuberías del intercambiador	110
Figura 49 Valores de radios del intercambiador de calor	111
Figura 50 Modelado del intercambiador de calor	113
Figura 51 Modelado del depósito.....	114
Figura 52 Von Misses del depósito para presión de diseño	116
Figura 53 Deformación del depósito para presión de diseño.....	116
Figura 54 Factor de seguridad del depósito para presión de diseño.....	117
Figura 55 Von Misses del depósito para presión de trabajo máxima.....	118
Figura 56 Deformación del depósito para presión de trabajo máxima	119
Figura 57 Factor de seguridad del depósito para presión de trabajo máxima	119
Figura 58 Modelado de la tolva.....	121
Figura 59 Von Misses de la tolva.....	122
Figura 60 Deformación de la tolva	122
Figura 61 Factor de seguridad de la tolva.....	123
Figura 62 Modelado del agitador.....	124
Figura 63 Von Misses del agitador	125
Figura 64 Deformación del agitador.....	126
Figura 65 Factor de seguridad del agitador	126
Figura 66 Servoválvula de la tolva de alimentación	127
Figura 67 Servoválvula de bronce.....	128
Figura 68 Transductor de presión.....	129
Figura 69 Motor DC del agitador.....	129
Figura 70 Termocupla tipo K para la tolva de alimentación	130
Figura 71 Termocupla tipo K para el reactor térmico.....	131

Figura 72 Resistencia térmica implementada en la tolva de alimentación	132
Figura 73 Fibra de cerámica.....	133
Figura 74 Camisa de la condensación rellena de poliuretano.....	133
Figura 75 Torre de enfriamiento.....	134
Figura 76 Perlas de vidrio.....	135
Figura 77 Compresor GUY60NR.....	136
Figura 78 Condensador CB-72	137
Figura 79 Motor ventilador ELCO	137
Figura 80 Refrigerante freon 134a	138
Figura 81 Componentes complementarios del sistema de condensación	139
Figura 82 Sensor de peso	139
Figura 83 CAD del sistema de reacción.....	140
Figura 84 CAD del subsistema de alimentación. Vista de corte	141
Figura 85 CAD del subsistema de alimentación. Vista isométrica.....	142
Figura 86 CAD del cabezal superior del reactor térmico.....	143
Figura 87 CAD del reactor térmico. Vista de corte	144
Figura 88 CAD del reactor térmico. Vista isométrica.....	144
Figura 89 CAD de la mesa de pesaje.....	145
Figura 90 CAD de la entrada de nitrógeno.....	145
Figura 91 CAD de la termocupla tipo K.....	146
Figura 92 CAD del subsistema de agitación	147
Figura 93 CAD del subsistema de alivio	148
Figura 94 CAD de la columna de reflujo.....	149
Figura 95 CAD del subsistema de condensación	150

Figura 96 CAD del intercambiador de calor. Vista de corte	151
Figura 97 CAD del intercambiador de calor. Vista isométrica.....	151
Figura 98 CAD del subsistema del depósito	152
Figura 99 Trayectoria envolvente del vapor de pirólisis	153
Figura 100 Movimiento del vapor de pirólisis	153
Figura 101 Simulación del funcionamiento del sistema de reacción.....	154
Figura 102 Temperatura en el interior de la tolva.....	155
Figura 103 Vista isométrica de la temperatura en la tolva de alimentación	156
Figura 104 Temperatura en el reactor térmico	157
Figura 105 Vista isométrica de la temperatura en el reactor térmico.....	157
Figura 106 Temperatura del gas freon 134a.....	158
Figura 107 Temperatura del vapor de pirólisis.....	158
Figura 108 Temperaturas en el intercambiador de calor.....	159
Figura 109 Construcción del sistema de reacción.....	161
Figura 110 Subsistema de alimentación	163
Figura 111 Cabezal superior del reactor térmico	164
Figura 112 Reactor térmico.....	164
Figura 113 Mesa de pesaje	165
Figura 114 Entrada de nitrógeno.....	165
Figura 115 Termocupla tipo K	166
Figura 116 Parte superior del subsistema de agitación.....	167
Figura 117 Parte inferior del subsistema de agitación	167
Figura 118 Subsistema de alivio.....	168
Figura 119 Subsistema de la columna de reflujo.....	169

Figura 120 Columna de reflujo con aislante.....	169
Figura 121 Subsistema de condensación	170
Figura 122 Intercambiador de calor	170
Figura 123 Subsistema del depósito	171
Figura 124 Sistema de reacción por pirólisis	172
Figura 125 Ingreso del polipropileno en la tolva de alimentación.....	183
Figura 126 Inyección del nitrógeno en el sistema de reacción	184
Figura 127 Lectura de la presión inicial en el sistema	184
Figura 128 Temperatura inicial en el proceso de pirólisis.....	185
Figura 129 Temperatura inicial en el subsistema de condensación	185
Figura 130 Temperatura y presión después de 2 horas.....	186
Figura 131 Temperaturas del reactor térmico	187
Figura 132 Temperatura final en el sistema de condensación.....	187
Figura 133 Temperaturas del sistema de condensación.....	188
Figura 134 Producto condensado.....	189
Figura 135 Temperaturas registradas del proceso de pirólisis.....	189
Figura 136 Productos obtenidos.....	190
Figura 137 Muestras recolectadas	190
Figura 138 Residuo sólido al final del proceso de pirólisis	191
Figura 139 Cromatograma de los compuestos.....	193
Figura 140 Análisis de compuestos de pirólisis	195
Figura 141 Clasificación de porcentaje de combustibles	197

Resumen

El plástico es el material más utilizado por el ser humano y es por su elevado uso que se ha convertido en uno de los contaminantes que afecta el equilibrio ecológico en el planeta; el presente proyecto tiene su origen en la premisa que la mayoría de los plásticos son sintetizados a partir de derivados químicos del petróleo. Entonces se plantea el diseño y la construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la obtención de combustible, a partir de polímeros de reciclo. Se inicia con la investigación de los tipos de reactores para pirólisis y se realiza una evaluación considerando la factibilidad en costos, materiales y manufactura disponible en el país. Se emplea el código ASME para el diseño de recipientes a presión, en donde se especifican las variables físicas que se deben calcular para el diseño del sistema. Se utiliza un software CAD para el modelado de los subsistemas. Se realizan simulaciones CAE para validar el diseño y a la par realizar simulaciones térmicas en el reactor y la tolva de alimentación, también se realiza simulaciones de fluidos para visualizar el comportamiento del vapor de pirólisis en el sistema de reacción y en el intercambiador de calor. El sistema de reacción se construye con acero inoxidable 304 y empleando diferentes procesos de manufactura. Para comprobar la operabilidad del sistema se realizan pruebas experimentales de funcionamiento, con el fin de obtener producto. Implementando la metodología de prueba y error se corrigen fallos para optimizar el sistema; finalmente se realiza la prueba definitiva en donde se consigue gran cantidad de producto. Con la prueba de cromatografía se analiza químicamente el líquido obtenido y se valida si corresponde a un tipo de combustible.

Palabras clave:

- **PROCESO DE PIRÓLISIS**
- **REACTOR TÉRMICO**
- **SISTEMA DE REACCIÓN**

Abstract

Plastic is the material most used by human beings and it is because of its high use that it has become one of the pollutants that affect the ecological balance of the planet; this project has its origin in the premise that most plastics are synthesized from chemical derivatives of petroleum. Then, the design and construction of a pyrolysis reaction system to obtain fuel from recycled polymers is proposed. It begins with the investigation of the types of pyrolysis reactors and an evaluation is made considering the feasibility in costs, materials and manufacturing available in the country. The ASME code for the design of pressure vessels is used, where the physical variables that must be calculated for the design of the system are specified. CAD software is used for the modeling of the subsystems. CAE simulations are performed to validate the design and at the same time, thermal simulations are performed in the reactor and the feed hopper, fluid simulations are also performed to visualize the behavior of the pyrolysis steam in the reaction system and in the heat exchanger. The reaction system is built with 304 stainless steel and using different manufacturing processes. In order to check the operability of the system, experimental tests of operation are carried out, in order to obtain product. By implementing the trial and error methodology, failures are corrected to optimize the system; finally, the final test is carried out where a large amount of product is obtained. With the chromatography test, the liquid obtained is chemically analyzed and it is validated if it corresponds to a type of fuel.

Key words:

- **PYROLYSIS PROCESS**
- **THERMAL REACTOR**
- **REACTION SYSTEM**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1. Introducción

Actualmente el plástico es el material más utilizado debido a su variedad de aplicaciones en los diversos campos de la industria e incluso en la vida cotidiana de los seres humanos, es por su elevado uso que es uno de los más grandes contaminantes del planeta y ha preocupado a organizaciones y a gobiernos por su impacto en el medio ambiente, es por ello que se ha buscado de diferentes maneras la eliminación de estos desechos y la principal solución es el reciclaje, es por ello que esta investigación desarrolla un tipo de reciclaje químico que produce combustibles con propiedades muy similares a las de los combustibles convencionales.

La presente investigación parte de la premisa que la mayoría de los plásticos son sintetizados a partir de derivados químicos del petróleo, por lo que la idea de este proyecto es hacer lo inverso al diseñar y construir un sistema de reacción por pirólisis para que por medio de polímeros urbanos de reciclaje obtener combustibles, mediante el diseño del sistema en un software CAD y de una simulación de transferencia de calor en el reactor térmico principal usando un software CAE.

1.2. Antecedentes

Los polímeros son compuestos que se encuentran en la naturaleza y desempeñan funciones muy importantes como el glucógeno, celulosa, ADN (Ácido Desoxirribonucleico) y ARN (Ácido ribonucleico) que son esenciales como reservorio energético para el normal funcionamiento de las células, como polímero estructural fundamental en la estructura de los organismos vegetales y ácidos nucleicos encargados de todas las instrucciones genéticas celulares respectivamente (Solomon, Berg, & Martin, 2013). Además de los polímeros naturales, existen

polímeros sintéticos también llamados plásticos que son utilizados en distintas actividades diarias, desde materiales de construcción, piezas mecánicas y embalajes. (Salinas & Rony, 2010)

Sin embargo, los desechos plásticos representan un grave problema ambiental en todo el mundo debido a su enorme crecimiento y a esfuerzos por reciclarlos que no son suficientes (Proaño & Crespo, 2009), la necesidad de soluciones alternativas genera métodos de reciclaje térmico como la pirólisis que es el aprovechamiento energético en donde cualquier tipo de plástico es usado como combustible debido a su elevado poder calorífico y se descompone en ausencia de oxígeno con temperaturas comprendidas entre 400 °C y 1000 °C, obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechables en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos. (Aracil, 2008)

Este es un proceso que en los años 80 se desarrolló en Japón la pirólisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad, en España se comprobó que a mayores temperaturas se forman compuestos térmicamente más estables, en Colombia al pirolizar los residuos sólidos municipales se obtuvieron productos con alto poder calorífico (Mancheno, y otros, 2016). En Ecuador en la investigación de (Proaño & Crespo, 2009) utilizando polietileno de alta densidad se obtuvo diésel, kerosene y gasolina contenida en la fracción líquida.

1.3. Formulación del problema

Actualmente el mundo se encuentra en una constante lucha por disminuir el calentamiento global, según estudios realizados 8 millones de toneladas de desechos por año llegan a los mares y océanos, se desconoce la cantidad exacta de plástico en los mares, pero se estima que, entre 5 y 50 mil millones de piezas de plástico, excluidas las que se encuentran en el fondo del mar o en las playas. (Estévez, 2019)

El ser humano intenta disminuir la contaminación causada por los desechos de esta manera es común implementar las tres R, que consisten en: reducir, reutilizar y reciclar; el

objetivo principal para reciclar las botellas de plástico es porque sus restos tardan entre 100 y 1000 años en degradarse, ya que los plásticos no se disuelven fácilmente. Asimismo, si se recicla el plástico técnicamente se consume menos materia prima, energías no renovables y recursos naturales. (Redes, 2019)

Los plásticos y los combustibles derivados del petróleo básicamente son hidrocarburos constituidos de átomos de carbono e hidrógeno, presentando estructuras moleculares similares a los hidrocarburos que constituyen la gasolina y el gasóleo. Investigaciones realizadas han demostrado la posibilidad de convertir los desechos plásticos urbanos en combustibles. (Miandad, y otros, 2018)

1.4. Descripción resumida del proyecto

El objetivo del presente proyecto fue diseñar y construir un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible a partir de polímeros urbanos de reciclaje, para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe sede Latacunga. Para ello se plantó realizar el proceso que se detalla en la figura 1, en el que, utilizando polímeros de desecho urbano, se realiza un proceso de reacción por pirólisis para obtener combustible.

Figura 1

Producción de combustible a partir de polímeros urbanos de reciclaje



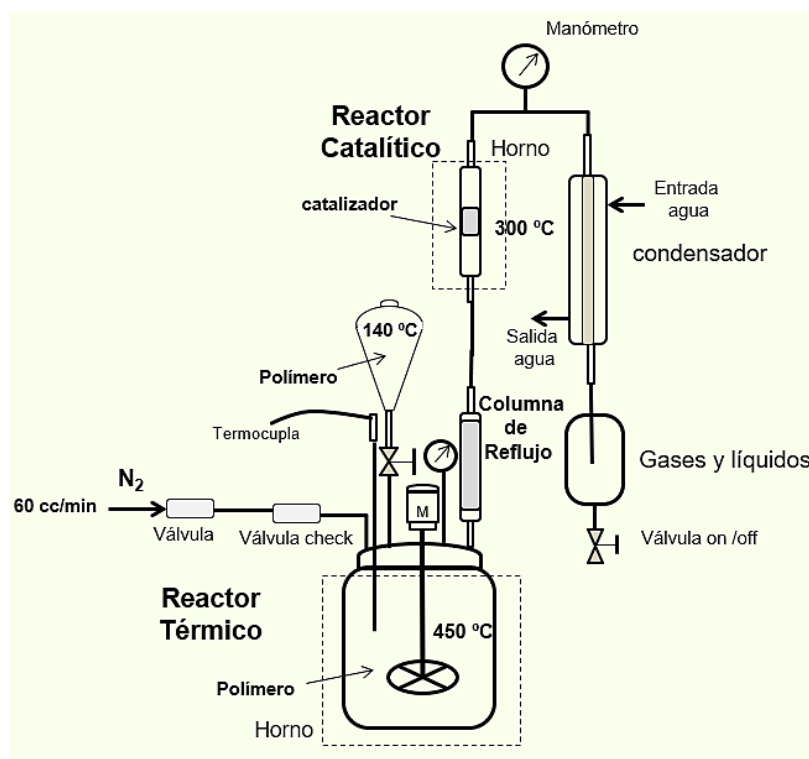
Nota. Esta figura representa la producción del combustible a partir de polímeros urbanos de reciclaje. Tomado de *Pirólisis*, por B. Aparicio, 2019.

El proyecto partió de la investigación sobre el diseño del reactor por pirólisis, considerando la metodología de recipientes a presión establecido en el código ASME sección VIII división 1, en el que se consideró variables como la presión, temperatura y esfuerzos. Mediante técnicas de diseño concurrente se seleccionó componentes secundarios del reactor como el motor, aspas, manómetros, válvulas ON/OFF.

Se realizaron cálculos a partir de dimensiones y volúmenes para determinar el espesor de pared de los recipientes y las presiones máximas que soportan, se realizó el diseño en un software CAD considerando los cálculos realizados de los subsistemas de reacción, alimentación, pesaje, entrada de nitrógeno, agitación, alivio, columna de reflujo, condensación, depósito como se visualiza en la figura 2 y la simulación de cada componente en un software CAE para evaluar los esfuerzos máximos de Von Mises, deformaciones y factores de seguridad.

Figura 2

Planta de producción de combustible



El reactor térmico principal tiene una temperatura de diseño de 550 °C, y está conformado de resistencias eléctricas (calefacción) y un aislante (fibra cerámica) en el exterior para conservar la temperatura y por medio del agitador distribuir la temperatura por todo el reactor, para ello se seleccionó un software CAE para realizar una simulación de la transferencia de calor en el reactor térmico principal, el sistema de alimentación, y el intercambiador de calor, y una simulación de flujo para verificar el funcionamiento del sistema. Para la construcción del sistema de reacción se basó en el diseño y los planos obtenidos en el software CAD, después se procedió a la unión de los componentes utilizando diversas técnicas de manufactura y se implantó la sujeción o conexión de los diversos componentes mecánicos para el correcto funcionamiento del sistema de reacción por pirólisis.

Finalmente, se realizaron varias pruebas de funcionamiento en la que se tomaron datos, con la finalidad de determinar valores óptimos de funcionamiento, se realizó una cromatografía GCMS al producto obtenido y se lo analizó tomando en consideración la opinión de expertos en el área y de evidencias de trabajos de investigación previos para obtener combustible.

1.5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe Sede Latacunga.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir los parámetros operacionales que se deben utilizar en el proceso de pirólisis.
- Establecer alternativas del diseño mecánico para el sistema de reacción por pirólisis.
- Realizar el diseño CAD del sistema de reacción por pirólisis.

- Realizar la simulación de transferencia de calor en el reactor térmico principal, utilizando un software CAE.
- Seleccionar el material y los componentes normalizados para la construcción del sistema de reacción.
- Validar la hipótesis mediante el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas.

1.6. Justificación e importancia

La contaminación causada por el desecho de plásticos, es una problemática a nivel mundial y es importante el compromiso de todos los países para erradicar este problema; en lo referente al Ecuador, a partir de lo establecido en el *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 Toda una Vida* con el eje 2: “Economía al servicio de la sociedad”, en el “Objetivo 5: Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sustentable de manera redistributiva y solidaria” (Desarrollo, 2017, p. 80).

El llamado es a consolidar el cambio hacia una estructura productiva sofisticada y diversa, con actividades de mayor valor agregado e intensidad tecnológica que, simultáneamente, respondan a los acuerdos sobre la sostenibilidad ambiental como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP21), para, de esta forma, encaminarnos a una producción más limpia y eficiente (Desarrollo, 2017, p. 81).

El desarrollo de la Investigación Científica y Tecnológica que tiene como objetivo satisfacer las necesidades y ayudar a solucionar problemas de la sociedad, es un pilar fundamental de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por este motivo se genera la necesidad de poseer un sistema de reacción de pirólisis para la producción de combustibles (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2019).

El diseño y construcción de un reactor permitirá realizar el proceso de pirólisis para la obtención de combustible; la materia prima utilizada serán las botellas de plástico, de esta manera se pretende desarrollar un proyecto innovador y de gran impacto para solucionar una problemática mundial como es la contaminación causada por plásticos que la humanidad despilfarra de manera constante y que va en aumento con el pasar del tiempo.

1.7. Hipótesis

¿El diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis a través de polímeros urbanos permitirá obtener combustible?

1.8. Variables de la investigación

1.8.1. Variable independiente

- Sistema de reacción de pirólisis.

1.8.2. Variable dependiente

- Producción de combustible.

Capítulo II

2. Proceso por pirólisis de plástico

2.1. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas que se forman por la unión de pequeñas moléculas denominadas monómeros, que se unen mediante reacciones de polimerización (Garrido, 2013). Los polímeros son componentes de diversos materiales en los organismos vivos, en minerales como cuarzo, diamante, y feldespato y en materiales artificiales como el vidrio, papel, plásticos y gomas. Estas macromoléculas son formadas por millones de monómeros, que son unidades químicas más simples (Rogers, 2021).

2.1.1. *El polipropileno (pp)*

Es un compuesto formado por la polimerización del propileno (C_3H_6). Es uno de los plásticos más comercializados por sus excelentes propiedades. El PP es versátil y económico, lo que lo convierte en una parte clave del grupo de plásticos. Además de esto, tiene buenas propiedades, tanto químicas como mecánicas, que lo hacen muy resistente a las condiciones ambientales (Garrido, 2013).

Entre las ventajas más relevantes del PP se mencionan las siguientes (Envaselia, 2018):

- Buena relación coste/beneficio.
- Elevado punto de fusión.
- Adecuado para trabajar a altas temperaturas.
- Excelente aislante térmico.
- Alta resistencia mecánica.
- Baja absorción de humedad.
- Resistencia química.
- Gran versatilidad.

- Material ligero.
- Utilizado como aislante eléctrico

Gracias a su gran versatilidad y su alta resistencia mecánica el polipropileno se emplea en piezas y componentes automotrices como parachoques y cajas de baterías; películas y laminas (films); aislamiento para componentes eléctricos u electrónicos; envases y embalaje de alimentos, accesorios, cosméticos, medicamentos; material textil como alfombras, tapetes, cuerdas; equipamiento médico y de laboratorio; para la fabricación de bombas y tuberías; artículos para el hogar y recipientes (Envaselia, 2018).

2.2. Proceso por pirólisis para la obtención de combustible

2.2.1. Pirólisis

Es la técnica de reciclaje en el que los residuos sólidos son degradados en una atmósfera inerte en ausencia de oxígeno. Al ejecutarse sobre plásticos se consiguen fracciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos, cuya composición dependerá de las condiciones de operación utilizadas (Hernández, 2007). En la parte gaseosa se forman cadenas cortas de carbonos que no son condensables a temperatura ambiente, los productos condensables son aquellos que pasaron de un estado gaseoso a líquido o viceversa como la gasolina y el diésel, estos productos volátiles presentan una amplia gama de aplicaciones comerciales (Panda, Singh, & Mishra, 2010).

En la fracción sólida se la conoce como residuo carbonoso que está constituido principalmente por carbón y representa la pérdida total de hidrógeno del material de origen, además de que a diferentes condiciones como una calefacción a baja temperatura o una presión demasiado alta o baja produce que el producto no se degrade completamente y es posible encontrar parte del material original que posteriormente se solidifica que posee la misma estructura química que el polímero original y un residuo orgánico caracterizado por la presencia de anillos cíclicos y aromáticos (Williams & Williams, 1999).

Finalmente, la parte condensada que representa los productos más pesados que no pueden permanecer gaseosos del proceso de pirólisis es la fracción líquida que está formada por cadenas más largas de hidrocarburos (Corma, Bermúdez, Martínez, & Ortega, 2002), esta fracción contiene compuestos que son comparables a los presentes en las gasolinas, pero a su vez contiene una gran variedad de diferentes productos y es necesario refinarlos para reducir el espectro de compuestos y aproximarlos a la composición de las gasolinas comerciales, como ceras con carbonos mayores a 22 ($C_{22}-C_{55}$), sin embargo si los líquidos que se obtienen del proceso de pirólisis tienen hidrocarburos en el rango de la gasolina compuesto de 5 a 12 carbonos (C_5-C_{12}) o Diesel compuesto de 13 a 21 carbonos ($C_{13}-C_{21}$), se puede utilizar directamente como fuel para el transporte (Arandes, Ereña, Bilbao, López-Valerio, & De la Puente, 2003).

En el proceso de pirólisis las ventajas principales es la obtención de materias primas para la elaboración de productos químicos y la generación de energía, también representa dificultades como al momento de la degradación de los plásticos puesto que estos presentan una conductividad térmica baja y eleva la energía necesaria para que el proceso de pirólisis sea más eficiente, es por ello que aunque el proceso de pirólisis es una excelente técnica para el reciclado de plásticos se debe agregar algunas mejoras en el proceso para optimizar la energía utilizada y la cantidad de combustibles líquidos que se obtendrán, ya que la proporción de las fracciones sólida, líquida y gaseosa depende de una serie de variables a tomar en cuenta (Hernández, 2007).

2.3. Factores relacionados con el proceso de pirólisis plástica

El proceso de pirólisis es complejo porque se producen descomposiciones de la materia por reacciones primarias y secundarias al azar lo que influye en la proporción en la distribución molecular de las fracciones de gas, líquido y sólido. Si se busca optimizar la producción, los factores influyen de manera que aumentan o disminuyen el rendimiento de las reacciones en el reactor y provocan una interpretación equivocada de los resultados obtenidos (Hernández, 2007).

Los factores principales que influyen en el proceso de pirólisis y en la distribución molecular de los productos finales son:

2.3.1. Temperatura de reacción

Es una de las variables más importantes, cuanto mayor es la temperatura mayor será el craqueo producido de tal manera que se generarán más productos volátiles frente al resto de compuestos que se generen y la temperatura es una influencia significativa de los rendimientos de las distintas fracciones (Gao, 2010).

Según Hernández, dependiendo de la temperatura se generan distintas fracciones del producto final y son (2007, p. 77):

- De 220 a 330 °C la fracción obtenida mayoritariamente es la fracción sólida porque la descomposición del material se realiza a bajas temperaturas.
- De 330 a 450 °C se generan rendimientos significativos de la fracción líquida, y la gaseosa se genera en menor proporción.
- Mayor a 500 °C se produce una mayor descomposición del material y se obtiene un mayor rendimiento de la fracción de gas.

2.3.2. Velocidad de calefacción

La velocidad de calefacción se puede clasificar en dos grupos como pirólisis lenta que aumenta la fracción sólida descendiendo el rendimiento de gases y líquidos y va en orden de K/min o incluso K/h y pirólisis flash que favorece la formación de productos líquidos y gaseosos y emplea velocidades de calefacción superiores a 250 K/s (Hernández, 2007).

2.3.3. Tiempo de residencia de los gases en el medio de reacción

En el proceso de degradación del polímero los compuestos que se generan deben atravesar el interior del reactor hasta la salida de este, por lo que en ese trayecto está sometido a condiciones de temperatura y presión similares a las del interior del reactor por lo que el proceso

de craqueo continuaría a lo largo del reactor lo que podría modificar el rendimiento y la distribución de los productos generados (Hernández, 2007).

A medida que disminuye el tiempo de descomposición, el tiempo de residencia de los gases influye considerablemente sobre los productos volátiles obtenidos, por ejemplo, en una degradación flash el proceso de pirólisis se efectúa en pocos segundos, este parámetro en gran medida puede afectar la distribución y rendimiento de los productos esperados (Lee, y otros, 2003).

2.3.4. Cantidad de muestra y tamaño de partícula

Son parámetros que afectan la transferencia de materia y la transmisión de calor en el reactor porque las partículas pequeñas se calientan mucho más rápido que las grandes por lo que cuanto menor es el tamaño de la partícula degradada la fracción líquida y gaseosa aumentan, en cambio la sólida es menor (Karaduman, Şimşek, Çiçek, & Bilgesü, 2001).

2.3.5. Densidad y humedad de la muestra

Una densidad muy elevada conduce a una captura de productos como alquitranes provocando un descenso de producción de la fracción sólida e hidrocarburos pesados, si la muestra contiene bastante humedad gran parte de la energía suministrada se perderá secando el material por lo que la descomposición se producirá a una temperatura menor a la nominal y hará falta un aumento en la energía utilizada en la pirólisis normalmente (Hernández, 2007).

En la tabla 1 se presenta el proceso de pirólisis y los productos obtenidos mayoritariamente considerando algunos factores vistos anteriormente (Jung & Fontana, 2006).

Tabla 1*Proceso de pirólisis y productos obtenidos*

Proceso	Tamaño de partícula	Humedad	Velocidad calefacción	Tiempo de residencia	Temperatura °C	Productos Obtenidos
Carbonización lenta	Grande	-	Muy lenta	Días	450 – 600	Carbón vegetal
Pirólisis lenta	Mediana <200 mm	< 15%	10 -100 K/min	10-60 min	450 – 600	Gas, aceite, carbón
Pirólisis rápida	Pequeña <1 mm	< 10%	Superior a 1000 K/s	0.5-5 s	550 – 650	Gas, aceite, carbón
Pirólisis flash	Pequeña <1 mm	< 10%	Superior a 10 000 K/s	<1 s	450 – 900	Gas, aceite, carbón

Nota. En esta tabla se muestra el proceso de pirólisis y productos obtenidos. Tomado de *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: Converting waste plastics into diesel and other fuels* (p.253), por C.G. Jung & A. Fontana, 2006.

2.3.6. Tipo de contacto material – catalizador

El tipo de contacto modifica la actividad del catalizador variando la distribución de los productos que se obtengan en el proceso, de esta manera un contacto en los materiales por impregnación incrementa la extensión de la degradación del polímero y se reduce el tiempo de craqueo (Chiu & Cheng, 1999).

2.4. Tipos de reactores

En el proceso de pirólisis térmica existen diferentes tipos de reactores, cada uno tiene su caracterización que depende de diversos factores como el tiempo de residencia, la tipología de contacto con la muestra a desintegrar, el catalizador o las cinéticas de reacción; dichos factores influyen directamente en los resultados a obtener (Obando, 2015).

Se detallan las características más relevantes de los diferentes tipos de reactores utilizados en procesos de pirólisis:

2.4.1. Reactor discontinuo de tanque agitado (RDTA) o reactor batch

El reactor batch como se visualiza en la figura 3 es utilizado en pirólisis térmica, cuenta con un mecanismo de agitación mecánica; depende de la cantidad de materia prima que se ingresa por única vez, es decir que no es un proceso semicontinuo, ya que no existe una realimentación del polímero. No tiene la presencia de nitrógeno, lo que genera compuestos secundarios no deseados. El reactor batch es comúnmente implementado por su bajo costo de construcción y es utilizado en operaciones a pequeña escala para experimentar en procesos nuevos (Mancilla Aguilar, 2019).

Figura 3

Reactor tipo batch



Nota. Esta figura representa el reactor tipo batch. Tomado de *Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS)* (p.19), por G. A. Obando, 2015.

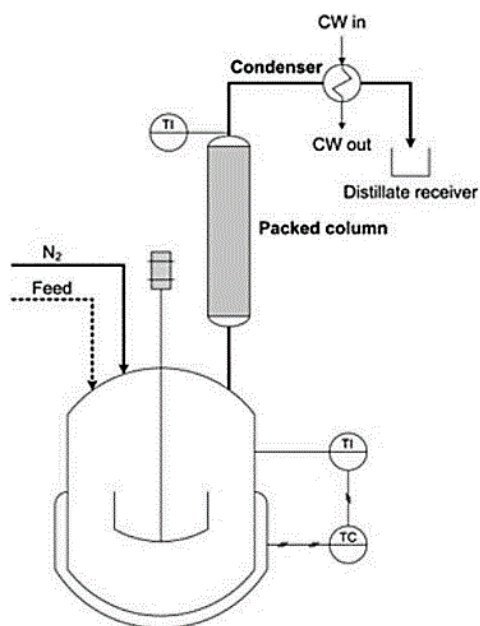
2.4.2. Reactor semicontinuo de tanque agitado (RSCTA) o reactor semibatch

El reactor semibatch como se puede ver en la figura 4, tiene características semejantes al reactor tipo batch, la principal diferencia es que posee un flujo de gas inerte, generalmente es el

nitrógeno (N_2), el mismo que tiene la capacidad de desplazar y guiar los flujos volátiles desprendidos por la reacción; al implementar esta particularidad se disminuyen las reacciones secundarias que comúnmente aparecían usando el reactor batch (Garrido, 2013).

Figura 4

Reactor tipo semi batch



Nota. Esta figura representa el reactor tipo semi batch. Tomado de *Synthesis and kinetic modeling of biomass-derived renewable polyesters* (p.6), por (Rodríguez, y otros, 2016)

Generalmente los reactores tipo batch y semi batch son seleccionados por la simplicidad en su diseño e implementación, que se refleja en un ahorro significativo al momento de la fabricación del sistema. Una notable desventaja del reactor semi batch es que requiere tiempos de reacción prolongados; por ejemplo, cuando el residuo carbonoso denominado coque se adhiere a las paredes internas del reactor, este dificulta la efectiva transferencia de calor, por ende, se elevan los tiempos de reacción lo que resulta en altos costos operacionales (Obando, 2015). Estos reactores disminuyen la efectividad del catalizador, lo que hace que los rendimientos sigan siendo similares entre las reacciones térmicas y catalíticas (Garrido, 2013).

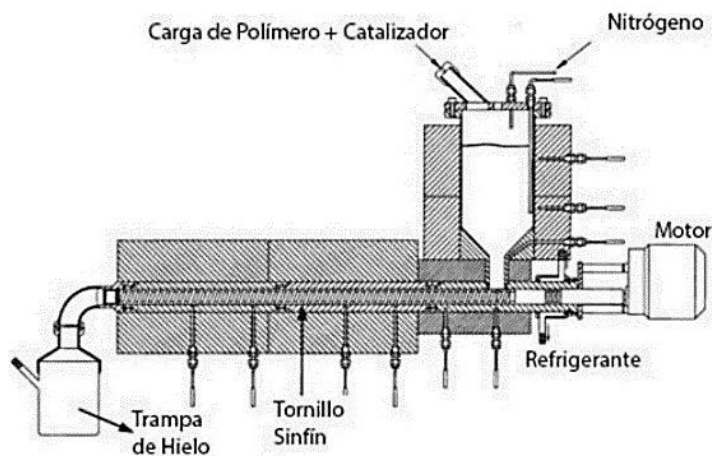
2.4.3. Reactor de tornillo

Este reactor como se visualiza en la figura 5, realiza el proceso de pirólisis de forma continua porque la materia prima es suministrada a través de una tolva de entrada, por la cual ingresan los reactivos que descienden hasta un tornillo sinfín, éste traslada todos los compuestos por medio de tonel calefaccionado en donde se realiza el proceso de pirólisis térmica. Al utilizar el reactor tipo tornillo se pueden obtener productos bien definidos. En este sistema, para mejorar la transferencia de calor se adicionan esferas metálicas calentadas que son trasladadas por el tornillo (Aguado, Serrano, Escola, & Garagorri, 2002).

El reactor de tornillo es utilizado en la degradación de LDPE, o mezclas de LDPE y aceite lubricante (Serrano, Aguado, Escola, & Garagorri, 2003).

Figura 5

Reactor de tornillo



Nota. Esta figura representa el reactor de tornillo. Tomado de *Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros* (p.30), por P. J. Garrido, 2013.

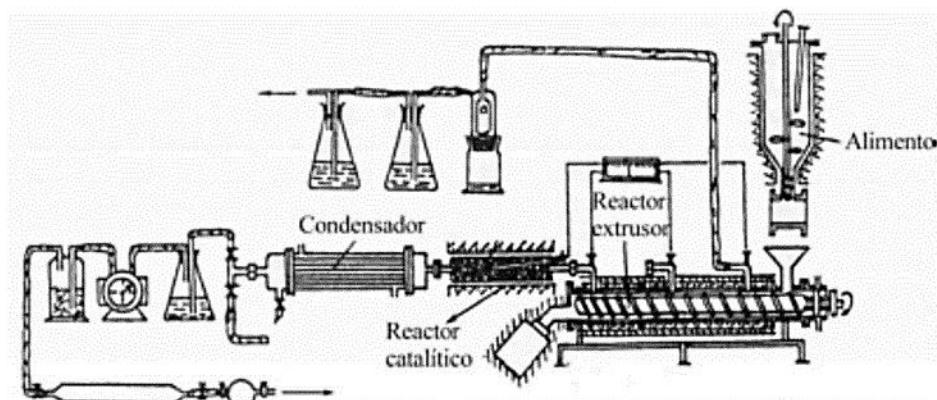
2.4.4. Reactor extrusor

Como se observa en la figura 6, es un equipo formado por un sistema de giro y posee un horno que calienta todo el sistema, se introduce el material fundido para obtener una primera

descomposición de la materia prima, después se conduce a un segundo reactor, para continuar con la descomposición térmica o catalítica. El reactor extrusor es usado habitualmente en investigaciones para la degradación de polímeros (Vasile, y otros, 2000).

Figura 6

Reactor extrusor



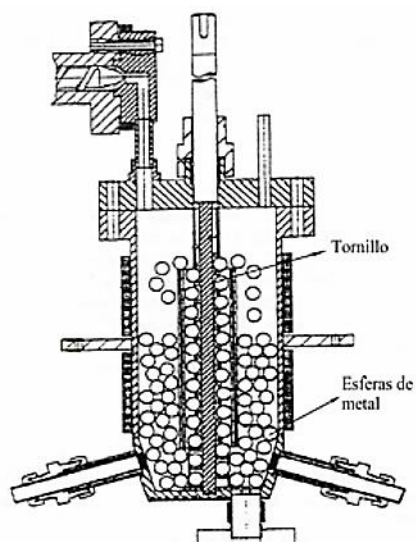
Nota. Esta figura representa el reactor extrusor. Tomado de *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados.* (p.82), por M. R. Hernández, 2007.

2.4.5. Reactor de esferas

Este tipo de reactor como se presenta en la figura 7 es diferente ya que posee un recipiente en donde se encuentra un lecho de esferas de metal, también tiene un tornillo que mediante su movimiento giratorio provoca la circulación de las esferas metálicas que ayudan en la transmisión de calor (Bockhorn, Hentschel, Hornung, & Hornung, 1999).

Figura 7

Reactor de esferas



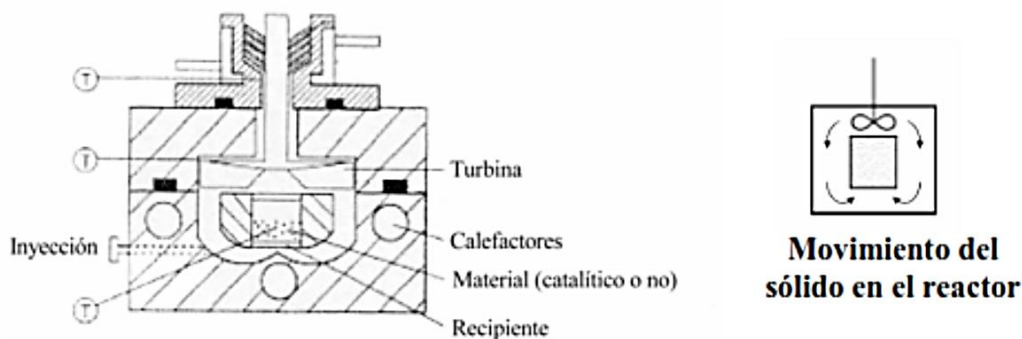
Nota. Esta figura representa el reactor de esferas. Tomado de *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados.* (p.86), por M. R. Hernández, 2007.

2.4.6. Reactor riser

En la figura 8 se muestra un reactor riser a escala de laboratorio, en cuyo diseño se puede notar un recipiente donde se inserta el material para la fluidización del proceso de descomposición. Su principio de funcionamiento es la circulación interna de un material que puede ser catalítico o no. Tiene una turbina que al moverse genera un vacío en el interior del reactor, que facilita el movimiento de la materia prima. El material para degradar entra en contacto directo con el material fluidizado. Actualmente solo se ha implementado a escala de laboratorio (Hernández, 2007).

Figura 8

Reactor riser a escala de laboratorio



Nota. Esta figura representa el reactor riser. Tomado de *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados.* (p.87), por M. R. Hernández, 2007.

2.4.7. Reactor de lecho fijo

Este tipo de reactor es comúnmente utilizado en reacciones catalíticas heterogéneas, por este motivo es necesario que el catalizador sea ubicado en una posición fija con respecto al reactor; presenta desventajas relacionadas con las reacciones de pirólisis de plásticos, por lo general estos compuestos tienen malos coeficientes de conductividad térmica y altas viscosidades, estas características dificultan el proceso de carga del polímero en el reactor (Garrido, 2013). Por lo tanto, es común la implementación de sistemas que faciliten el proceso de carga. Como lo señala (Masuda, Kuwahara, Mukai, & Hashimoto, 1999) lo más habitual es efectuar una etapa previa de pirólisis térmica con el objetivo de conseguir productos líquidos o gaseosos.

2.4.8. Reactor de lecho fluidizado

Este reactor es una opción interesante en los procesos catalíticos en donde el catalizador se desactiva con frecuencia y requiere una regeneración. Es considerado principalmente para ser implementado en el ámbito industrial y en procesos a gran escala, porque permite que la pirólisis se ejecute de forma continua (Garrido, 2013).

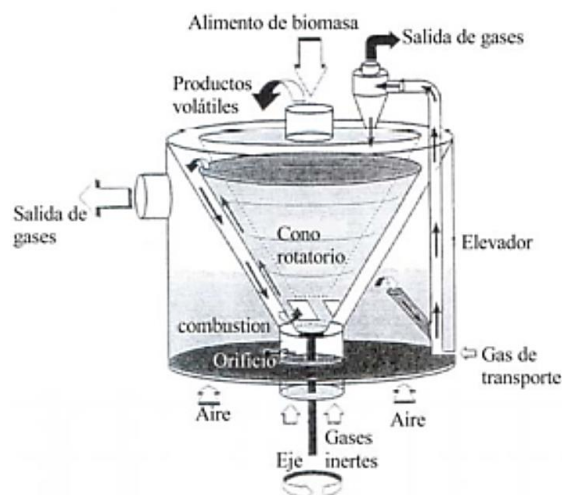
La facilidad de control de la temperatura ha llevado al uso de este sistema en procesos altamente exotérmicos y en aquellos donde el control preciso de la temperatura es un factor importante (Conesa Ferrer, 2010).

2.4.9. Reactor de cono rotatorio

Este reactor como se visualiza en la figura 9 combina una zona de pirólisis, en la que la reacción es endotérmica, y otra zona de combustión, en la que se genera parte de la energía necesaria para el proceso de craqueo. Este sistema tiene su origen en la circulación interna del lecho fluidizado, debido a la acción de fuerzas centrífugas. Los productos volátiles obtenidos durante el proceso de pirólisis se evacuan por la parte superior del cono (Hernández, 2007).

Figura 9

Reactor de cono rotatorio acoplado a una zona de combustión



Nota. Esta figura representa el reactor de cono rotatorio. Tomado de *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados.* (p.87), por M. R. Hernández, 2007.

2.5. Transferencia de calor

La transferencia de calor se produce cuando dos cuerpos que tienen distinta temperatura entre sí entran en contacto, entonces desde el cuerpo que tiene más temperatura se transmite calor al cuerpo que posee menos temperatura. En general, existen tres modos para la transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Conesa, 2013).

2.5.1. Mecanismos de transferencia de calor

Conducción. Es el método de transferencia de calor a nivel atómico a través de la materia por acción molecular, debido a la colisión de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas entregan energía a las menos energéticas. La conducción de calor solo sucede si existe diferencia de temperatura entre los cuerpos (Conesa, 2013).

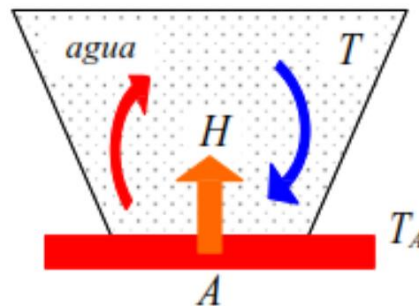
Convección. Es el método de transferencia de calor a través del movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Es natural cuando es originada por la diferencia de la densidad de la materia; o forzada cuando la materia se ve obligada a desplazarse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire por acción de un ventilador. Solo ocurre en líquidos y gases en los que los átomos y moléculas pueden moverse libremente en el medio (Conesa, 2013).

La cantidad de calor transmitido H por convección, se rige por la ley de enfriamiento de Newton:

$$H = h A (T_A - T)$$

Donde: h es el coeficiente de convección $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

A es la superficie que brinda calor con temperatura T_A , al fluido cercano que posee una temperatura T , como se visualiza en la figura 10.

Figura 10*Proceso de convección*

Nota. Esta figura representa el proceso de convección. Tomado de *Mecanismos de transferencia de calor.* (p.7), por J. A. Conesa, 2013.

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transmite desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transmite desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$) (Conesa, 2013).

Radiación. Es uno de los mecanismos fundamentales de la transferencia de calor. Es la energía que transmite un cuerpo debido a su temperatura. Esta energía es la radiación electromagnética generada por el movimiento térmico de partículas cargadas. Debido a este efecto, todos los cuerpos (excepto aquel cuya temperatura es el cero absoluto) emiten radiación electromagnética, cuya intensidad depende de la temperatura y la longitud de onda considerada (Conesa, 2013).

2.5.2. Transferencia de calor empleando software CAE

El análisis térmico es un factor importante en el diseño de mecanismos, ya que se puede calcular en el diseño y su alrededor la temperatura, también se puede considerar la transferencia de calor en el interior de los componentes. Se considera trascendental ya que muchos equipos y materiales tienen propiedades dependientes de la temperatura (Pérez Jiménez, 2018).

Para el análisis térmico por medio de software CAD se aplica el método de elementos finitos, con el fin de calcular la distribución de temperatura en una estructura sólida, teniendo como entradas térmicas (cargas de calor), salidas térmicas (pérdidas de calor) y barreras térmicas (resistencia al contacto térmico) del diseño. Comúnmente se utilizan tres métodos de transferencia de calor: por convección que está determinada por un coeficiente de película en la superficie, por conducción ocurre cuando los cuerpos están en contacto y por radiación cuando se tiene emisividad de la superficie, es decir cuando los cuerpos no están en contacto (Intelligy, 2021).

El software CAE tiene un paquete para el análisis térmico, el mismo que permite predecir el comportamiento del calor en el diseño de un mecanismo y de ser necesario se puede modificar la geometría, el tipo de material o cualquier parámetro físico que esté alterando las condiciones de trabajo óptimas para el mecanismo (Intelligy D. S., 2019).

El software CAE calcula los campos de temperatura en estado estable o transitorio debido a (Intelligy, 2021):

- Temperaturas iniciales o fijas aplicadas.
- Entradas o salidas de flujo/potencia térmica.
- Tasas de convección de la superficie.
- Radiación: eliminación del calor de los sistemas.
- Resistencia al contacto térmico entre los componentes.

Se puede calcular fácilmente las tensiones térmicas, con la finalidad de garantizar el rendimiento y seguridad óptimos del producto (Intelligy, 2021).

Basados en el factor del tiempo, se tienen dos tipos de análisis de transferencia del calor (Systemes, 2021).

- **Análisis térmico de estado estable.**

Únicamente se tiene interés por conocer las condiciones térmicas del cuerpo cuando alcanza un estado de equilibrio térmico. No es necesario saber el tiempo que le lleva alcanzar ese estado. En este equilibrio térmico, la energía térmica que ingresa a cada punto del cuerpo es igual a la energía térmica de salida. La conductividad térmica es la única propiedad del material requerida para este análisis (Systemes, 2021).

- **Análisis térmico transitorio.**

En este análisis, se tiene interés por conocer el estado térmico del modelo como una función de tiempo, y se puede calcular especificando las propiedades de los materiales, como conductividad térmica, densidad y el calor específico. También, se debe especificar las temperaturas iniciales, el tiempo de solución y el incremento del tiempo. En el análisis transitorio, se relaciona la energía térmica y el flujo de calor con un termostato, el mismo que se encuentra determinado por un rango de temperaturas en un lugar concreto. Para cada intervalo de tiempo, el software activa o desactiva la condición de energía térmica o flujo de calor, tomando de referencia la temperatura del lugar donde se localiza el termostato (Systemes, 2021).

2.6. Norma para el diseño y construcción de recipientes a presión

Para la construcción del sistema de reacción por pirólisis se debe garantizar la fiabilidad de los componentes mecánicos y los elementos estructurales, por ello se parte de una basta investigación acerca del diseño de recipientes a presión. En la actualidad existen normas que regulan las diferentes etapas como: diseño, construcción, operación y mantenimiento de los recipientes a presión (Massa, Giró, & Giudici, 2015).

En la tabla 2 se presentan las principales normativas que regulan el diseño de recipientes a presión (Laurens Arredondo, 2019).

Tabla 2

Normativas que regulan el diseño de recipientes a presión

Institución	Código	País
ASME	ASME Boiler & Pressure Vessel Code	USA
BSI	BS 5500 Unfired Fusion Welded Pressure Vessel	Reino Unido
AD	AD2000 – Merblatter	Alemania
ANPCPC	ANCC	Italia
DS	RTOD / Regeis Voor Toestellen	Países Bajos
SPVC	Tryekkarlskommissionen	Suiza
SAA	AS 1210: Unfired Pressure Vessel	Australia
BSI	IBN Construction Code for Pressure Vessel	Bélgica
MITI	JIS B 8265	Japón
SNCTI	CODAP/ SNCT Construction Code for Unfired Pressure	Francia
SAC	GB 150	China
PE	EN 13445 - Directiva 97/23/CE	Unión Europea
BIS	IS 2825	India
KEA	Kepic MG	Corea
EASC	Gost R 52857	Rusia
NZS	NZ 1210	Nueva Zelanda
CSA	B5.1-R1	Canadá

Nota. Esta tabla muestra las normativas que regulan el diseño de recipientes a presión. Tomado de *Normas internacionales de diseño de recipientes a presión: Comparación de procedimientos para determinación de espesor mínimo requerido* (p.253), por L.A. Laurens, 2019.

En Ecuador, donde no se ha establecido una norma propia para el diseño de recipientes a presión, es común utilizar el código ASME (American Society of Mechanical Engineers).

La sección VIII – División 1 del código ASME está compuesta por tres subsecciones (The American Society of Mechanical Engineers, 2013):

Subsección A – Requerimientos generales.

Parte UG: Requerimientos generales para todos los métodos de construcción y todos los materiales.

Subsección B – Requerimientos relacionados con los métodos de fabricación de recipientes a presión.

Parte UW: Recipientes a presión fabricados por soldadura.

Parte UF: Recipientes a presión fabricados por forja.

Parte UB: Recipientes a presión fabricados por soldadura brazing.

Subsección C – Requerimientos relacionados con las clases de materiales.

Parte UCS: Recipientes construidos de aceros al carbono y de baja aleación.

Parte UNF: Recipientes fabricados con materiales no ferrosos.

Parte UHA: Recipientes construidos con aceros de alta aleación.

Parte UHT: Recipientes a presión construidos con aceros ferríticos con propiedades de tracción mejoradas por tratamiento térmico.

Es importante recalcar que los principios de diseño del código ASME División 1 se aplican para recipientes con presión de hasta 200 kg/cm^2 ó 19.61 MPa (Massa, Giró, & Giudici, 2015).

2.7. Reglas para la construcción de recipientes a presión

En la parte UG del código ASME se establecen los requerimientos para el diseño general de recipientes (Massa, Giró, & Giudici, 2015).

Se analizan los diferentes parámetros físicos que se consideran relevantes en el proceso de pirólisis como: presión, temperatura, cargas, esfuerzos entre otros.

2.7.1. Volumen de recipientes a presión

Para el cálculo del volumen total del reactor (V_{tc}), la norma ASME VIII – División 1, sugiere que al volumen del cilindro (V_c) se adicione un volumen de seguridad (V_{seg}), entonces se establece la ecuación (1).

$$V_{tc} = V_c + V_{seg} \quad (1)$$

Donde: V_{tc} : Volumen total del reactor

V_c : Volumen del cilindro

V_{seg} : Volumen de seguridad

El código ASME establece que el volumen de seguridad sea el 20% del volumen del cilindro, por lo tanto, se expresa la ecuación (2):

$$V_{seg} = V_c \cdot 20\% = 0.2 \cdot V_c \quad (2)$$

2.7.2. Presión y temperatura

Los recipientes que cumplen los requerimientos de la parte de UG de la división 1, deben diseñarse para la condición más crítica de presión y temperatura simultáneas esperadas durante la operación normal (Massa, Giró, & Giudici, 2015).

Temperatura. Con respecto a la temperatura máxima y mínima no se debe exceder los límites establecidos en la tabla del material seleccionado (Massa, Giró, & Giudici, 2015).

Presión de operación (P_o). Según lo expresado por León “la presión de operación (P_o) es identificada como la presión de trabajo y es la presión manométrica a la cual estará sometido un equipo en condiciones de operación normal” (2001, p. 10).

Presión de diseño (P). Para León “la presión de diseño (P) es el valor que se utiliza en las ecuaciones para el cálculo de las partes constitutivas de los recipientes sometidos a presión, dicho valor será el siguiente:” (2001, p. 10).

$$Si: P_o > 2068427.184 [Pa] \quad P = (P_o + P_H)(1.1) \quad (3)$$

$$Si: P_o \leq 2068427.184 [Pa] \quad P = P_o + P_H + 206842.77 [Pa] \quad (4)$$

Donde:

P : Presión de diseño [Pa].

P_o : Presión de operación [Pa].

P_H : Presión hidrostática [Pa].

Presión hidrostática (P_H). Al calcular la presión de diseño (P), se debe considerar la presión hidrostática (P_H), debida a la columna del fluido que se manipula, si éste es líquido sobre todo en recipientes cilíndricos verticales (León Estrada, 2001).

La presión hidrostática del fluido es generada por la altura del producto, y se obtiene evaluando en el anexo 1, para determinar la presión de cualquier otro fluido diferente del agua se deberá multiplicar a los valores de las tablas por la densidad específica del fluido en cuestión (Megyesy, 1992) y si el peso específico del producto es menor al del agua, se utiliza el peso específico del agua para calcular la presión hidrostática del producto (León Estrada, 2001).

Según León “La presión de trabajo máxima permisible, se obtiene despejando P de las ecuaciones que determinan los espesores del cuerpo y las tapas, y usando como t el espesor real del equipo y su valor será el que resulte menor” (2001, p.11).

Evaluación del reactor térmico por presión externa. Para validar el diseño del reactor térmico por presión externa se calcula las relaciones L/D_o y D_o/t (León Estrada, 2001), y se utiliza la ecuación (5).

$$P_a = \frac{2AE}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)} \quad (5)$$

Donde:

P_a : Presión exterior máxima de trabajo permisible [Pa].

A : Factor determinado en el anexo 2.

E : Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño [GPa].

D_o : Diámetro interior [m].

t : Espesor real [m].

2.7.3. Cargas

En el diseño de recipientes sometidos a presión, se deben considerar las siguientes cargas según lo establece UG-22 del código ASME (Massa, Giró, & Giudici, 2015):

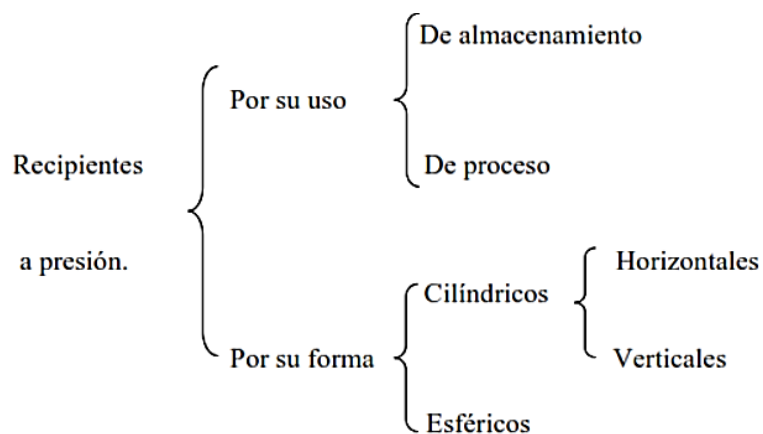
- Presión interna o externa.
- Peso del recipiente y su contenido (en operación y en ensayo).
- Cargas estáticas: pesos de equipos (bombas, cañerías, motores, otros recipientes, etc.).
- Cargas dinámicas debido a variaciones de presión, temperatura, equipos, etc.
- Fuerzas de la naturaleza: viento, nieve, hielo, sismos.
- Variaciones térmicas.
- Presiones anormales, provocadas por errores de operación.

2.7.4. Tipos de recipientes

En la figura 11 se presenta la clasificación de los diferentes tipos de recipientes a presión que existen.

Figura 11

Tipos de recipientes a presión



Nota. Esta figura muestra los tipos de recipientes a presión. Tomado de *Diseño y cálculo de recipientes a presión.* (p.12), por J. M. León, 2001.

Por su uso. Se puede clasificar en recipientes de almacenamiento y recipientes de procesos. Los primeros se utilizan para almacenar fluidos a presión, dependiendo su servicio son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc. Los recipientes de procesos tienen diferentes aplicaciones como: reactores, torres fraccionadoras, cambiadores de calor, torres de destilación, entre otros (León Estrada, 2001).

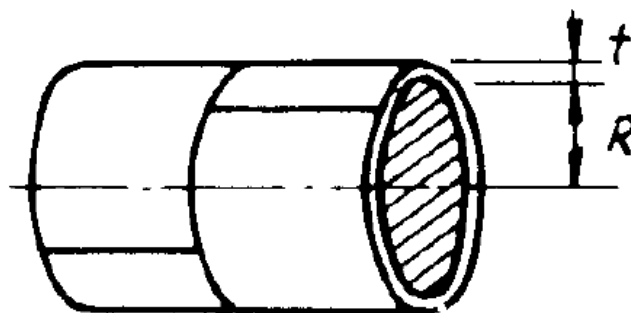
Por su forma. se pueden clasificar en recipientes cilíndricos o recipientes esféricos. Los recipientes cilíndricos pueden ser horizontales o verticales, y en casos particulares poseen chaquetas que aumentan o disminuyen la temperatura del fluido interno. Los recipientes esféricos son comúnmente utilizados como tanques de almacenamiento para grandes volúmenes a altas presiones, una desventaja notable de la forma esférica es su alto costo de fabricación en comparación a los recipientes cilíndricos (León Estrada, 2001).

2.7.5. *Cuerpos cilíndricos verticales*

El espesor y la presión admisible para el cuerpo cilíndrico de costura longitudinal, representado en la figura 12, se puede calcular a partir del valor del radio interno R .

Figura 12

Cuerpo cilíndrico de costura longitudinal



Nota. Esta figura representa el cuerpo cilíndrico de costura longitudinal. Tomado de *Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo.* (p.18), por E. Megyesy, 1992.

Para el cálculo del espesor de pared (t) se establecen las ecuaciones (6) y (7) (Megyesy, 1992).

$$t = \frac{P R}{SE - 0.6P} \quad (6)$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{S E t}{R + 0.6 t} \quad (7)$$

$$\text{Si: } t \leq R/2 \quad \text{ó} \quad P < 0.385 SE \quad (8)$$

Cuando se cumple la condición (8) se deben aplicar ecuaciones diferentes a la expresadas en (6) y (7) (Megyesy, 1992).

Donde:

P : Presión de diseño [Pa].

R : Radio interior de la tapa [m].

t : Espesor del cuerpo cilíndrico [m].

E : Eficiencia de la junta en las soldaduras.

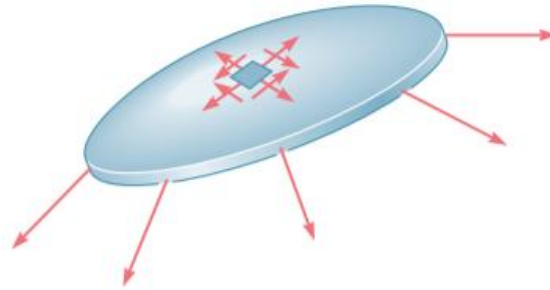
$P_{m\acute{a}x}$: Presión de trabajo máxima permisible [Pa].

S : Esfuerzo del material a la temperatura de diseño [MPa].

Esfuerzos generados en recipientes a presión de pared delgada. En los recipientes de paredes finas sometidos a presión se analiza las tensiones planas. Dado que sus paredes tienen poca resistencia a la flexión, se establece que las fuerzas internas ejercidas en una parte de la pared son tangentes a la superficie del recipiente, como se visualiza en la figura 13. Las tensiones totales en el elemento de la pared se encuentran contenidas en el plano tangente a la superficie del recipiente (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020).

Figura 13

Distribución de esfuerzos en recipientes de pared delgada sometidos a presión



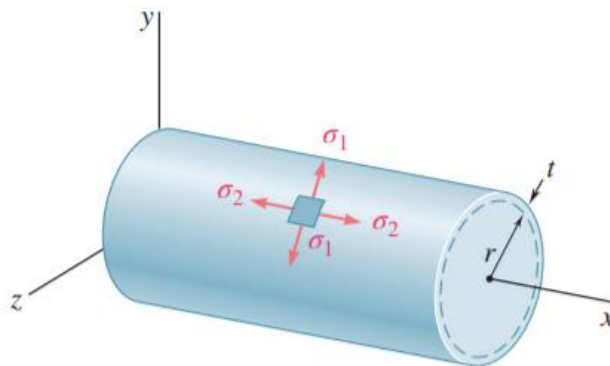
Nota. Esta figura representa los esfuerzos en recipientes de pared delgada sometidos a presión.

Tomado de *Mecánica de materiales*. (p.520), por F. Beer, R. Johnston, J. DeWolf, D. Mazurek, 2020.

Recipientes cilíndricos a presión. En la figura 14 se visualiza un recipiente cilíndrico, con radio interior r y espesor de pared t , que contiene un fluido a presión p (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020).

Figura 14

Recipiente cilíndrico presurizado



Nota. Esta figura muestra un recipiente cilíndrico presurizado. Tomado de *Mecánica de materiales*. (p.520), por F. Beer, R. Johnston, J. DeWolf, D. Mazurek, 2020.

La tensión σ_1 se denomina tensión de aro o esfuerzo circunferencial, mediante el análisis del diagrama de cuerpo libre se realiza el planteamiento de la ecuación de equilibrio (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020):

$$\sum F_z = 0: \quad \sigma_1(2t \Delta x) - p(2r\Delta x) = 0$$

Al resolver el esfuerzo circunferencial σ_1 se obtiene la ecuación (9):

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (9)$$

Donde:

σ_1 : Esfuerzo circunferencial [Pa].

p : Presión [Pa].

r : Radio interior [m].

t : Espesor de pared [m].

La tensión σ_2 se denomina tensión o esfuerzo longitudinal, también se realiza el análisis del diagrama de cuerpo libre y se plantea la ecuación de equilibrio (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020):

$$\sum F_x = 0: \quad \sigma_2(2\pi r t) - p(\pi r^2) = 0$$

Al resolver el esfuerzo longitudinal σ_2 se obtiene la ecuación (10):

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (10)$$

Donde:

σ_2 : Esfuerzo longitudinal [Pa].

p : Presión [Pa].

r : Radio interior [m].

t : Espesor de pared [m].

Cuando se analiza el círculo de Mohr para el elemento de un recipiente de presión cilíndrico se obtiene la ecuación (11) que es el esfuerzo cortante máximo (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (11)$$

Donde:

σ_2 : Esfuerzo longitudinal [Pa].

p : Presión [Pa].

r : Radio interior [m].

t : Espesor de pared [m].

2.7.6. Tipos de cabezales

Para cerrar los recipientes cilíndricos sometidos a presión, existen diferentes tipos de tapas, que son (León Estrada, 2001):

- Tapas planas.
- Tapas planas con ceja.
- Tapas únicamente abombadas.
- Tapas abombadas con ceja invertida.
- Tapas toriesféricas.
- Tapas semielípticas.
- Tapas semiesféricas.
- Tapas 80 – 10.
- Tapas cónicas.
- Tapas toricónicas.

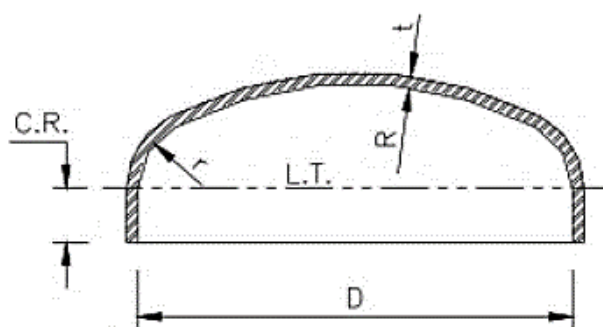
En el anexo 3 se visualizan las diferentes tipos de tapas puntualizadas en esta sección.

Después de una apropiada investigación se establece que la mejor opción para el diseño de la tapa superior del reactor térmico principal es la tapa semielíptica.

Tapa semielíptica. La tapa semielíptica como se visualiza en la figura 15, soporta mayores presiones que las tapas toriesféricas. El proceso de fabricación es el troquelado, su perfil describe una elipse con relación 2:1 (León Estrada, 2001).

Figura 15

Tapa semielíptica



Nota. Esta figura representa una tapa semielíptica. Tomado de *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. (p.16), por J. M. León, 2001.

Para el cálculo del espesor de la tapa semielíptica se utiliza la siguiente ecuación (12) (León Estrada, 2001).

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad (12)$$

Donde:

P : Presión de diseño [Pa].

D : Diámetro interior de la tapa [m].

E : Eficiencia de las uniones soldadas (ver anexo 4).

S : Esfuerzo máximo permisible del material del cabezal a tensión y a la temperatura de diseño [MPa].

t : Espesor mínimo requerido en la tapa [m].

En la tapa semielíptica, para calcular la presión de trabajo máxima permisible se utiliza la ecuación (13) (Megyesy, 1992).

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2SE t}{D + 0.2 t} \quad (13)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$: Presión de trabajo máxima permisible [Pa].

S : Esfuerzo máximo permisible del material del cabezal a tensión y a la temperatura de diseño [MPa].

E : Módulo de elasticidad del material usado [GPa].

t : Espesor [m].

D : Diámetro interior de la tapa [m].

Evaluación de los cabezales del reactor térmico por presión externa. Para verificar que los cabezales soportan vacío se ocupa la ecuación (14) considerando que los cabezales son de forma semielíptica 2:1.

$$P_a = \frac{0.0625 E}{\left(\frac{0.90D_o}{t}\right)^2} \quad (14)$$

Donde:

P_a : Presión exterior máxima de trabajo permisible [Pa].

E : Módulo de elasticidad del material usado [GPa].

D_o : Diámetro [m].

t : Espesor [m].

2.7.7. Eficiencia de las soldaduras (E)

Para León “La eficiencia de las soldaduras, se define como el grado de confiabilidad que se puede tener de ellas” (2001, p. 12). El valor de E se presenta en el anexo 4.

y también se especifican los tipos de unión más usados en la fabricación de recipientes sometidos a presión (León Estrada, 2001).

2.7.8. Factor de seguridad

El factor de seguridad se establece por la ecuación (15):

$$FS = \frac{S}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (15)$$

Donde:

S : Esfuerzo máximo permisible del material del cabezal a tensión y a la temperatura de diseño [MPa].

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo calculado [MPa].

El factor de seguridad para recipientes a presión según el código ASME se visualiza en la tabla 3, donde el factor de seguridad actual es de 3.5.

Tabla 3

Factor de seguridad según el código ASME

Año de Publicación de la Edición del Código ASME	Presión de Diseño				Factor de Seguridad
	Butano		Propano		
	Psig	MPa	Psig	MPa	
1931 hasta 1946	100	0.70	200	1.40	5
1946, párrafo U-68 y U-69	100	0.70	200	1.40	5
1949, párrafo U-200 y U-201	125	0.90	250	1.70	4
1952 hasta 1998	125	0.90	250	1.70	4
1998 hasta el presente					3.5

Nota. Esta tabla muestra el factor de seguridad según el código ASME. Tomado de *Código del gas licuado de petróleo* (p.126), por Comité técnico de los gases licuados del petróleo, 2014.

2.7.9. Requerimientos relacionados con las clases de materiales

En la subsección C del código ASME se establecen los requerimientos relacionados con las clases de materiales que son utilizados en la construcción de recipientes a presión. Se detallan las características más relevantes de los materiales:

UCS – Aceros al carbono y de baja aleación. Es un tipo de acero que como su nombre lo indica contiene carbono, este es su principal componente, pero también se encuentra aleado con hierro y manganeso (Metalium, 2014). Es el más disponible y económico de los aceros y su uso se recomienda en la construcción de recipientes que no se encuentran sometidos a altas presiones ni temperaturas (Romero Vásquez, 2013).

Los aceros de baja aleación contienen bajos porcentajes de elementos de aleación como el cromo, níquel, etc. En general tienen mejor comportamiento que los aceros al carbono, en cuanto a la resistencia mecánica cuando se emplean en procesos de alta temperatura, no se consideran resistentes a la corrosión. Son más costosos que los aceros al carbono (Romero Vásquez, 2013).

UNF – Materiales no ferrosos. Son los metales y aleaciones que no tienen en su composición la presencia del material hierro. Presentan poca resistencia mecánica y son blandos. Los más importantes son: zinc, plomo, cobre, aluminio, níquel, estaño y manganeso (EcuRed Contributors, 2019). Estos materiales son utilizados en procesos que operan a bajas temperaturas, también se emplean con el propósito de manipular sustancias con alto poder corrosivo y facilitar la limpieza de recipientes que procesan alimentos (Romero Vásquez, 2013).

UHA – Aceros de alta aleación. Son aceros con elementos de aleación en contenido superior al 3%. Son llamados aceros inoxidable, presenta un contenido bajo de carbono porque son sometidos a tratamientos térmicos. Poseen alta resistencia a la corrosión, resistencia al calor y tenacidad. Los aceros al níquel, al cromo - níquel y al cromo - níquel - molibdeno pertenecen a los aceros de alta aleación (Ausa Special Steel, 2016). Su costo es elevado en comparación a los aceros al carbono y de baja aleación (Romero Vásquez, 2013).

UHT – Aceros ferríticos con propiedades mecánicas mejoradas por tratamiento térmico. Son aceros con 12% a 17% de cromo, con bajos porcentajes de carbono, por lo que son

económicos en comparación a los aceros inoxidable. Son poco resistentes a elevadas temperaturas, tiene mejor resistencia a la corrosión y a la formación de cascarilla. Son utilizados en la industria automotriz (Valbruna México, 2020).

2.8. Pérdida de calor en el intercambiador

Con la ecuación (16) se realiza el cálculo de la pérdida de calor por pie lineal.

$$q = \frac{T_1 - T_6}{\frac{1}{h_r A_o} + \frac{r_2 - r_1}{k_c A_{1Lm}} + \frac{r_3 - r_2}{k_a A_{2Lm}} + \frac{r_4 - r_3}{k_o A_{3Lm}} + \frac{1}{h_o A_{ext}}} \quad (16)$$

Donde:

T_1 : Temperatura del refrigerante [°F].

T_6 : Temperatura del exterior [°F].

r_1, r_2, r_3, r_4 : Radios de la tubería en el intercambiador [pie].

h_r : Coeficiente convectivo el gas Freon 134a $\left[\frac{\text{btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right]$.

k_c : Coeficiente de conductividad de la tubería de cobre $\left[\frac{\text{btu}\cdot\text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right]$.

k_a : Coeficiente de conductividad térmica del acero $\left[\frac{\text{btu}\cdot\text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right]$.

k_o : Coeficiente de conductividad térmica del aislante $\left[\frac{\text{btu}\cdot\text{pie}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right]$.

h_o : Coeficiente convectivo en el exterior $\left[\frac{\text{btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \right]$.

$A_o, A_{ext}, A_{1Lm}, A_{2Lm}, A_{3Lm}$: Área logarítmica media.

2.8.1. Propiedades químicas de los materiales

Refrigerante. En el sistema de condensación se utiliza el gas Freon 134a. Según la investigación del Lugmania y Cisneros el coeficiente convectivo es (2018, p. 42):

$$h_r = 223.2632 \frac{W}{m^2 K}; h_r = 39.3452 \frac{\text{btu}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

Tubería de cobre. La tubería de cobre se utiliza para contener el refrigerante. Y el cobre tiene buenas características como conductor de temperatura. Su coeficiente de conductividad térmica es:

$$k_c = 385.2 \frac{W}{m K}; k_c = 2672.5606 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$k_c = 2672.5606 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F} \times \frac{1 pie}{12 in} = 222.7134 \frac{btu \cdot pie}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

Tubería de acero inoxidable. Para conseguir una buena condensación del vapor de la pirólisis, se construye un serpentín con tubing de acero inoxidable de 3/8" de diámetro. El acero inoxidable tiene un coeficiente de conductividad térmica:

$$k_a = 16.3 \frac{W}{m K}; k_a = 113.0912 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$k_a = 113.0912 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F} \times \frac{1 pie}{12 in} = 9.42427 \frac{btu \cdot pie}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

Vapor de la pirólisis. Para establecer el coeficiente convectivo del vapor de la pirólisis se debe realizar pruebas experimentales, por este motivo el asesor externo sugiere que se asuma el valor del coeficiente convectivo del vapor de agua. Según la experimentación realizada por De Paul, el coeficiente de transferencia convectiva del agua es (2000, p. 3):

$$h_T = 136.8 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}; h_T = 24.1079 \frac{btu}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

Aislante. Como material aislante se utiliza el poliuretano que tiene un coeficiente de conductividad térmica:

$$k_o = 0.025 \frac{W}{m K}; k_o = 0.1735 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

$$k_o = 0.1735 \frac{btu \cdot in}{h pie^2 \text{ } ^\circ F} \times \frac{1 pie}{12 in} = 0.014458 \frac{btu \cdot pie}{h pie^2 \text{ } ^\circ F}$$

Se estima el coeficiente convectivo en el exterior del material aislante:

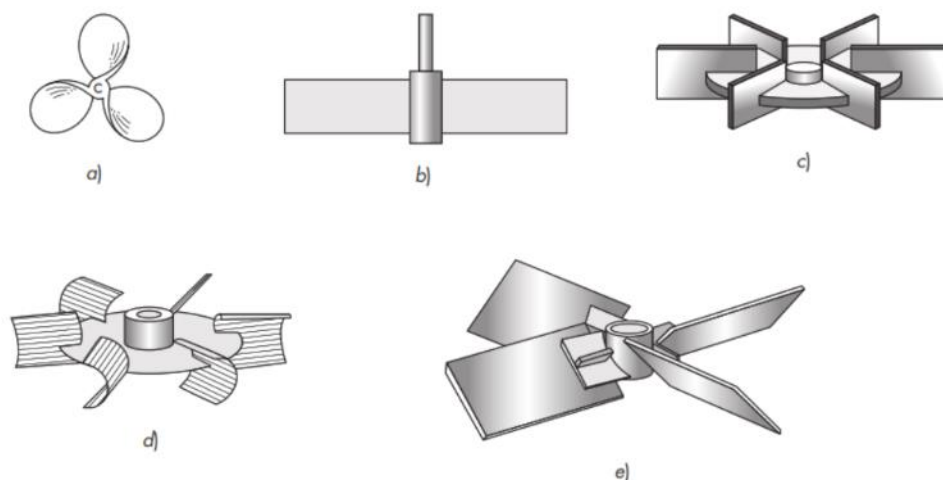
$$h_o = 2 \frac{btu}{h \pi e^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

2.9. Tipos de impulsores o agitadores

Para la agitación de líquidos de baja a moderada viscosidad, es común la implementación de tres tipos de impulsores: hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia, como se visualizan en la figura 16 (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Figura 16

Agitadores para líquidos de viscosidad moderada



Nota. a) agitador marino de tres palas; b) turbina simple de pala recta; c) turbina de disco; d) agitador de pala cóncava CD-6; e) turbina de pala inclinada. Tomado de *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (p.262), por W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriot, 2007.

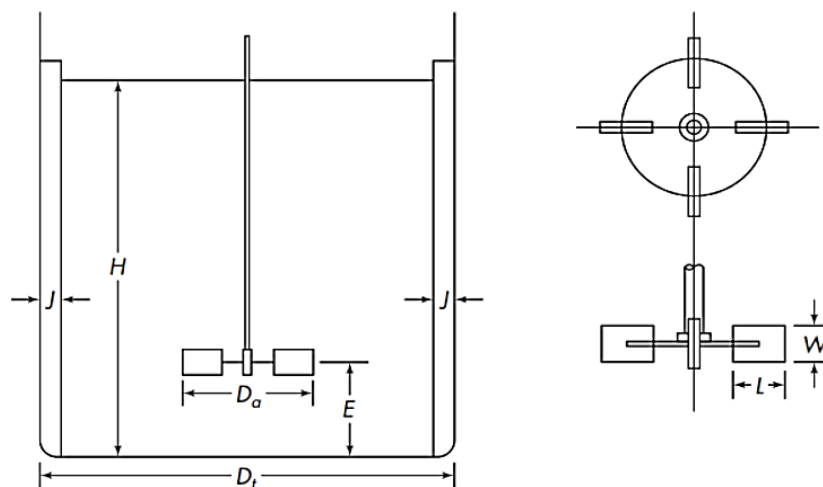
De los tres tipos de impulsores, se estima conveniente diseñar una turbina sencilla de palas rectas, ya que empuja el líquido en forma radial y tangencial, casi sin movimiento vertical hacia el agitador. Las corrientes que genera se propagan hacia la pared del tanque de reserva y luego suben o bajan. En los tanques de proceso, los agitadores de paletas típicos giran a velocidades entre 20 y 150 rpm (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

2.9.1. Diseño estándar de turbina

Para el diseño de una turbina, se parte de las proporciones estándares que son ampliamente aceptadas y se han publicado sobre el funcionamiento de los agitadores (McCabe, Smith, & Harriot, 2007), como se presenta en la figura 17.

Figura 17

Mediciones de turbina



Nota. Esta figura representa las mediciones de turbina. Tomado de *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (p.263), por W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriot, 2007.

Donde:

D_t : Diámetro del tanque.

D_a : Diámetro del agitador.

H : Altura del líquido.

E : Distancia del fondo del tanque hasta el rodete.

J : Ancho de la placa deflectora.

W : Ancho de las aspas de la turbina o agitador de paletas.

Según McCabe, Smith, & Harriot, las proporciones típicas son (2007, p.262):

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Número de rodetes o impulsores. La profundidad del líquido debe ser igual o algo mayor al diámetro del tanque, si la profundidad es mayor conviene instalar dos o más impulsores sobre el mismo eje (McCabe, Smith, & Harriot, 2007). En consecuencia, para el diseño del agitador conviene implementar un solo impulsador o rodete.

Consumo de potencia. Un parámetro muy importante que se debe considerar en el diseño del sistema de agitación es la potencia que se requiere para mover el impulsor (McCabe, Smith, & Harriot, 2007). En la ecuación (17) se presenta el número de potencia N_p .

$$N_p = \frac{P}{\rho n^3 D_a^5} \quad (17)$$

Donde:

N_p : número de potencia.

P : Potencia consumida por el agitador (W).

ρ : Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$).

n : Velocidad de rotación del agitador ($\frac{rev}{s}$).

D_a : Diámetro del agitador (m).

Correlaciones de potencia. Según McCabe, Smith, & Harriot “Para estimar la potencia requerida para hacer girar un agitador dado con una velocidad determinada, es preciso disponer de correlaciones empíricas de la potencia (o del número de potencia) en función de otras variables del sistema” (2007, p.273).

En el análisis dimensional descrito por McCabe, Smith, & Harriot, se obtiene la ecuación (18) denominada como el número de Reynolds. “A bajos números de Reynolds ($Re < 10$), el flujo viscoso predomina en el tanque, mientras que si $Re > 10^4$ el flujo es turbulento en todas partes.” (2007, p.274).

$$Re = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \quad (18)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds.

ρ : Densidad del fluido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

n : Velocidad de rotación del agitador $\left(\frac{rev}{s}\right)$.

D_a : Diámetro del agitador (m).

μ : Viscosidad $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$.

Cálculo del consumo de potencia (energía). La potencia transmitida al líquido se calcula despejando P de la ecuación (17), según una relación para N_p específica (McCabe, Smith, & Harriot, 2007). Se obtiene la ecuación (19).

$$P = N_p n^3 D_a^5 \rho \quad (19)$$

Donde:

N_p : número de potencia.

P : Potencia consumida por el agitador (W).

ρ : Densidad del fluido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

n : Velocidad de rotación del agitador $\left(\frac{rev}{s}\right)$.

D_a : Diámetro del agitador (m).

Para números de Reynolds bajos, las líneas de N_p vs Re coinciden para un tanque con o sin placas deflectoras. Cuando Re es menor de 10 el flujo es laminar en este intervalo, y la densidad no es más un factor. Por consiguiente, se utiliza la ecuación (20) (McCabe, Smith, & Harriot, 2007):

$$P = K_L n^2 D_a^3 \mu \quad (20)$$

Donde:

P : Potencia consumida por el agitador (W).

K_L : Constante tabla 4.

n : Velocidad de rotación del agitador ($\frac{rev}{s}$).

D_a : Diámetro del agitador (m).

μ : Viscosidad ($\frac{kg}{m s}$).

En la tabla 4 se presentan los valores de la constante K_L para los tipos de impulsores.

Tabla 4

Valores de la constante K_L

Tipos de Impulsor	K_L
Impulsor hélice, tres palas	
Paso 1.0	41
Paso 1.5	48
Turbina	
Disco de seis palas ($S_3 = 0.25, S_4 = 0.2$)	65
Seis palas inclinadas ($45^\circ, S_4 = 0.2$)	—
Cuatro palas inclinadas ($45^\circ, S_4 = 0.2$)	44.5
Paleta plana, dos palas ($S_4 = 0.2$)	36.5
Impulsor HE-3	43
Cinta helicoidal	52
Ancla	300

Nota. En esta tabla se muestra los valores de la constante K_L . Tomado de *Operaciones unitarias en ingeniería química* (p.278), por W. McCabe, L. Warren, J. Smith, P. Harriot, 2007.

Cálculo de la potencia del motor. Para calcular la potencia del motor (P_m), se tiene la ecuación (21):

$$P_m = \frac{P}{\eta} \quad (21)$$

Donde:

P_m : Potencia del motor (*hp*).

P : Potencia consumida por el agitador (*hp*).

η : Eficiencia de los elementos.

Cálculo del torque medio. De la ecuación (22) se despeja T_m y se obtiene la ecuación (23) que se utiliza para calcular el torque medio.

$$P = T_m \omega \quad (22)$$

$$T_m = \frac{P}{\omega} \quad (23)$$

Donde:

P : Potencia consumida por el agitador (*w*).

T_m : Torque medio (*N – m*).

ω : Velocidad angular (*rad/s*).

Cálculo del diámetro del eje de transmisión. Se emplea la ecuación (24) para determinar el diámetro (d) de un eje sometido a torque constante y flexión completamente reversible (Norton, 2011).

$$d = \left\{ \frac{32 N_f}{\pi} \left[\left(K_f \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

En el presente caso, no existen fuerzas transversales aplicadas que causen flexión, por lo tanto, $M_a = 0$, y se obtiene la ecuación (25).

$$d = \left[\frac{16 \sqrt{3} N_f (T_m)}{\pi S_y} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

Donde:

d : Diámetro de un eje.

N_f : Factor de seguridad.

T_m : Torque medio ($N - m$).

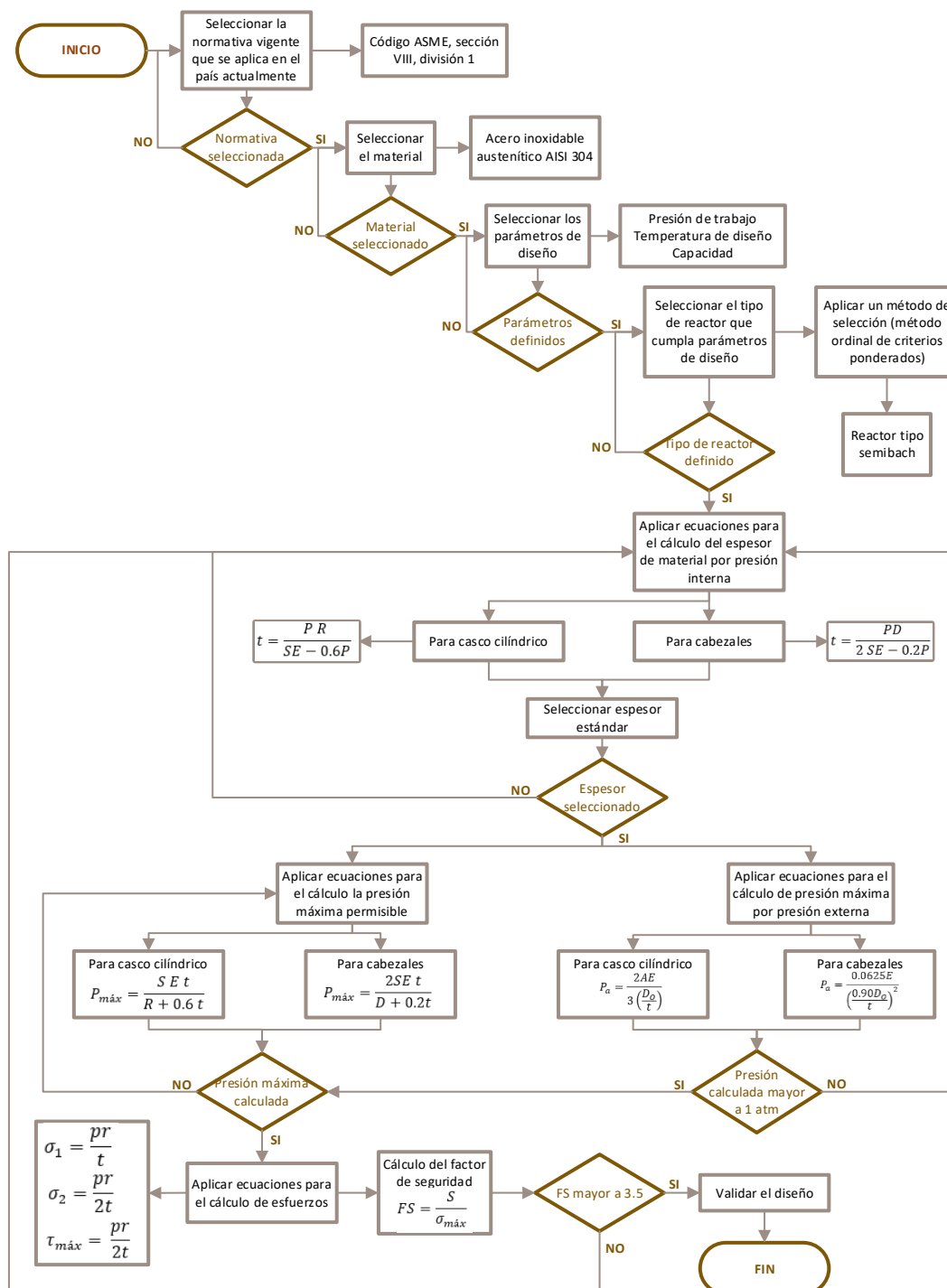
S_y : Resistencia a la fluencia del material (Pa).

Capítulo III

3. Metodología de diseño del sistema mecánico

3.1. Metodología de diseño

En base al código ASME se realiza el siguiente diagrama de flujo.



3.2. Especificaciones del equipo

En la tabla 5 se describen las especificaciones necesarias para el diseño del sistema de reacción.

Tabla 5

Especificaciones del equipo

Capacidad total del reactor térmico		12 L	
Volumen del depósito		2.6 L	
Presión de trabajo		Atmosférica	
Dimensiones		1560 X 1250 X 660 mm	
Temperatura de trabajo	Reactor térmico	550 °C	
	Tolva de alimentación	140 °C	
Materiales	Reactor térmico, camisas exteriores e interiores, mesa general, tolva de alimentación, depósito	Acero inoxidable 304	
	Condensación	Camisa interior, camisa exterior, tubing, tubería	Acero inoxidable 304
		Tubería interna	Cobre
		Aislante	Fibra de cerámica, poliuretano
Motor eléctrico DC	Voltaje nominal	24 V	
	Velocidad sin carga	47 rpm	
	Par nominal	672 N – cm	
Calentamiento eléctrico	Reactor térmico	220 V, 3800 W	
	Tolva	Parte cónica	220 V, 1600 W
		Parte tubular	220 V, 600 W
Refrigeración	Compresor	Potencia de entrada	145 W
		Capacidad de refrigeración	186 kCal/h
	Condensador	EER	1.28 kCal/Wh
		Rendimiento	2.040 BTUH
		Caudal	445 CFM
Control	Peso	1.50 Kg	
	Control ON/OFF en las servoválvulas, calentamiento automático, temperatura en rampa y constante, velocidad de rotación se presenta en el tablero.		

3.3. Análisis de alternativas del sistema

Una vez identificado todos los tipos de reactores utilizados para el proceso de pirólisis térmica (sección 2.4), es primordial realizar una preselección con la finalidad de escoger las mejores alternativas de diseño para la construcción del reactor, a continuación, se detallan las características más relevantes de los diferentes reactores y por qué se puede considerar su implementación.

En la tabla 6 se registra de forma clara y precisa las características más notables de cada tipo de reactor.

Tabla 6

Características relevantes de los tipos de reactores

Tipo de Reactor	Pirólisis térmica		Alimentación continua		Agitación mecánica		Costo de construcción		Manufactura disponible en el país		Inyección de nitrógeno		Total	
	Si	No	Si	No	Si	No	Accesible	Elevado	Si	No	Si	No	✓	✗
Batch	✓			✗	✓		✓		✓			✗	4	2
Semibatch	✓		✓		✓		✓		✓		✓		6	0
Lecho Fijo		✗		✗		✗		✗		✗		✗		6
Lecho Fluidizado		✗		✗		✗		✗		✗		✗		6
Tornillo	✓		✓			✗	✓		✓		✓		5	1
Extrusor	✓		✓		✓			✗		✗		✗	3	3
Esferas	✓		✓		✓			✗		✗		✗	3	3
Riser	✓			✗	✓			✗		✗		✗	2	4
Cono Rotatorio	✓			✗	✓			✗		✗		✗	2	4

En la tabla 6 se contabiliza las cualidades más relevantes de cada reactor, dando como resultado que el reactor tipo semibatch es el mejor puntuado con seis cualidades a favor; en segundo lugar, el reactor tipo tornillo tiene cinco cualidades a favor y uno en contra, finalmente el reactor tipo batch con cuatro cualidades a favor y dos en contra.

Tomando en referencia a Romeva es adecuado tener entre tres y seis alternativas de diseño (2002, p. 59). Por consiguiente, se enlista los reactores mejor puntuados:

- Solución A: Reactor tipo semibatch
- Solución B: Reactor tipo tornillo
- Solución C: Reactor tipo batch

Las tres alternativas seleccionadas son consideradas para una evaluación de soluciones; como lo establece Romeva, se recomienda el “método ordinal corregido de criterios ponderados, esta metodología permite obtener resultados globales suficientemente significativos, sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio” (2002, p. 59).

Siguiendo el método ordinal corregido de criterios ponderados, se debe establecer criterios de valoración que se consideran más determinantes:

- a) Sistema semicontinuo: se debe garantizar que el proceso de pirólisis térmica se realice de forma continua durante un intervalo de tiempo establecido.
- b) Sistema modular: al finalizar cada proceso de pirólisis se debe limpiar el interior del reactor térmico y las aspas del agitador; también se considera importante que todo el sistema sea accesible para un mantenimiento adecuado.
- c) Costo de fabricación: la materia prima y la tecnología necesaria para la manufactura son factores que se deben considerar para que este proyecto tenga una relación costo/beneficio aceptable.

d) Agitación mecánica: se debe garantizar una agitación efectiva del polímero en el interior del reactor para tener una mezcla homogénea y una óptima transferencia de calor.

e) Inyección de nitrógeno: esta característica es importante porque desplaza el oxígeno presente en el interior del reactor, de esta manera el proceso se realiza en una atmósfera inerte con la finalidad de obtener hidrocarburos adecuados y evitar compuestos no deseados.

Con los datos iniciales se procede a realizar los siguientes pasos de Romeva (2002, p. 61):

En la tabla 7 se presenta la evaluación del peso específico de cada criterio.

Semicontinuo > modular > costo > agitación = inyección

Tabla 7

Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Semicontinuo	Modular	Costo	Agitación	Inyección	$\Sigma + 1$	Pondera.
Semicontinuo		1	1	1	1	5	0.33
Modular	0		1	1	1	4	0.27
Costo	0	0		1	1	3	0.2
Agitación	0	0	0		0.5	1.5	0.1
Inyección	0	0	0	0.5		1.5	0.1
					Suma	15	1

En la tabla 8 se realiza la evaluación del peso específico del criterio semicontinuo.

Solución A = Solución B > Solución C

Tabla 8

Evaluación del peso específico del criterio semicontinuo

Semicontinuo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.16
			Suma	6	1

En la tabla 9 se realiza la evaluación del peso específico del criterio modular.

Solución A > Solución C > Solución B

Tabla 9

Evaluación del peso específico del criterio modular

Modular	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	1	3	0.50
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	0	1		2	0.33
			Suma	6	1

En la tabla 10 se realiza la evaluación del peso específico del criterio costo.

Solución C > Solución A > Solución B

Tabla 10

Evaluación del peso específico del criterio costo

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	0	2	0.33
Solución B	0		0	1	0.17
Solución C	1	1		3	0.50
			Suma	6	1

En la tabla 11 se realiza la evaluación del peso específico del criterio agitación.

Solución A = Solución C > Solución B

Tabla 11

Evaluación del peso específico del criterio agitación

Agitación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0		0	1	0.16
Solución C	0.5	1		2.5	0.42
			Suma	6	1

En la tabla 12 se realiza la evaluación del peso específico del criterio inyección.

Solución A = Solución B > Solución C

Tabla 12

Evaluación del peso específico del criterio inyección

Inyección	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Pondera.
Solución A		0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5		1	2.5	0.42
Solución C	0	0		1	0.16
			Suma	6	1

Se realiza el cálculo de la tabla de conclusiones, como se visualiza en la tabla 13.

Tabla 13

Tabla de conclusiones

Conclusión	Semicontinuo	Modular	Costo	Agitación	Inyección	Σ	Prioridad
Solución A	0.42 * 0.33	0.5 * 0.27	0.33 * 0.2	0.42 * 0.1	0.42 * 0.1	0.423	1
Solución B	0.42 * 0.33	0.17 * 0.27	0.17 * 0.2	0.16 * 0.1	0.42 * 0.1	0.276	3
Solución C	0.16 * 0.33	0.33 * 0.27	0.50 * 0.2	0.42 * 0.1	0.16 * 0.1	0.299	2

Se establece como prioridad a la solución A con una puntuación de 0.4236 gracias a los pesos altos que tiene en los criterios de sistema semicontinuo y modular, los mismos que son los criterios mejor puntuados. La solución B es la menos puntuada porque tuvo bajos pesos en los criterios de costo y agitación mecánica puntuándose con 0.2765 puntos. La solución C presenta la segunda posición con una diferencia de 0.1237 de la primera y con 0.0234 puntos de ventaja de la solución B. Por consiguiente, se considera factible la construcción del reactor tipo semibatch.

3.4. Selección del material adecuado para la construcción del sistema

En la tabla 14 se realiza un análisis cualitativo de cada grupo de materiales que menciona el código ASME (sección 2.7.7) para seleccionar de manera correcta el material para la construcción del sistema de reacción por pirólisis.

Tabla 14

Análisis cualitativo de los materiales mencionados en el código ASME

Material	Resiste altas temperaturas		Resiste altas presiones		Disponible en el país		Costo accesible		Total	
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	✓	✗
Aceros al carbono		✗		✗	✓		✓		2	2
Aceros de baja aleación	✓			✗	✓		✓		3	1
Materiales no ferrosos		✗		✗	✓			✗	1	3
Aceros de alta aleación	✓		✓		✓		✓		4	0
Aceros ferríticos		✗		✗	✓		✓		2	2

Como se visualiza en la tabla 14 de todos los materiales establecidos por el código ASME, el que posee mejores características, se encuentra disponible en el país y además tiene un costo accesible es el acero de alta aleación. Por lo tanto, para la construcción del presente proyecto se establece dos opciones: acero inoxidable austenítico 304 o el acero inoxidable austenítico 316; estos materiales cuentan con características similares y cumplen con las condiciones de trabajo para el sistema de reacción, la diferencia notable entre los dos tipos de acero es el costo, ya que el acero inoxidable austenítico 316 tiene un costo elevado en comparación al acero inoxidable austenítico 304, razón por la cual se opta por el acero inoxidable austenítico 304.

3.4.1. Acero inoxidable austenítico 304

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con al menos el 10,5% de cromo. Sus propiedades se obtienen formando una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 304 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cubica de caras centradas. En esencia no es magnético en una condición de recocido y solo puede endurecerse en frío. Su bajo contenido de carbono con respecto a la aleación 302 ofrece una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas (Goodfellow, 2021).

En el anexo 5 se presentan las diferentes propiedades del acero inoxidable austenítico serie 300, con estos datos se procede a realizar los cálculos necesarios para validar el diseño de reactor térmico, el mismo que durante el proceso de pirólisis se encuentra sometido a presión.

Capítulo IV

4. Diseño y simulación del sistema de reacción

4.1. Diseño del reactor térmico

Para el diseño del reactor térmico se utiliza la metodología de diseño de recipientes a presión considerando la Norma ASME VIII – División 1 (The American Society of Mechanical Engineers, 2013). Se aplica el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la sección 3.1.

En la tabla 15 se presentan las constantes necesarias y en la tabla 16 se calculan las variables de diseño.

Tabla 15

Constantes para el diseño

Material	Acero inoxidable
Temperatura de diseño	550 °C
Límite de fluencia (anexo 5)	$S_d = 68 \text{ MPa}$
Eficiencia de juntas (anexo 4)	$E = 0.70$

Tabla 16

Cálculos para el reactor térmico

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$V_c = 9500 \text{ [cm}^3\text{]}$	Ecuación (2)	$V_{seg} = 1900 \text{ [cm}^3\text{]}$
	Ecuación (1)	$V_{tc} = 11400 \text{ [cm}^3\text{]}$
$d = 22 \text{ [cm]}$	$h = \frac{V_{tc}}{\pi r^2}$	$h = 29.9895 \text{ [cm]}$
$r = 11 \text{ [cm]}$		$h \approx 30 \text{ [cm]}$
$P_o = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ [Pa]}$ $P_H = 1469.21 \text{ [Pa]}$	Ecuación (3)	$P = 113029.631 \text{ [Pa]}$
	Ecuación (4)	$P = 309596.98 \text{ [Pa]}$
	La presión de diseño es P mayor	$P = 309596.98 \text{ [Pa]}$
$t_{real} = 2 \text{ [mm]}$	Ecuación (8)	309596.98 [Pa] $< 18326000 \text{ [Pa]}$
	Ecuación (6)	$t = 0.000718258 \text{ [m]}$ $t = 0.72 \text{ [mm]}$
	Ecuación (7)	$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ [Pa]}$
	Ecuación (9)	$\sigma_1 = 17.027834 \text{ [MPa]}$
	Ecuación (10)	$\sigma_2 = 8.513917 \text{ [MPa]}$
	Ecuación (11)	$\tau_{m\acute{a}x} = 8.513917 \text{ [MPa]}$
	Ecuación (15)	$FS = 4$

El factor de seguridad para recipientes a presión según el código ASME se visualiza en la tabla 3. En los cálculos se obtiene un factor de 4 por lo tanto, se acepta el diseño para el reactor térmico. En el anexo 22.1 se presentan los cálculos completos de este componente.

4.1.1. Modelado del reactor térmico

En la figura 18 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) del reactor térmico y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 18

Modelado del reactor térmico



4.1.2. Cálculo del espesor para los cabezales

En la tabla 17 se calcula el espesor para los cabezales del reactor térmico en base a una tapa semielíptica 2:1. Al ser de acero inoxidable 304 se utilizan las constantes de la tabla 15.

Tabla 17*Cálculos para el cabezal superior*

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$P = 309596.98 [Pa]$	Ecuación (12)	$t = 0.00071592 [m]$
$d = 22 [cm]$		$t = 0.72 [mm]$
$t_{real} = 2 [mm]$	Ecuación (13)	$P_{m\acute{a}x} = 863883.85 [Pa]$

La presión de trabajo máxima en los cabezales es 863883.85 Pa, se selecciona como presión de trabajo máxima permisible a la menor entre la presión del reactor y la presión de los cabezales:

$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 [Pa]$$

Para garantizar el diseño se debe cumplir que la presión de trabajo máxima permisible sea mayor a la presión de diseño:

$$P_{m\acute{a}x} > P$$

$$856115.11 [Pa] > 309596.98 [Pa]$$

Con esta condición se verifica que la parte cilíndrica y los cabezales del reactor térmico soportan la presión de diseño. En el anexo 22.1 se presentan los cálculos completos.

4.1.3. Modelado de los cabezales superior e inferior

En la figuras 19 y 20 se visualiza el modelado 3D de los cabezales superior e inferior del reactor térmico. En el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 19

Modelado del cabezal superior del reactor térmico

**Figura 20**

Modelado del cabezal inferior del reactor térmico



4.1.4. Análisis de las variables de diseño en el reactor térmico

Se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE) para validar el diseño del reactor térmico y los cabezales, utilizando un software de análisis de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo, en donde se visualizan todos los parámetros físicos y resultados obtenidos en la simulación CAE.

Primer análisis CAE del reactor térmico. El reactor térmico se encuentra sometido a una fuerza que ejerce la cantidad de materia prima, es decir el peso. Según los datos obtenidos por Torres el valor de la gravedad en la ciudad de Latacunga es (2005, p. 139):

$$g = 977211.13 \text{ mGal} \rightarrow g = 9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = mg = (5 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 48.86 \text{ N}$$

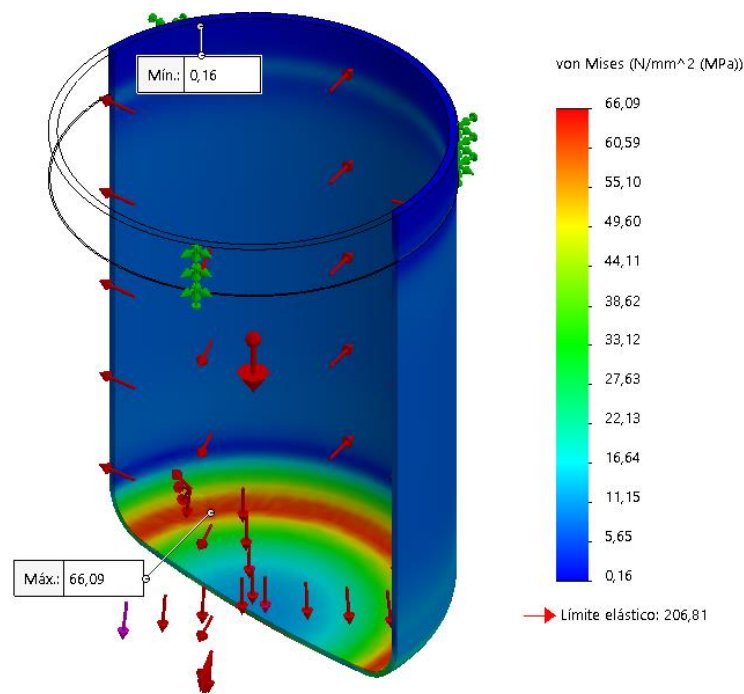
El reactor térmico trabaja a una presión de diseño:

$$P = 309596.98 \text{ Pa}$$

Se interpreta que el reactor térmico y el cabezal inferior diseñados resisten las condiciones de trabajo. Tiene un esfuerzo máximo de Von Mises en la curvatura de 66.09 MPa lo que equivale al 31.96 % del límite elástico del acero inoxidable, como se visualiza en la figura 21. Se demuestra que el diseño no falla y se valida la selección de los 2 mm de espesor.

Figura 21

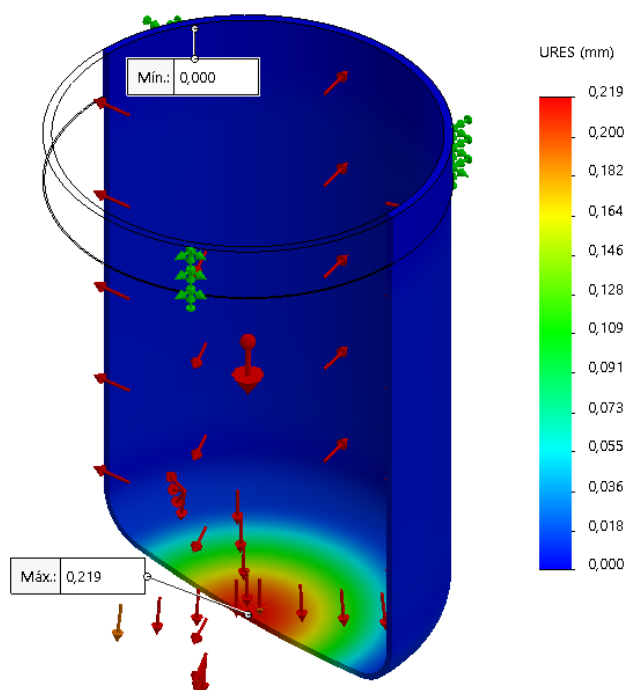
Von Mises del reactor térmico para presión de diseño



Al estar el soporte fijo en la parte superior del reactor térmico como se visualiza en la figura 22, la deformación máxima se localiza en el fondo con un valor de 0.219 mm , que es un valor insignificante y no afecta a la resistencia del material. En esta sección se encuentra el módulo de pesaje.

Figura 22

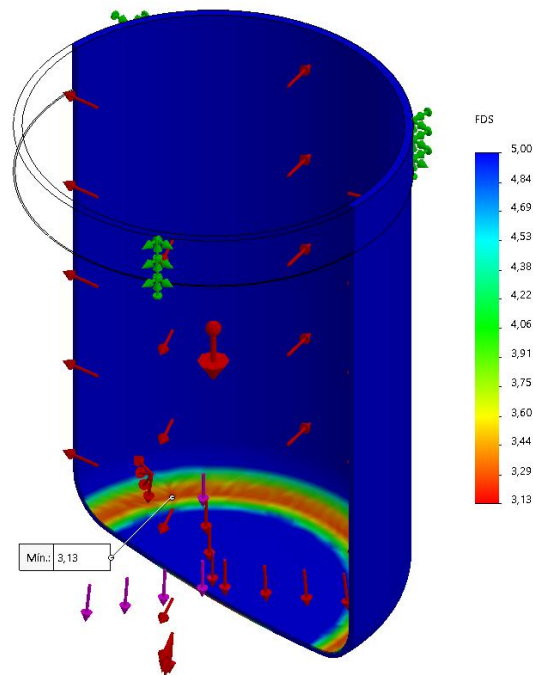
Deformación del reactor térmico para presión de diseño



En la figura 23 se visualiza que el reactor térmico tiene un factor de seguridad de 3.13, este estudio se relaciona directamente con el esfuerzo de Von Mises donde se concentran los esfuerzos máximos en la curvatura. Al ejecutar el análisis CAE se acepta el diseño ya que el valor de FS demuestra que el reactor soporta las condiciones de trabajo como el peso y la presión.

Figura 23

Factor de seguridad del reactor térmico para presión de diseño



Segundo análisis CAE del reactor térmico. Es necesario realizar un análisis CAE utilizando la presión de trabajo máxima permisible, con la finalidad de evaluar la resistencia del reactor térmico al ser sometido a condiciones de trabajo extremas:

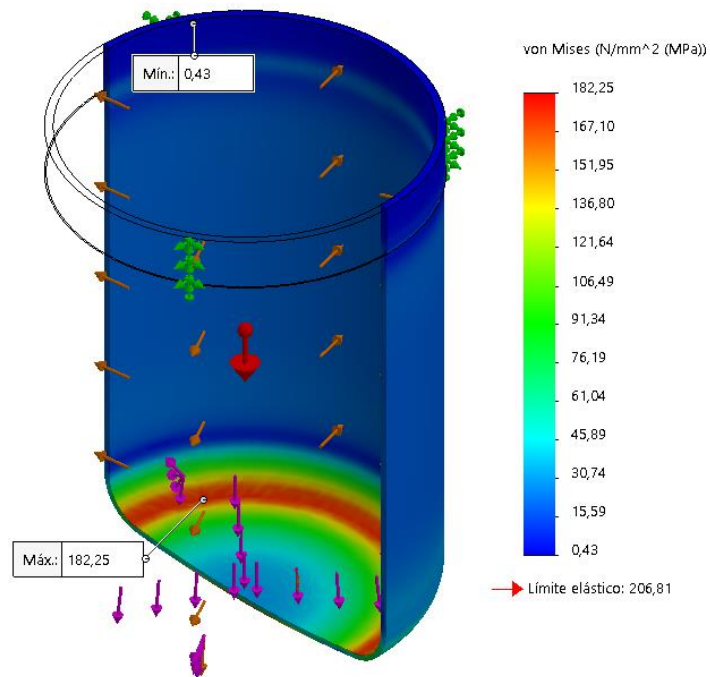
$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ Pa}$$

$$F = 48.86 \text{ N}$$

Como se visualiza en la figura 24 al someter al reactor térmico a la presión de trabajo máxima a condiciones extremas, se obtiene un valor de esfuerzo máximo de Von Mises en la curvatura igual a 182.25 MPa lo que equivale al 88.12 % del límite elástico del acero inoxidable. Con el análisis CAE se concluye que el diseño apenas soporta la presión de trabajo máxima permisible y por ende no es conveniente trabajar a estas condiciones.

Figura 24

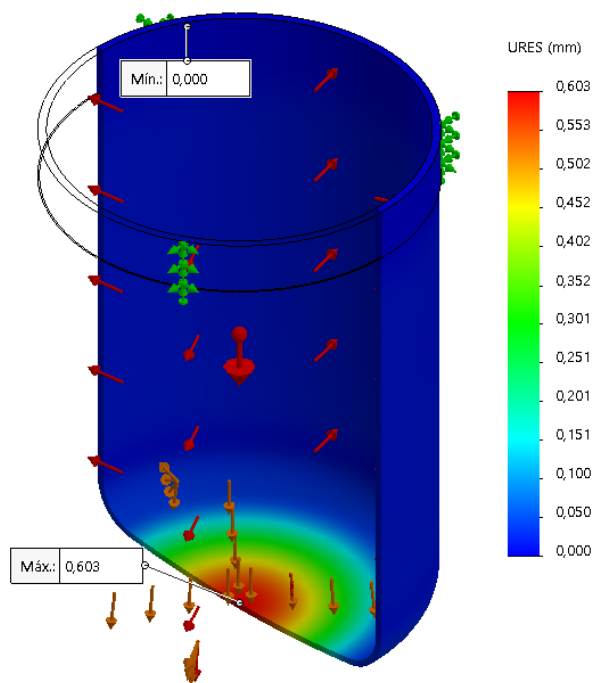
Von Misses del reactor térmico para presión de trabajo máxima



En la figura 25 el software CAE calcula una deformación de 0.603 mm . La deformación máxima se ubica en el fondo del reactor térmico porque en esta sección se halla el módulo utilizado para sensor el peso, que es un valor relativamente elevado y afecta a la resistencia del material.

Figura 25

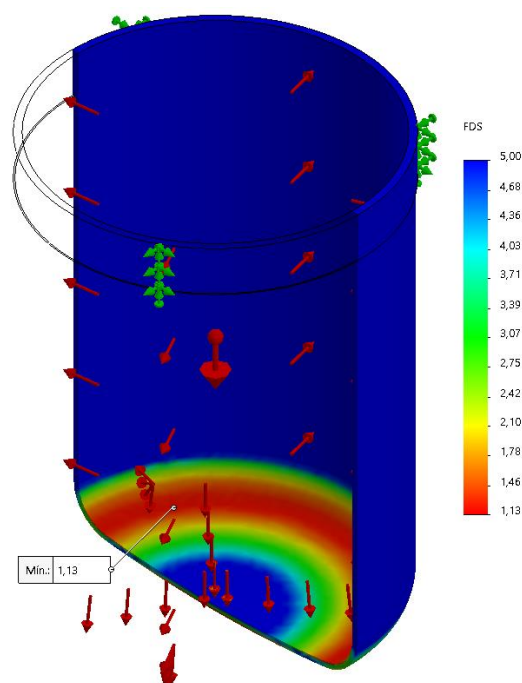
Deformación del reactor térmico para presión de trabajo máxima



En la figura 26 se visualiza el factor de seguridad del reactor térmico sometido a una presión de trabajo máxima permisible de 1.13. Como el factor de seguridad baja drásticamente el reactor apenas soporta un 13 % adicional del diseño y finalmente fallaría, se concluye que no se debe operar en condiciones de trabajo tan extremas.

Figura 26

Factor de seguridad del reactor térmico para presión de trabajo máxima



4.1.5. Análisis de las variables de diseño en el cabezal superior

En esta sección se analiza el accionar que tiene la presión de diseño y la presión de trabajo máxima permisible en el cabezal superior del reactor térmico. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados de la simulación CAE.

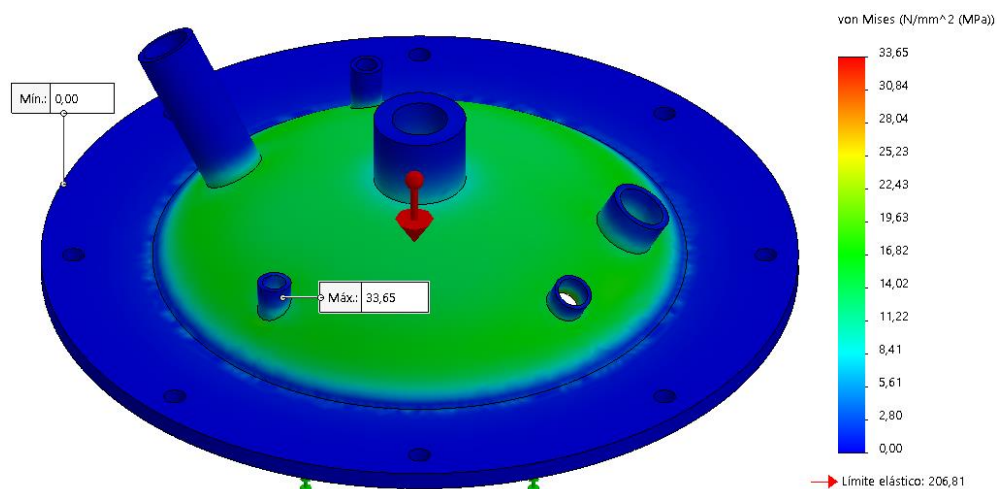
Primer análisis CAE para el cabezal superior del reactor térmico. Se encuentra sometido a una presión de diseño:

$$P = 309596.98 \text{ Pa}$$

En la figura 27 se observa un esfuerzo máximo de Von Misses igual a 33.65 MPa que representa apenas un 16.27 % del límite elástico y se localiza en la entrada de uno de los sensores en un cambio de sección. Por medio del análisis del software CAE se demuestra que el diseño no falla y se valida la selección de los 2 mm de espesor y el tipo de cabezal seleccionado para la construcción del cabezal superior.

Figura 27

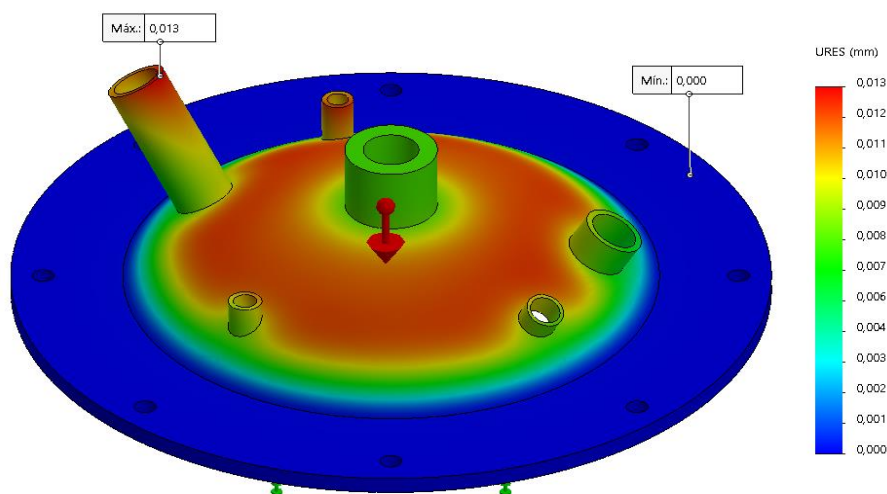
Von Misses del cabezal superior para presión de diseño



En la figura 28 se visualiza que el cabezal superior del reactor térmico tiene una deformación de 0.013 *mm* en la entrada de uno de los subsistemas, además se evidencia una expansión en la superficie de todo el cabezal superior debido a la presión, pero el valor es insignificante.

Figura 28

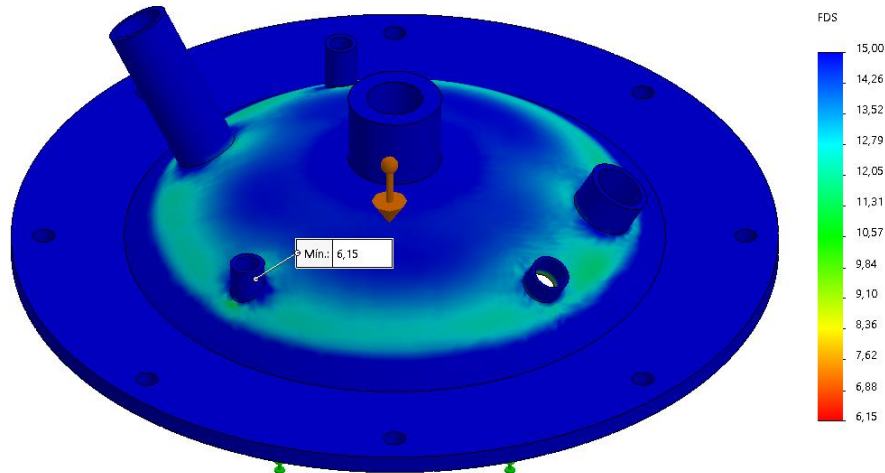
Deformación del cabezal superior para presión de diseño



Finalmente, en la figura 29 se observa el factor de seguridad es 6.15, donde la zona que tiende a fallar es donde se encuentran ubicados las entradas de los sensores y de los subsistemas, pero al ser el FS alto se valida el sistema y los espesores seleccionados en el diseño.

Figura 29

Factor de seguridad del cabezal superior para presión de diseño



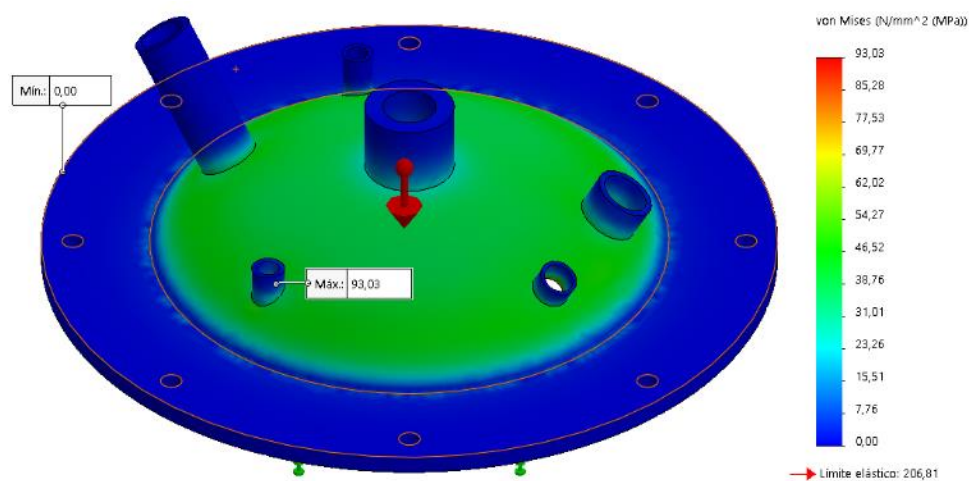
Segundo análisis CAE para el cabezal superior del reactor térmico. El cabezal superior del reactor térmico puede soportar hasta una presión de trabajo máxima permisible igual a:

$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 Pa$$

Como se visualiza en la figura 30 al someter al cabezal superior a la presión de trabajo máxima, se tiene valor de esfuerzo máximo de Von Misses igual a $93.03 MPa$. Se comprueba que el esfuerzo máximo se encuentra en la entrada de un sensor, este esfuerzo se genera por el cambio de sección al ser una tubería pequeña de apenas $1/4"$. Los resultados de este análisis demuestran que el esfuerzo es del 44.98% del límite elástico por lo que aún en condiciones extremas no falla.

Figura 30

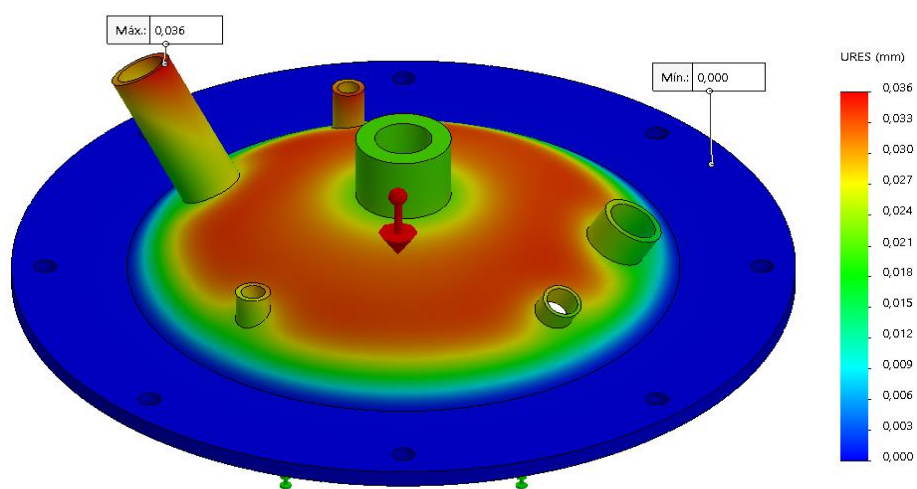
Von Misses del cabezal superior para presión de trabajo máxima



La deformación en el cabezal superior del reactor térmico se observa en la figura 31 y tiene un valor de 0.036 *mm*. La deformación máxima se ubica en la entrada de un subsistema, además de una expansión en la superficie de todo el cabezal superior, pero al ser un valor pequeño no representa un problema al diseño.

Figura 31

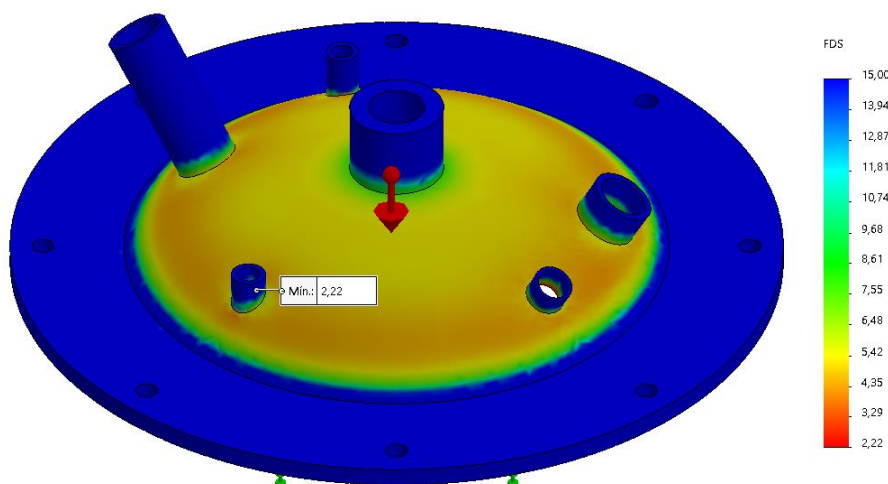
Deformación del cabezal superior para presión de trabajo máxima



En la figura 32 se observa que el factor de seguridad del cabezal superior es 2.22. El FS baja drásticamente en comparación con el de la presión de operación, pero aun así soporta las condiciones de trabajo. Como el reactor térmico y el cabezal inferior no soportan trabajar en condiciones extremas se concluye que no se debe operar a la presión máxima permisible.

Figura 32

Factor de seguridad del cabezal superior para presión de trabajo máxima



4.2. Diseño de la columna de reflujo

Para el diseño de la columna de reflujo se aplica el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la sección 3.1. Se utilizan las constantes detalladas en la tabla 15.

En la tabla 18 se calculan las variables de diseño.

Tabla 18

Cálculos para la columna de reflujo

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$d = 2.714 [cm]$ $r = 1.357 [cm]$ $h = 25 [cm]$	$V_{tc} = \pi r^2 h$	$V_{tc} = 144.627 [cm^3]$
$P_O = 1 atm = 101325 [Pa]$ $P_H = 6121.70 [Pa]$	Ecuación (3) Ecuación (4)	$P = 118191.37 [Pa]$ $P = 314289.47 [Pa]$
	La presión de diseño es P mayor	$P = 314289.47 [Pa]$

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$t_{real} = 3.38 [mm]$	Ecuación (8)	314289.47 [Pa] < 18326000 [Pa]
	Ecuación (6)	$t = 0.000089955 [m]$ $t = 0.08995 [mm]$
	Ecuación (7)	$P_{máx} = 10314655.73 [Pa]$
	Ecuación (9)	$\sigma_1 = 1.261807 [MPa]$
	Ecuación (10)	$\sigma_2 = 0.630904 [MPa]$
	Ecuación (11)	$\tau_{máx} = 0.630904 [MPa]$
	Ecuación (15)	$FS = 53.89$

El factor de seguridad para recipientes a presión según el código ASME se visualiza en la tabla 3. En los cálculos se obtiene un factor de 53.89 por lo tanto, se acepta el diseño para la columna de reflujo. En el anexo 22.2 se presentan los cálculos completos de este componente.

4.2.1. Modelado de la columna de reflujo

En la figura 33 se presenta el diseño CAD de la columna de reflujo y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 33

Modelado de la columna de reflujo



4.2.2. Análisis de las variables de diseño

Para validar el diseño de la columna de reflujo, se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE). En esta sección se realiza el estudio de las variables de diseño utilizando un software de análisis de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados obtenidos en la simulación CAE de la columna de reflujo.

Primer análisis CAE de la columna de reflujo. El interior de la columna de reflujo se encuentra relleno de perlas de vidrio, las mismas que generan una fuerza comúnmente conocida como peso. Teóricamente se debe multiplicar el valor de la masa de las perlas de vidrio por el valor de la gravedad. Según Torres el valor de la gravedad en la ciudad de Latacunga es (2005, p. 139):

$$g = 977211.13 \text{ mGal} \rightarrow g = 9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = mg = (0.25 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F = 2.44 \text{ N}$$

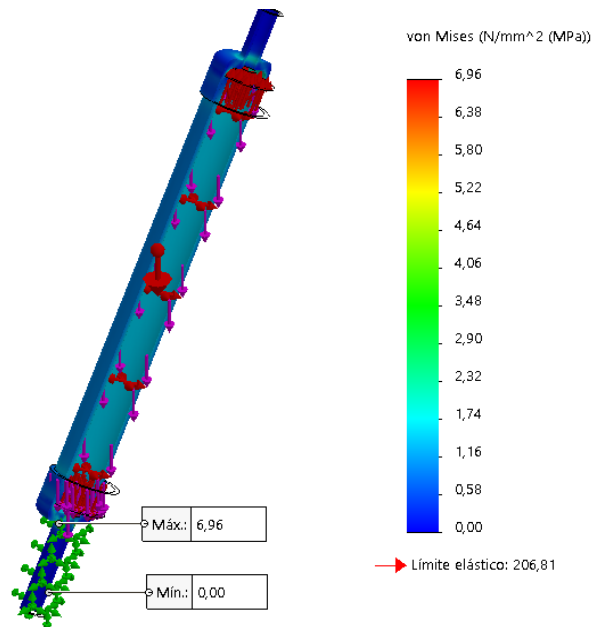
El valor de F se ingresa al software CAE como variable física a ser analizada. También la columna de reflujo se encuentra sometida a una presión de diseño:

$$P = 314289.47 \text{ Pa}$$

Con el análisis CAE como se verifica en la figura 34 se obtiene un esfuerzo máximo de Von Misses igual a 6.96 MPa que representan apenas un 3.37 % del límite elástico del material. Los esfuerzos máximos se encuentran en la parte inferior del tapón que se une con la tubería de $1/4''$ que sale del cabezal superior. Como resultado que se puede aceptar el diseño ya que este elemento resiste a las condiciones de fuerza y presión y se valida las dimensiones de la columna de reflujo y la selección de la tubería de acero inoxidable.

Figura 34

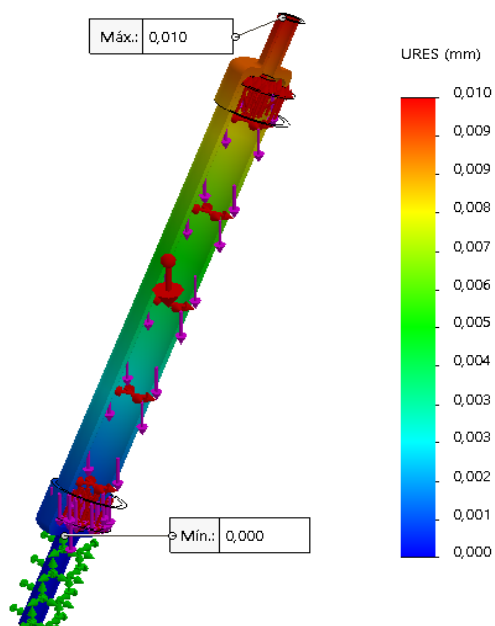
Von Mises de la columna de reflujo para presión de diseño



En la figura 35 se observa una deformación de 0.010 *mm* que se ubica en la parte superior de la tubería de 1/4", al ser un valor muy pequeño se concluye que el material no cede.

Figura 35

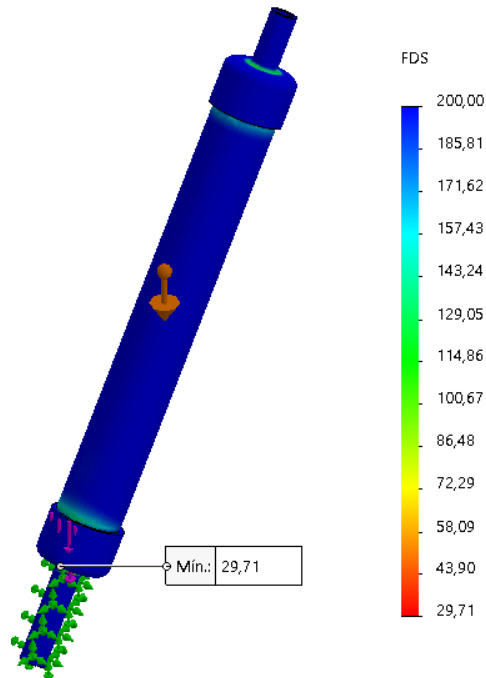
Deformación de la columna de reflujo para presión de diseño



En la figura 36 se observa que el factor de seguridad de la columna de reflujo es de 29.71 y está ubicado en el tapón inferior que se une con la tubería de 1/4", es un valor alto debido a la selección de tuberías estándares y es determinante para validar el diseño.

Figura 36

Factor de seguridad de la columna de reflujo para presión de diseño



Segundo análisis CAE de la columna de reflujo. Es preciso realizar un análisis CAE utilizando la presión de trabajo máxima permisible, con el objetivo de evaluar la resistencia de la columna de reflujo al ser sometida a condiciones de operación extremas:

$$P_{m\acute{a}x} = 10314655.73 \text{ Pa}$$

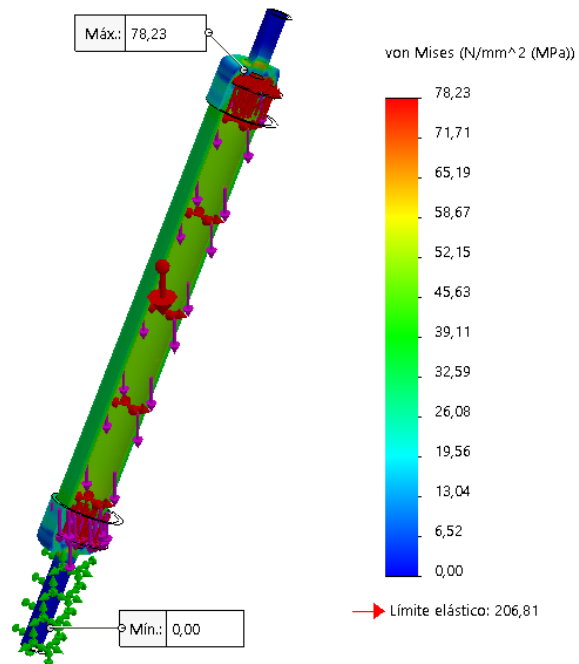
$$F = 2.44 \text{ N}$$

Como se visualiza en la figura 37, cuando se ingresa una presión de trabajo máxima permisible a la columna de reflujo se obtiene un esfuerzo máximo de Von Mises de 78.23 MPa que representa un 37.83 % del límite elástico. El esfuerzo máximo se halla en la superficie del tapón superior, donde se une con la tubería de 1/4". Los resultados del segundo análisis CAE para

la columna de reflujo diseñada, demuestran que sigue resistiendo al ser sometido a la presión de trabajo máxima permisible, pero no se recomienda operar a estas condiciones extremas.

Figura 37

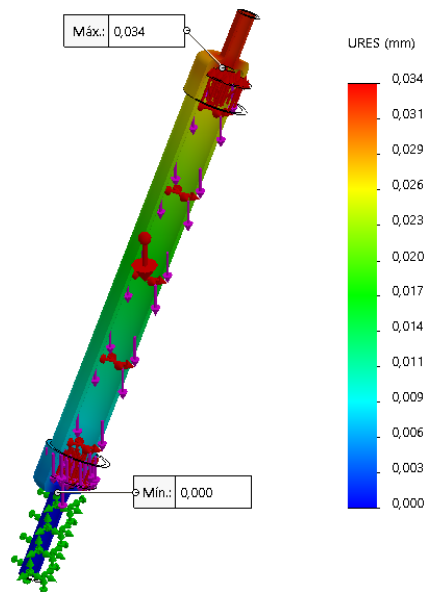
Von Mises de la columna de reflujo para presión de trabajo máxima



En la figura 38 el software CAE calcula, una deformación para la columna de reflujo igual a 0.034 mm. La deformación máxima se ubica en la superficie del tapón superior, en donde se une con la tubería de 1/4". Lo que al ser un valor demasiado pequeño no implica un inconveniente para el diseño.

Figura 38

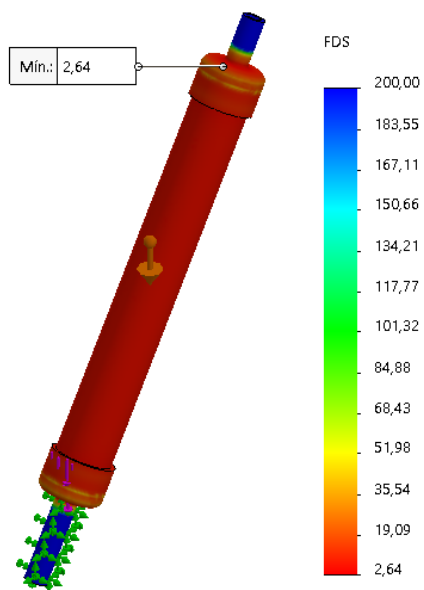
Deformación de la columna de reflujo para presión de trabajo máxima



El factor de seguridad para la columna de reflujo sometida a una presión de trabajo máxima permisible es igual a 2.64 como se observa en la figura 39. Como el factor de seguridad baja drásticamente se concluye que no se debe operar a condiciones extremas.

Figura 39

Factor de seguridad de la columna de reflujo para presión de trabajo máxima



4.3. Diseño del reactor catalítico

Para el diseño del reactor catalítico se utiliza la Norma ASME VIII y se aplica el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la sección 3.1. Se utilizan las constantes detalladas en la tabla 15.

En la tabla 19 se calculan las variables de diseño.

Tabla 19

Cálculos para el reactor catalítico

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$d = 2.093 [cm]$ $r = 1.0465 [cm]$ $h = 15 [cm]$	$V_{tc} = \pi r^2 h$	$V_{tc} = 51.60 [cm^3]$
$P_O = 1 atm = 101325 [Pa]$ $P_H = 1469.21 [Pa]$	Ecuación (3) Ecuación (4) La presión de diseño es P mayor	$P = 113073.63 [Pa]$ $P = 309636.98 [Pa]$ $P = 309636.98 [Pa]$
	Ecuación (8)	$309636.98 [Pa]$ $< 18326000 [Pa]$
	Ecuación (6)	$t = 0.000068341 [m]$ $t = 0.0683 [mm]$
$t_{real} = 2.87 [mm]$	Ecuación (7)	$P_{m\acute{a}x} = 11209649.63 [Pa]$
	Ecuación (9)	$\sigma_1 = 1.129042 [MPa]$
	Ecuación (10)	$\sigma_2 = 0.564521 [MPa]$
	Ecuación (11)	$\tau_{m\acute{a}x} = 0.564521 [MPa]$
	Ecuación (15)	$FS = 60.23$

El factor de seguridad para recipientes a presión según el código ASME se visualiza en la tabla 3. En los cálculos se obtiene un factor de 60.23 por lo tanto, se acepta el diseño del reactor catalítico. En el anexo 22.3 se presentan los cálculos completos de este componente.

4.3.1. Modelado del reactor catalítico

En la figura 40 se presenta el diseño CAD del reactor catalítico y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 40

Modelado del reactor catalítico



4.3.2. Análisis de las variables de diseño

Para validar el diseño del reactor catalítico, se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE). En esta sección se realiza el estudio de las variables de diseño utilizando un software de análisis de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados obtenidos en la simulación CAE del reactor catalítico.

Primer análisis CAE del reactor catalítico. El interior del reactor catalítico se encuentra vacío, por lo que no existe ninguna fuerza que se deba considerar, salvo el peso del propio reactor catalítico. Entonces en la simulación CAE se ingresa únicamente el valor de la presión del diseño a la cual se encuentra sometido.

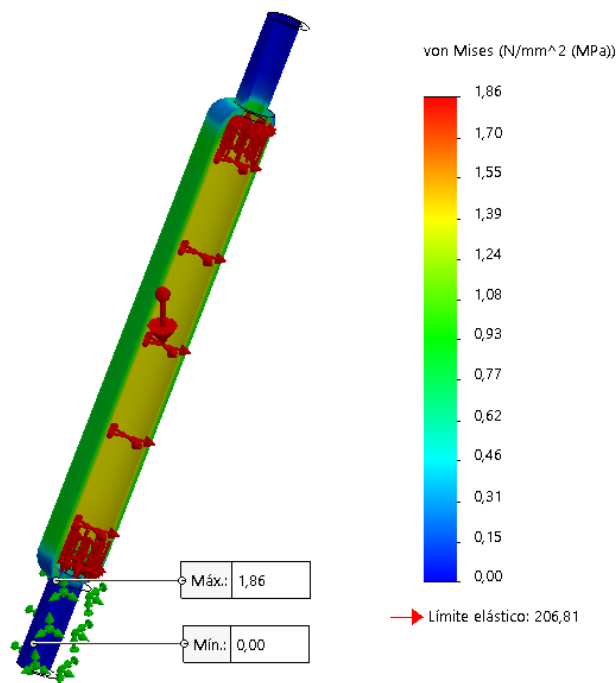
$$P = 309636.98 \text{ Pa.}$$

La simulación CAE arroja como resultado que el diseño del reactor catalítico es satisfactorio, ya que este componente resiste a la presión de diseño.

En la figura 41 se presenta un esfuerzo máximo de Von Mises igual a: 1.86 MPa que representa apenas el 0.90 % del límite elástico. Los esfuerzos máximos se encuentran en la parte inferior del reactor catalítico. Se concluye mediante el análisis CAE que debido a la selección de componentes normalizados como los tapones y la tubería de acero inoxidable el diseño no resiste las condiciones de trabajo.

Figura 41

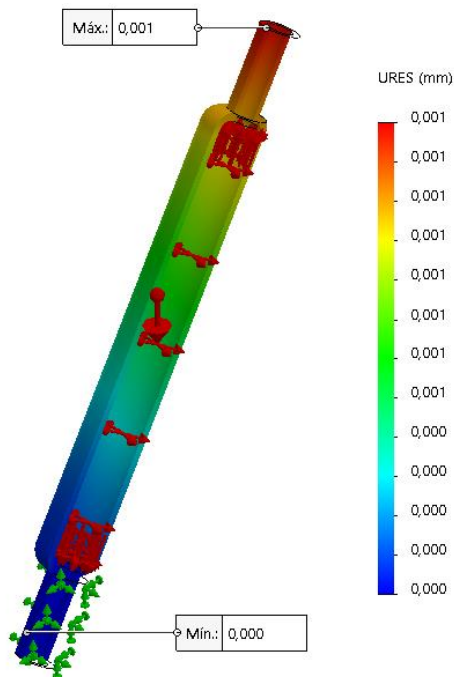
Von Mises del reactor catalítico para presión de diseño



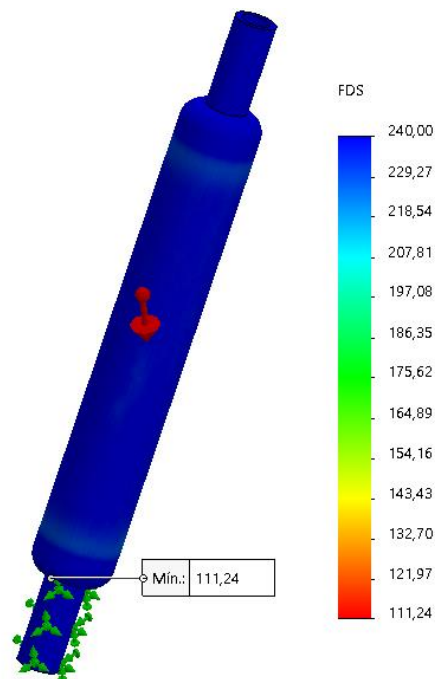
En la figura 42 se observa una deformación igual a: 0.001 mm , la deformación máxima se ubica en la parte superior del reactor catalítico y es un valor mínimo. En la figura 43 se visualiza que el factor de seguridad tiene un valor de 111.24, lo que demuestra que resiste las condiciones de trabajo y se valida el diseño.

Figura 42

Deformación del reactor catalítico para presión de diseño

**Figura 43**

Factor de seguridad del reactor catalítico para presión de diseño



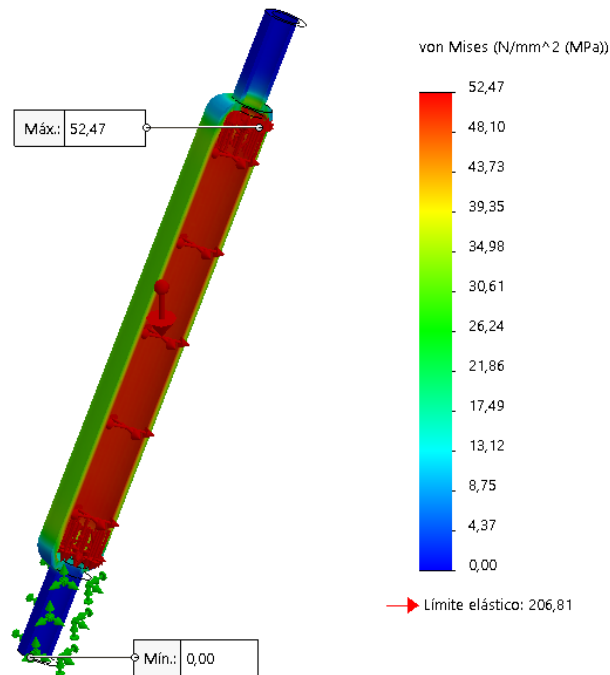
Segundo análisis CAE del reactor catalítico. El reactor catalítico puede soportar hasta una presión de trabajo máxima permisible igual a:

$$P_{m\acute{a}x} = 11209649.63 \text{ Pa}$$

Los resultados del segundo análisis CAE demuestran que resiste a la presión de trabajo máxima permisible, pero no se recomienda operar a estas condiciones extremas. En la figura 44 se detalla el valor del esfuerzo máximo de Von Mises que se encuentra en la parte interior del reactor catalítico y tiene un valor de 52.47 MPa que representa el 25.37 % del límite elástico.

Figura 44

Von Mises del reactor catalítico para presión de trabajo máxima



En la figura 45 la simulación CAE calcula una deformación máxima en la parte superior del reactor catalítico igual a 0.005 mm. En la figura 46 el factor de seguridad para el reactor catalítico sometido a una presión de trabajo máxima permisible es 3.94, como el factor de seguridad baja, se concluye que no se debe operar a presiones tan elevadas como la presión máxima permisible.

Figura 45

Deformación del reactor catalítico para presión de trabajo máxima

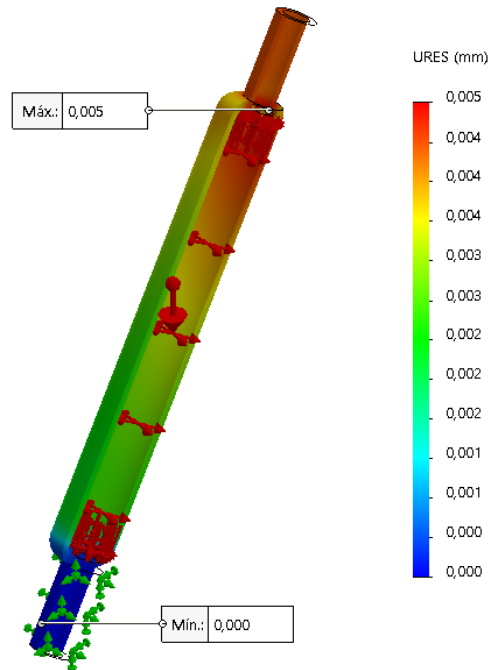
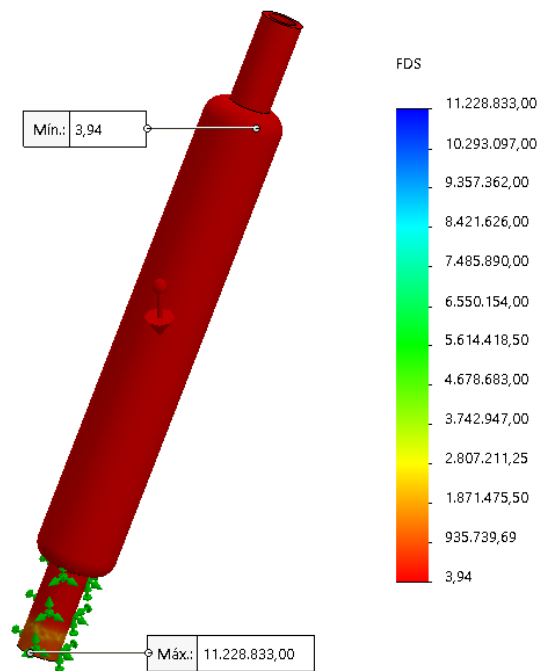


Figura 46

Factor de seguridad del reactor catalítico para presión de trabajo máxima

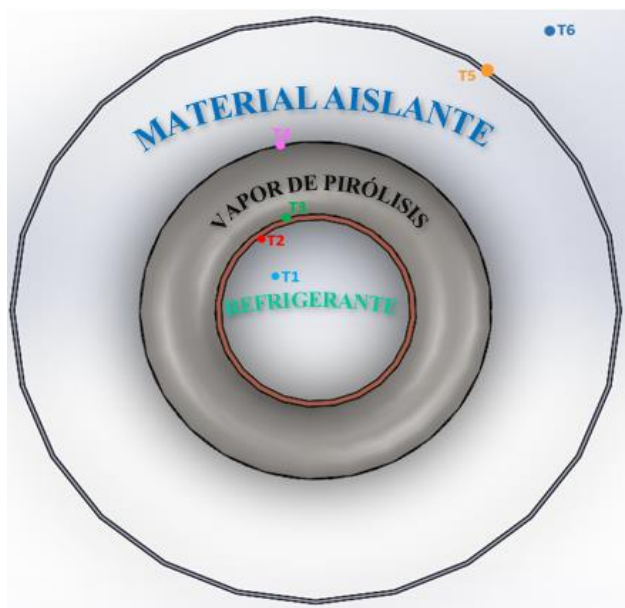


4.4. Diseño del intercambiador de calor

Como se describe en la sección 2.5.1 se tienen diferentes mecanismos de transferencia de calor. Para el diseño del intercambiador de calor, se asume la transferencia de calor en diferentes medios, en la figura 47 se presentan los materiales y la disipación de temperatura que se estima atraviese la tubería que conforma el intercambiador de calor.

Figura 47

Temperaturas a través de la tubería del intercambiador de calor



T_1 : Temperatura del refrigerante.

T_2 : Temperatura de la pared interna de la tubería de cobre.

T_3 : Conductividad en el espesor de la tubería de cobre.

T_4 : Conductividad entre pared externa de la tubería de cobre y la espiral de acero inoxidable.

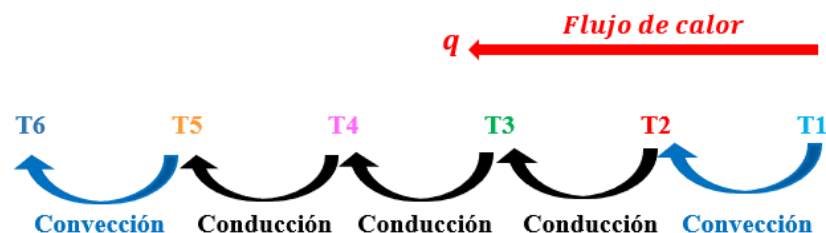
T_5 : Temperatura en el material aislante.

T_6 : Temperatura del exterior.

El flujo de calor q se transmite desde el interior de la tubería de cobre hacia el exterior (medio ambiente), en la figura 48 se presenta los mecanismos de transferencia de calor que se desarrollan en las tuberías del intercambiador de calor.

Figura 48

Transferencia de calor en las tuberías del intercambiador



En el sistema de condensación se establece que el flujo del refrigerante se mantenga a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura: $T_1 = 2\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 35.6\text{ }^{\circ}\text{F}$.

Temperatura exterior es la temperatura promedio de la ciudad de Latacunga: $T_6 = 15\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 59\text{ }^{\circ}\text{F}$.

4.4.1. Dimensiones de las tuberías del intercambiador de calor

El intercambiador de calor se encuentra formado por:

Una tubería de cobre con radio interior $r_1 = 0.0392\text{ pie}$ y radio exterior $r_2 = 0.0441\text{ pie}$.

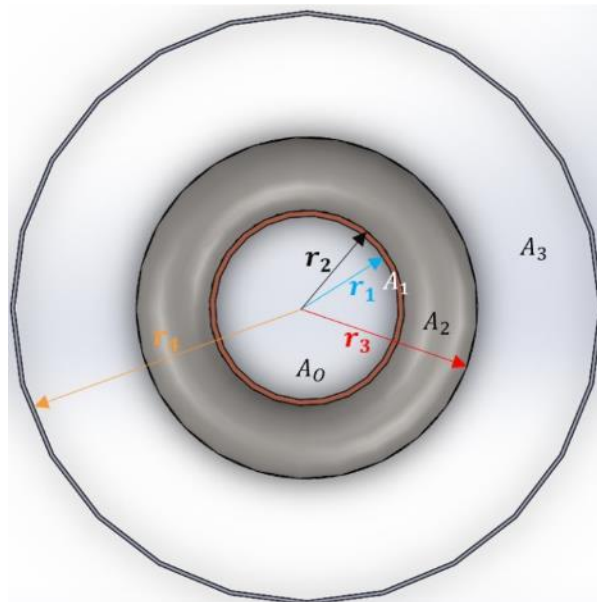
Una tubería de acero inoxidable con radio exterior $r_3 = 0.0499\text{ pie}$.

La última capa es el material aislante con radio exterior $r_4 = 0.125\text{ pie}$.

En la figura 49 se detallan las áreas y radios necesarios para el cálculo de la pérdida de calor en el intercambiador.

Figura 49

Valores de radios del intercambiador de calor



4.4.2. Cálculo de la pérdida de calor en el intercambiador

En la tabla 20 se calculan las variables de diseño del intercambiador de calor, las constantes para la ecuación (16) se detallan en la sección 2.8.1.

Tabla 20

Cálculos para el intercambiador de calor

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
	$A_o = 2\pi L r_1$	$A_o = 0.2463 [pie^2]$
	$A_1 = 2\pi L (r_2 - r_1)$	$A_1 = 0.0308 [pie^2]$
	$A_2 = 2\pi L (r_3 - r_2)$	$A_2 = 0.0364 [pie^2]$
	$A_3 = 2\pi L (r_4 - r_3)$	$A_3 = 0.4719 [pie^2]$
$L = 1 [pie]$	$A_{1 Lm} = \frac{A_1 - A_o}{\ln \left(\frac{A_1}{A_o} \right)}$	$A_{1 Lm} = 0.1037 [pie^2]$
$r_1 = 0.0392 [pie]$	$A_{2 Lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)}$	$A_{2 Lm} = 0.0335 [pie^2]$
$r_2 = 0.0441 [pie]$	$A_{3 Lm} = \frac{A_3 - A_2}{\ln \left(\frac{A_3}{A_2} \right)}$	$A_{3 Lm} = 0.16997 [pie^2]$
$r_3 = 0.0499 [pie]$	$A_{ext} = 2\pi L r_4$	$A_{ext} = 0.7854 [pie^2]$
$r_4 = 0.125 [pie]$	Ecuación (26)	$q = -0.5720 \left[\frac{btu}{h} \right]$

El valor negativo que se obtiene de la pérdida de calor "q", es porque el sistema de condensación se encuentra extrayendo el calor que posee el vapor de pirólisis; entonces el sistema de condensación va a realizar un buen enfriamiento de los gases, logrando condensar y transformarlo en líquido.

En el anexo 22.4 se presentan los cálculos realizados para este componente.

4.4.3. Modelado del intercambiador de calor

En la figura 50 se presenta el CAD del intercambiador que se encuentra formado por las tuberías descritas en la sección 4.4.1. En el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 50

Modelado del intercambiador de calor



4.5. Diseño del depósito

Para el diseño del depósito se utiliza la Norma ASME VIII y se aplica el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la sección 3.1. Se utilizan las constantes detalladas en la tabla 15 y se calculan las variables de diseño en la tabla 21.

Tabla 21

Cálculos para el depósito

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$d = 12 [cm]$ $r = 6 [cm]$ $h = 23 [cm]$	$V_{tc} = \pi r^2 h$	$V_{tc} = 2601.2387 [cm^3]$
$P_O = 1 atm = 101325 [Pa]$ $P_H = 2252.7851 [Pa]$	Ecuación (3) Ecuación (4) La presión de diseño es P mayor	$P = 113935.56 [Pa]$ $P = 310420.56 [Pa]$ $P = 310420.56 [Pa]$
	Ecuación (8)	$310420.56 [Pa]$ $< 18326000 [Pa]$
	Ecuación (6)	$t = 0.00039282 [m]$ $t = 0.3928 [mm]$
$t_{real} = 1.5 [mm]$	Ecuación (7) Ecuación (9) Ecuación (10)	$P_{m\acute{a}x} = 1172413.793 [Pa]$ $\sigma_1 = 12.4168 [MPa]$ $\sigma_2 = 6.2084 [MPa]$

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
	Ecuación (11)	$\tau_{m\acute{a}x} = 6.2084 \text{ [MPa]}$
	Ecuación (15)	$FS = 5.48$

El factor de seguridad para recipientes a presión según el código ASME se visualiza en la tabla 3. En los cálculos se obtiene un factor de 5.48 por lo tanto, se acepta el diseño del depósito. En el anexo 22.5 se presentan los cálculos completos de este componente.

4.5.1. Modelado del depósito

En la figura 51 se presenta el diseño CAD del depósito y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 51

Modelado del depósito



4.5.2. Análisis de las variables de diseño

Para validar el diseño del depósito se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE). En esta sección se realiza el estudio de las variables de diseño utilizando un software de análisis

de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados obtenidos en la simulación CAE del depósito.

Primer análisis CAE del depósito. Según recomendaciones de asesores externos, al finalizar el proceso de la pirólisis se puede obtener aproximadamente la 1/4 parte de la carga inicial, es decir 1.25 Kg, entonces se dimensiona la capacidad del depósito a 2.6 Kg.

En la simulación CAE se ingresa una fuerza (F) que se obtiene al multiplicar la masa $m = 2.6 \text{ Kg}$ por la gravedad. Según Torres el valor de la gravedad en la ciudad de Latacunga es (2005, p. 139):

$$g = 977211.13 \text{ mGal} \rightarrow g = 9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = mg$$

$$F = (2.6 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F = 25.40 \text{ N}$$

También en la simulación CAE se ingresa el valor de la presión del diseño a la cual se encuentra sometido el depósito.

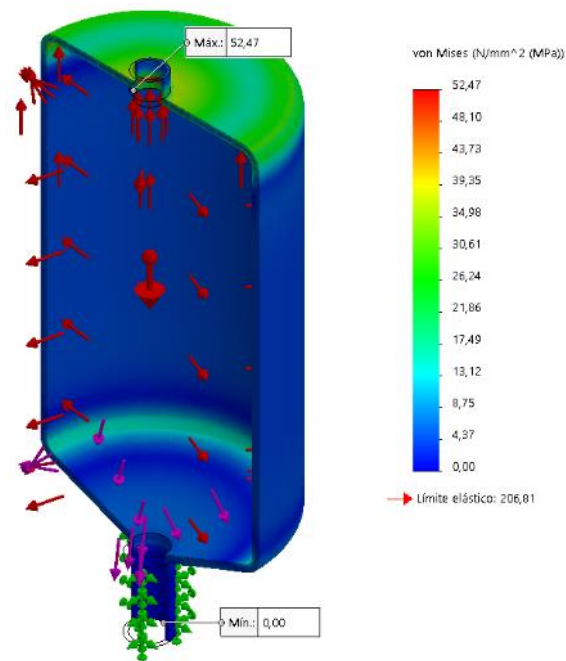
$$P = 310420.56 \text{ Pa}$$

Por los resultados obtenidos en la simulación CAE el diseño del depósito se acepta, porque resiste a la presión de diseño.

En la figura 52 se muestra el esfuerzo máximo de Von Misses igual a 52.47 MPa que representa un 25.37 % del límite elástico, este esfuerzo se localiza en la parte superior del depósito, donde se acopla con la tubería de acero inoxidable proveniente del intercambiador de calor.

Figura 52

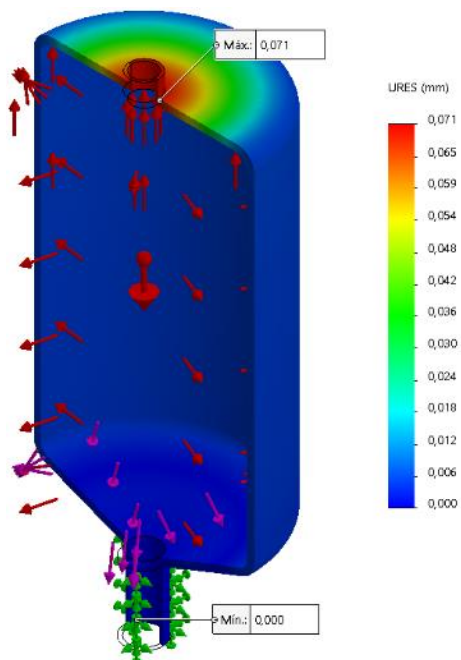
Von Misses del depósito para presión de diseño



En la figura 53 el depósito tiene una deformación en la parte superior igual a 0.071 mm.

Figura 53

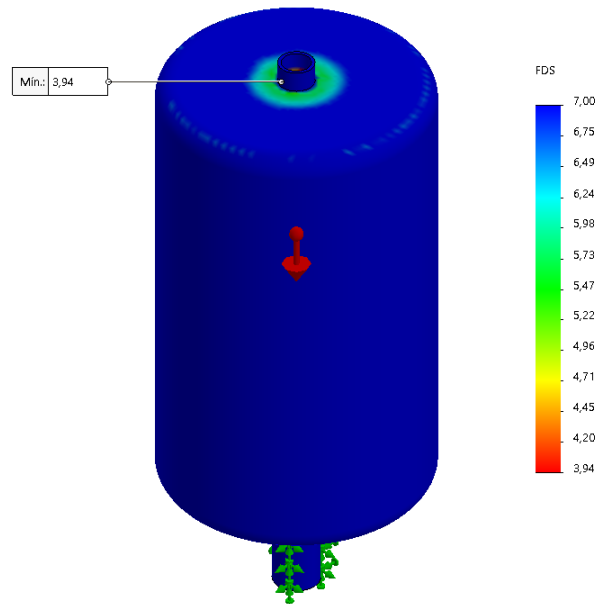
Deformación del depósito para presión de diseño



En la figura 54 se presenta el factor de seguridad del depósito con un valor de 3.94, lo que representa que soporta las condiciones de trabajo.

Figura 54

Factor de seguridad del depósito para presión de diseño



Segundo análisis CAE del reactor térmico. Es necesario realizar un análisis CAE utilizando la presión de trabajo máxima permisible, con la finalidad de evaluar la resistencia del depósito al ser sometido a condiciones de trabajo extremas:

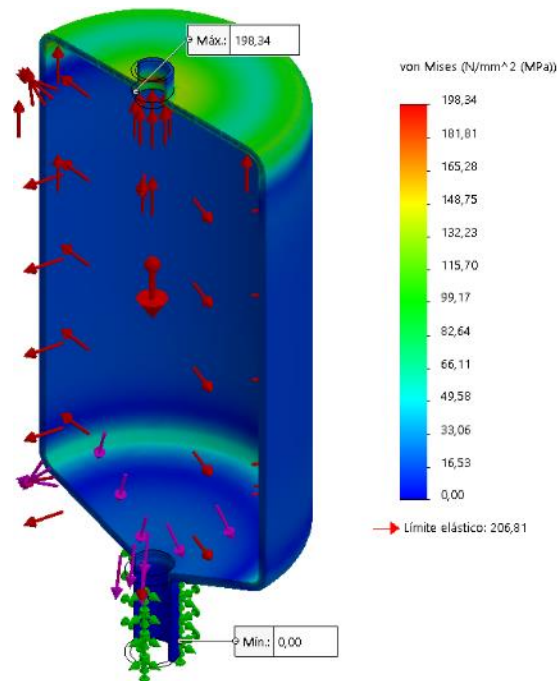
$$P_{m\acute{a}x} = 1172413.793 \text{ Pa}$$

$$F = 25.40 \text{ N}$$

Los resultados del segundo análisis CAE para el depósito diseñado, demuestran que resiste la presión de trabajo máxima permisible. En la figura 55 se detalla el valor del esfuerzo máximo de Von Mises ubicado en la parte superior de 198.34 MPa que representa el 95.90% del límite elástico, por lo que no es recomendable operar a condiciones de trabajo extremas.

Figura 55

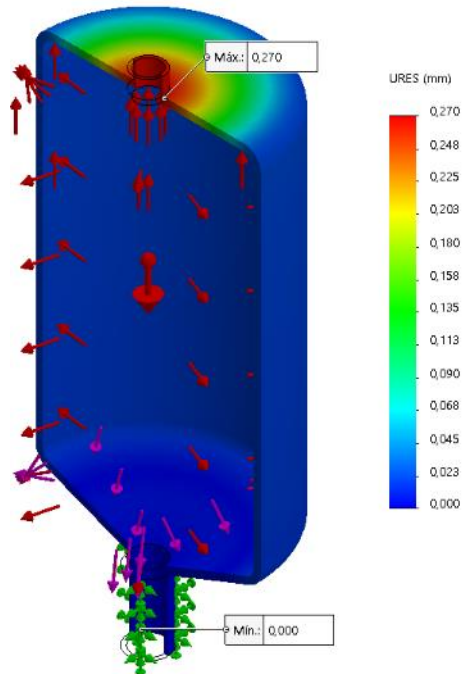
Von Mises del depósito para presión de trabajo máxima



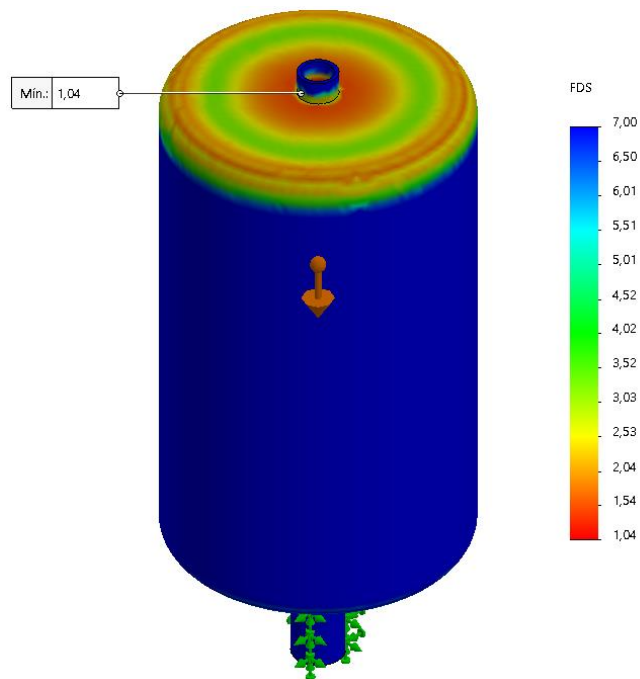
Según el análisis CAE la deformación en el depósito es 0.270 mm , como se visualiza en la figura 56. Esta máxima deformación se localiza en la parte superior del depósito, donde se acopla con la tubería de acero inoxidable proveniente del intercambiador de calor. El factor de seguridad para el depósito sometido a una presión de trabajo máxima permisible es igual a 1.04, como se visualiza en la figura 57. Como el FS baja drásticamente se concluye que no se debe operar en condiciones de trabajo extremas.

Figura 56

Deformación del depósito para presión de trabajo máxima

**Figura 57**

Factor de seguridad del depósito para presión de trabajo máxima



4.6. Diseño de la tolva

En la tabla 22 se calculan las variables de diseño. En el anexo 22.6 se presentan los cálculos completos de este componente.

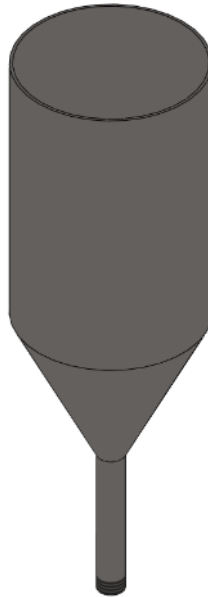
Tabla 22

Cálculos para la tolva

Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$V_C = 7 [lt]$ Asumir: $V_{cono} = 1.5 [lt]$ $\theta = 60^\circ$	$V_{inútil} = 20\% V_C$ $V_{total} = V_C + V_{inútil}$	$V_{inútil} = 1.4 [lt]$ $V_{total} = 8.4 [lt]$
	$r = \sqrt[3]{\frac{3 V_{cono}}{\pi \tan(\theta)}}$	$r = 9.38 [cm]$ $r \approx 9 [cm]$
	$h_1 = r \tan(\theta)$	$h_1 = 15.58 [cm]$
	Recalcular el V_{cono} $V_{cono} = \frac{1}{3} (\pi r^3 \tan(\theta))$ $V_{cilindro} = V_{total} - V_{cono}$ $h_2 = \frac{V_{cilindro}}{\pi r^2}$	$V_{cono} = 1.321 [lt]$ $V_{cilindro} = 7.079 [lt]$ $V_{cilindro} = 7079 [cm^3]$ $h_2 = 27.81 [cm]$

4.6.1. Modelado de la tolva

En la figura 58 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) de la tolva y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 58*Modelado de la tolva***4.6.2. Análisis de las variables de diseño**

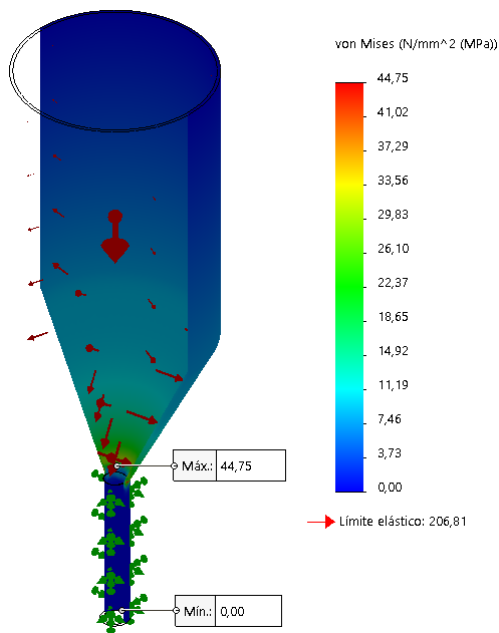
Para validar el diseño de la tolva se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE). En esta sección se realiza el estudio de las variables de diseño utilizando un software de análisis de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados obtenidos en la simulación CAE de la tolva.

Al iniciar el proceso de la pirólisis se carga 5 Kg de la materia prima en la tolva. En la simulación CAE se ingresa una fuerza (F) que se obtiene al multiplicar la masa $m = 5 \text{ Kg}$ por la gravedad. Según Torres el valor de la gravedad en la ciudad de Latacunga es (2005, p. 139):

$$g = 977211.13 \text{ mGal} \rightarrow g = 9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = mg = (5 \text{ Kg}) \left(9.7721113 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 48.86 \text{ N}$$

Por los resultados de la simulación CAE, el diseño de la tolva se acepta porque resiste el peso de la materia. En la figura 59 se observa el esfuerzo máximo de Von Mises de 44.75 MPa que representa el 21.64 % del límite elástico que se localiza en la parte más angosta del cono.

Figura 59*Von Misses de la tolva*

En la figura 60 localizada en el cono se observa una deformación máxima de 0.015 mm.

En la figura 61 la tolva tiene un factor de seguridad igual a 4.62. lo que valida el diseño realizado.

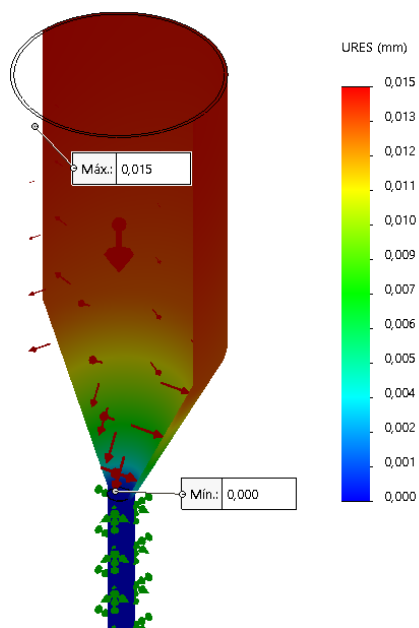
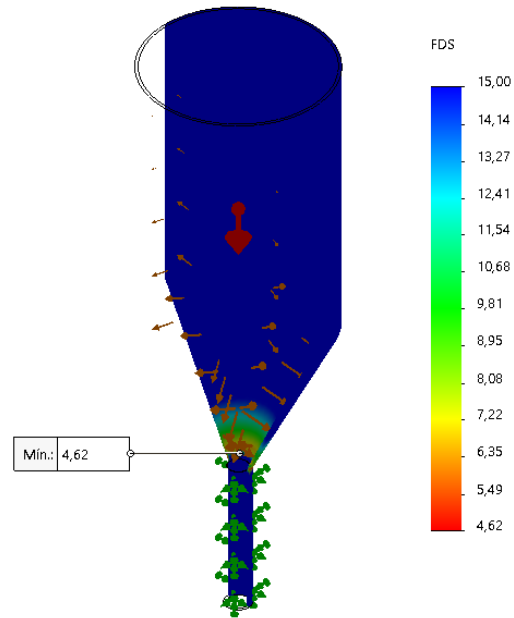
Figura 60*Deformación de la tolva*

Figura 61

Factor de seguridad de la tolva



4.7. Diseño del agitador

En la tabla 23 se calculan las variables de diseño. En el anexo 22.7 se presentan los cálculos completos de este componente.

Tabla 23

Cálculos para el agitador

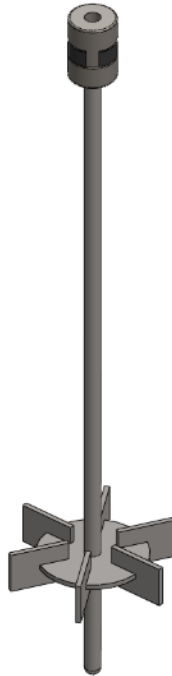
Parámetros iniciales	Ecuación	Valor calculado
$\rho = 0.77 \frac{g}{cm^3} = 770 \frac{Kg}{m^3}$	Ecuación (18)	$Re = 1.506967$
$\mu = 6.387 \frac{Kg}{ms}$	Ecuación (20)	$P = 0.648679[w]$ $P = 8.698936 \times 10^{-4}[hp]$
$D_a = 0.10 m$	Ecuación (21)	$P_m = 1.08736 \times 10^{-3}[hp]$
$n = 1.25 \frac{rev}{s}$	Ecuación (23)	$T_m = 0.0825924 [N - m]$
$\eta = 0.8$	Ecuación (25)	$d = 3.019739 \times 10^{-3} [m]$ $d = 3.02 [mm]$

4.7.1. Modelado del agitador

En la figura 62 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) del agitador y en el anexo 23 se muestran los planos mecánicos.

Figura 62

Modelado del agitador



4.7.2. Análisis de las variables de diseño del agitador

Para validar el diseño del agitador se utiliza la ingeniería asistida por computador (CAE). En esta sección se realiza el estudio de las variables de diseño utilizando un software de análisis de elementos finitos. En el anexo 24 se presenta el informe completo que permite visualizar todos los parámetros y resultados obtenidos en la simulación CAE del agitador.

Para la simulación CAE del agitador se ingresan los siguientes parámetros físicos que son datos del motor DC.

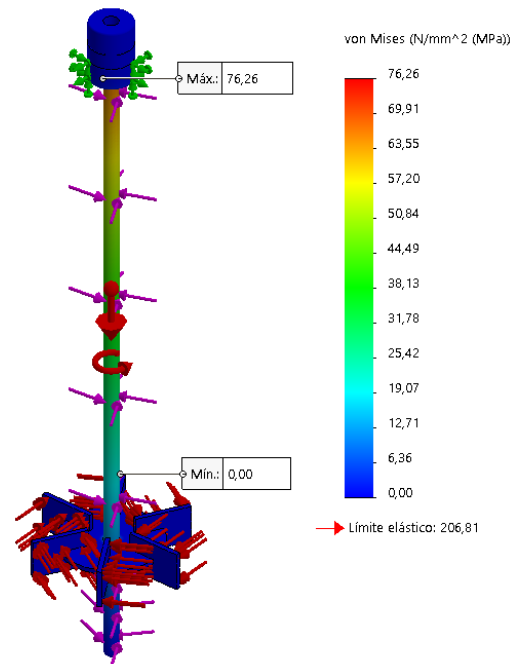
$$T = 6.72 \text{ N} - m$$

$$n = 75 \text{ rpm}$$

Según los resultados obtenidos en la simulación CAE, el diseño del agitador se acepta debido a que este componente resiste la acción del torque y la velocidad de rotación del motor. En la figura 63 se presenta el esfuerzo máximo de Von Misses de 76.26 MPa lo que representa un 36.87% del límite elástico, este esfuerzo se localiza en la unión del eje de transmisión con el matrimonio mecánico.

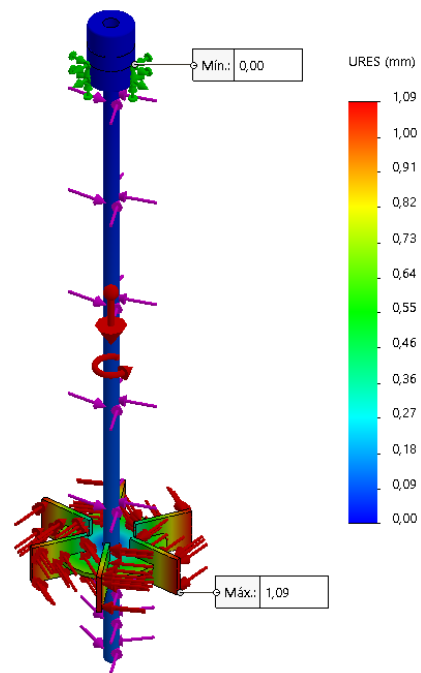
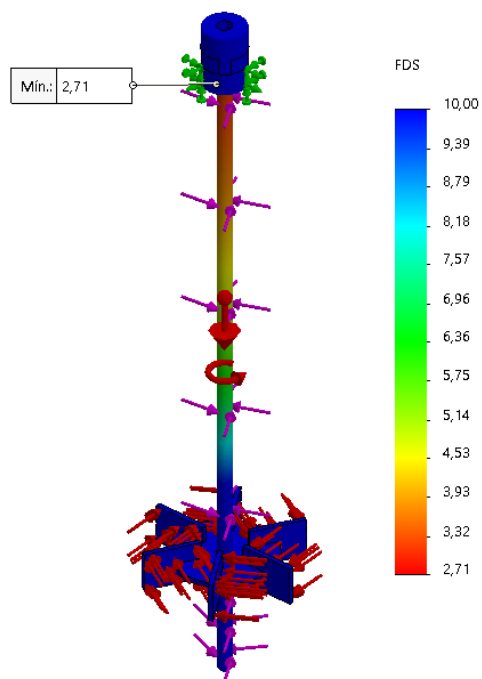
Figura 63

Von Misses del agitador



En la figura 64 se observa que el agitador tiene una máxima deformación de 1.09 mm . Esta deformación se localiza en la unión del eje de transmisión con el matrimonio mecánico.

La simulación CAE para el agitador da como resultado un factor de seguridad igual a 2.71 ubicado en el eje de transmisión, como se visualiza en la figura 65, de esta manera se valida el diseño, ya que el FS para el agitador es mayor que 2 .

Figura 64*Deformación del agitador***Figura 65***Factor de seguridad del agitador*

4.8. Selección de componentes normalizados

4.8.1. Servoválvulas

La selección de las servoválvulas implementadas en el presente proyecto, se realiza tomando en consideración la presión de diseño calculada; cabe mencionar que se supera dicho valor para dar un margen de aceptación en el caso de que exista un aumento repentino de presión a lo largo del proceso de pirólisis.

En la figura 66 se observa la servoválvula implementada al final de la tolva de alimentación, su función es permitir el ingreso controlado de la materia prima. La presión que tiene que soportar esta servoválvula es la presión de trabajo máxima permisible del reactor térmico, calculada en la sección 4.1.3:

$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 Pa$$

En el anexo 8 se presentan las características de la servoválvula de acero inoxidable, en donde se detalla que puede trabajar con una presión máxima en el medio:

$$\text{Max Medium Pressure } P = 1.0 MPa$$

Figura 66

Servoválvula de la tolva de alimentación



En la figura 67 se presenta la servoválvula de bronce que actúa como una válvula de alivio, se encuentra ubicada en el reactor térmico. Por este motivo se debe seleccionar una servoválvula que soporte una presión de trabajo máxima permisible de:

$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ Pa}$$

Esta servoválvula se abre en el caso de que exista una sobrepresión en el proceso de pirólisis. En el anexo 9 se presenta las características principales de la servoválvula de bronce, de donde se obtiene que este componente soporta una presión de trabajo:

$$P = 0 - 9 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \rightarrow P = 882598.68 \text{ Pa}$$

Figura 67

Servoválvula de bronce



4.8.2. Transductores de presión

La servoválvula de bronce va a tener su señal de control gracias al monitoreo constante del transductor de presión que se indica en la figura 68. El transductor de presión se encuentra localizado en la tapa del reactor térmico, por ende, este componente debe ser capaz de soportar una presión de trabajo máxima permisible de:

$$P_{m\acute{a}x} = 856115.11 \text{ Pa}$$

Como se establece en el anexo 10 el transductor tiene un rango de medida de presión:

$$P = 0 - 1 \text{ MPa}$$

Figura 68

Transductor de presión



4.8.3. Motor DC

El motor DC es seleccionado en base al cálculo realizado en la sección 4.7.2. Donde se establece que el torque requerido para el motor del agitador es:

$$T_m = 0.082592463 \text{ N} - m$$

En la figura 69 se presenta el motor DC que se implementa para mover el agitador que se encuentra en el interior de reactor térmico, según la información descrita en el anexo 11, el motor implementado tiene un torque:

$$T = 6.72 \text{ N} - m$$

Figura 69

Motor DC del agitador



4.8.4. Termocuplas

Termocupla tipo K para la tolva de alimentación. En la tolva de alimentación se realiza el precalentamiento de la materia prima a 140°C , para el control de la temperatura se implementa una termocupla tipo K como se visualiza en la figura 70. En el anexo 12 se presenta su rango de temperatura:

$$T = 0 - 600^{\circ}\text{C}$$

Figura 70

Termocupla tipo K para la tolva de alimentación



Termocupla tipo K para el reactor térmico. En el reactor térmico se realiza el proceso de pirólisis donde se requiere que la temperatura llegue a los 400°C , para el control de la temperatura se implementa una termocupla tipo K como se visualiza en la figura 71. En el anexo 13 se presenta su rango de temperatura:

$$T = 0 - 600^{\circ}\text{C}$$

Figura 71

Termocupla tipo K para el reactor térmico



4.8.5. Resistencias eléctricas

Las resistencias eléctricas son el mecanismo que permite elevar la temperatura en la tolva de alimentación y en el reactor térmico.

La resistencia tipo tubo pequeño implementada en la tubería recta de la tolva tiene una potencia de 600 W y se conecta a 220 V . La resistencia implementada en la parte cónica de la tolva tiene una potencia de 1600 W y se conecta a 220 V , finalmente al reactor térmico lo cubre una resistencia térmica tubular de 3800 W con conexión a 220 V .

Como se visualiza en la figura 72 las resistencias térmicas se encuentran ensambladas para que exista una efectiva transferencia de calor.

Figura 72

Resistencia térmica implementada en la tolva de alimentación



4.8.6. Material aislante

Fibra de cerámica. El material mostrado en la figura 73 es fibra de cerámica, se utiliza para envolver al reactor térmico y la parte cónica de la tolva de alimentación, la finalidad es mantener la temperatura en dichas zonas. La fibra de cerámica posee diferentes propiedades físicas que se detallan en el anexo 14.

Figura 73

Fibra de cerámica



Poliuretano. En el interior del intercambiador se encuentra el serpentín, por el interior de esta tubería se traslada el vapor de pirólisis, este conjunto se encuentra contenido en una camisa rellena de poliuretano, como se visualiza en la figura 74. La finalidad del poliuretano es conservar la temperatura para que se produzca una buena condensación del vapor de pirólisis.

Figura 74

Camisa de la condensación rellena de poliuretano



4.8.7. Torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento se ensambla con el objetivo de aislar los elementos que conforman la válvula de alivio, porque se encuentran en la tapa del reactor térmico que tiene su operación a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el anexo 15 se describen las características más relevantes de la torre de enfriamiento mostrada en la figura 75.

Figura 75

Torre de enfriamiento



4.8.8. Perlas de vidrio

La columna de reflujo se encuentra rellena de 2.5 Kg de perlas de vidrio de diámetro entre $3.5 - 4\text{ mm}$, como se visualiza en la figura 76. Este material tiene como función dejar pasar el vapor ligero del proceso de pirólisis; caso contrario el vapor más pesado regresa al interior del reactor y se fracciona en un vapor más ligero hasta que logra desplazarse en el interior de la columna de reflujo. En el anexo 16 se describen las propiedades de las perlas de vidrio.

Figura 76*Perlas de vidrio***4.8.9. Componentes del sistema de condensación**

Compresor. En el anexo 17 se presentan los siguientes valores que posee el compresor utilizado en el sistema de refrigeración:

Potencia de entrada (PE):

$$PE = 145 \text{ W}$$

Valor del coeficiente de rendimiento (COP):

$$COP = 1.49 \text{ W/W}$$

$$COP = \frac{PS}{PE} = 1.49 \text{ W/W}$$

$$PS = COP \times PE = 1.49 \text{ W/W} \times 145 \text{ W}$$

$$PS = 216.05 \text{ W}$$

$$P = \text{TRABAJO (W)} / \text{TIEMPO (1 h)}$$

$$\text{TRABAJO (W)} = P \times \text{TIEMPO}$$

$$P = 216.05 \text{ W} = 216.05 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 12963 \frac{\text{J}}{\text{h}}$$

$$W = 12963 \frac{J}{h} \times 1 h = 12963 J$$

Con la relación obtenida se valida la selección del compresor GUY60NR, que se visualiza en la figura 77.

Figura 77

Compresor GUY60NR



Condensador. El condensador que se observa en la figura 78 es adquirido porque cumple con el rendimiento necesario para el sistema de condensación. Como se describe en el anexo 18 tiene un rendimiento de:

$$2.040 \text{ btuh}$$

El valor del rendimiento del condensador es superior al valor que requiere el sistema de condensación:

$$-0.5720 \frac{\text{btu}}{h}$$

Figura 78*Condensador CB-72*

Motor ventilador. El motor ventilador visualizado en la figura 79, es el encargado de girar las aspas para impulsar el aire con dirección al condensador, de esta manera se genera una eficaz refrigeración del gas freon 134a. Las características técnicas del motor ventilador se encuentran en el anexo 19.

Figura 79*Motor ventilador ELCO*

Refrigerante. El refrigerante freon 134a como se observa en la figura 80, es el compuesto estándar más utilizado en diversas unidades de refrigeración. Las propiedades químicas de este componente se encuentran descritas en el anexo 20.

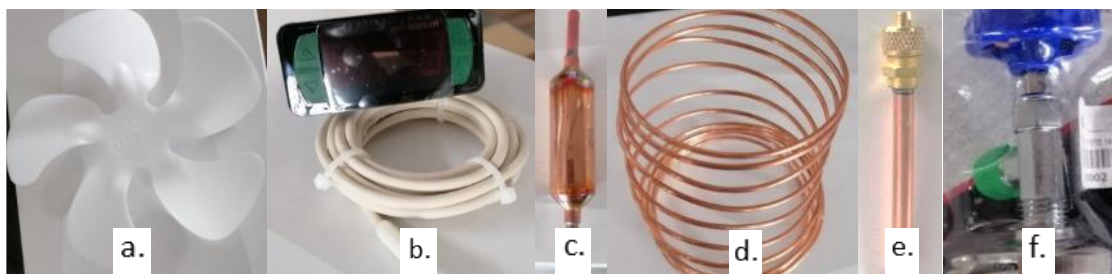
Figura 80*Refrigerante freon 134a*

Los componentes complementarios para el funcionamiento del sistema de refrigeración:

- **Aspa de motor:** genera un flujo de aire que se dirige al condensador para facilitar la condensación del gas refrigerante freon 134a, figura 81 a.
- **Controlador de refrigeración:** controla la temperatura a la que sale el gas refrigerante al final del del serpentín, figura 81 b.
- **Filtro secador soldable:** evita el paso de impurezas o humedad hacia el tubo capilar, figura 81 c.
- **Tubería capilar:** es un dispositivo de expansión, porque ayuda a que el gas refrigerante pierda la mayor presión con la que viene del compresor; al perder presión se expande en la salida hacia el condensador (Ortega, 2020). Figura 81 d.
- **Válvula de carga:** permite sellar al compresor mientras se carga o descarga el gas refrigerante, figura 81 e.
- **Válvula para pote:** ayuda a recargar el gas refrigerante al compresor, figura 81 f.

Figura 81

Componentes complementarios del sistema de condensación



4.8.10. Sensor de peso

El sensor utilizado para el pesaje de la materia prima es una celda de carga como se muestra en la figura 82. Este dispositivo es un transductor que soporta cargas de compresión, tensión y flexión de hasta 20 *Kg* y la convierte en una señal eléctrica que es proporcional a la carga que se encuentra censando. Se utiliza una celda de carga con galgas extensiométricas porque tienen gran precisión y durabilidad que son factores importantes para ser implementadas en el proyecto.

Figura 82

Sensor de peso



Se describen las características más relevantes de la celda de carga. Los detalles más específicos se encuentran en el anexo 21

- Carga nominal: 20 *Kg*.

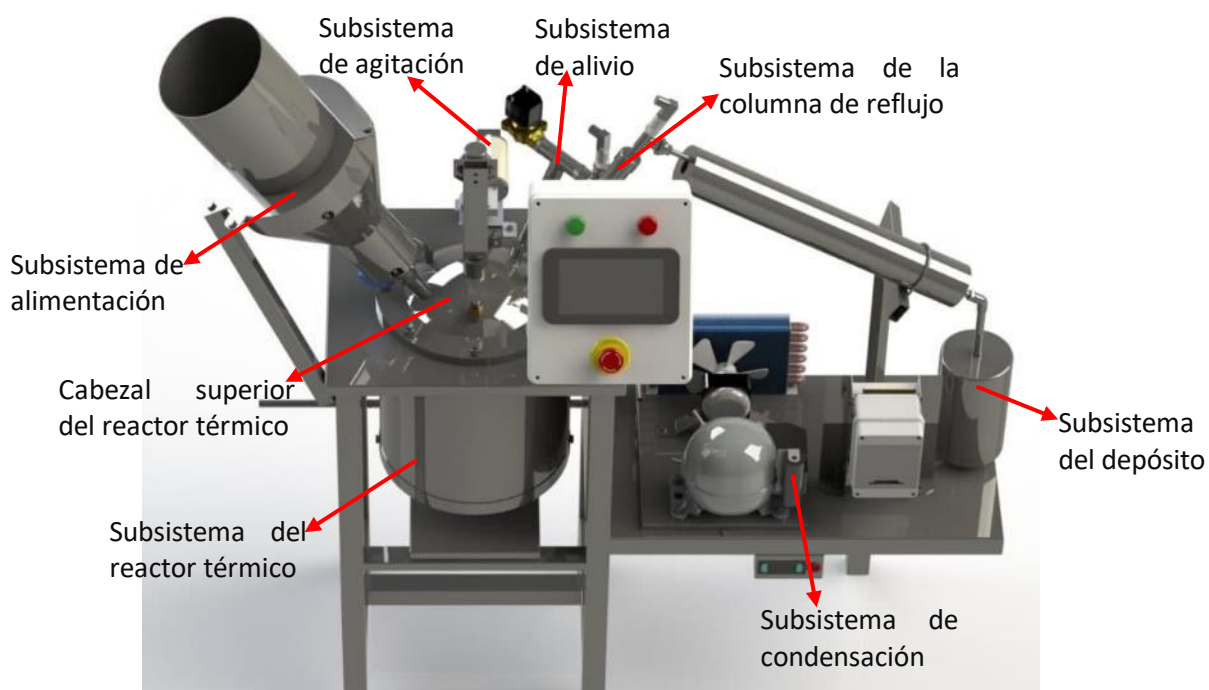
- Tipo de salida: 4 cables (puente Wheatstone).
- Longitud de los cables: 16 cm.
- Tipo de material: Aluminio.

4.9. Ensamble del sistema de reacción de pirólisis

El sistema de reacción de pirólisis es diseñado utilizando un software CAD se presenta en la figura 83.

Figura 83

CAD del sistema de reacción



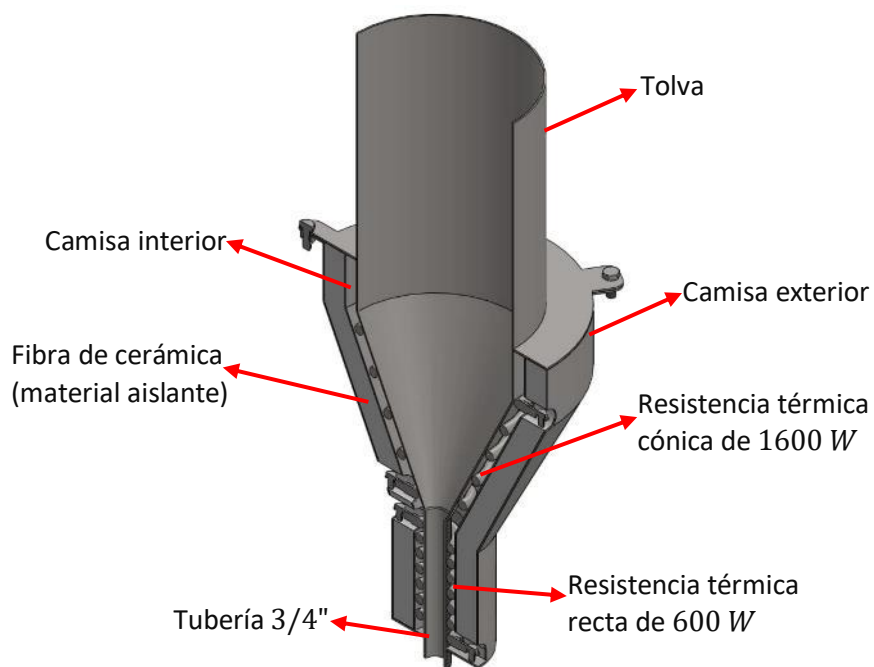
Se presenta el ensamble de todos los componentes que conforman cada subsistema.

4.9.1. CAD del subsistema de alimentación

Como se describe en la figura 84 el subsistema de alimentación se conforma de la tolva, camisa exterior, fibra de cerámica (material aislante), camisa interior, resistencia térmica cónica y la resistencia térmica en la parte recta de la tubería de 3/4".

Figura 84

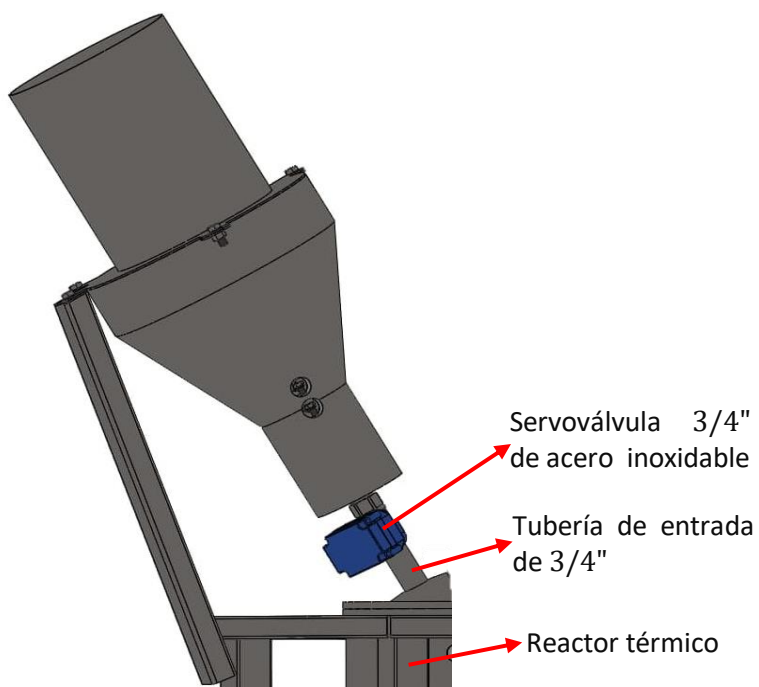
CAD del subsistema de alimentación. Vista de corte



En la figura 85 se presenta el ensamble del subsistema de alimentación, en la parte inferior se encuentra la servoválvula de acero inoxidable y la tubería 3/4" que ingresa al reactor térmico.

Figura 85

CAD del subsistema de alimentación. Vista isométrica

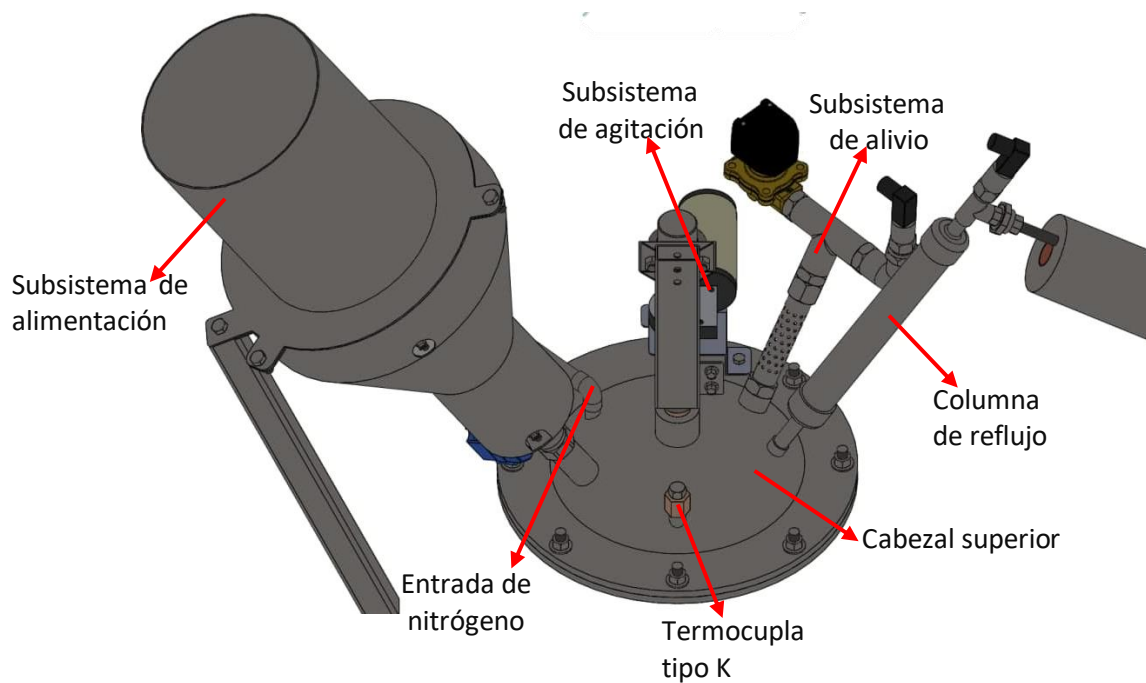


4.9.2. CAD del subsistema del reactor térmico

El cabezal superior del reactor térmico se encuentra localizado de una manera fija en la parte superior de la mesa, en la figura 86 se detallan todos los subsistemas y componentes que se ensamblan en este cabezal.

Figura 86

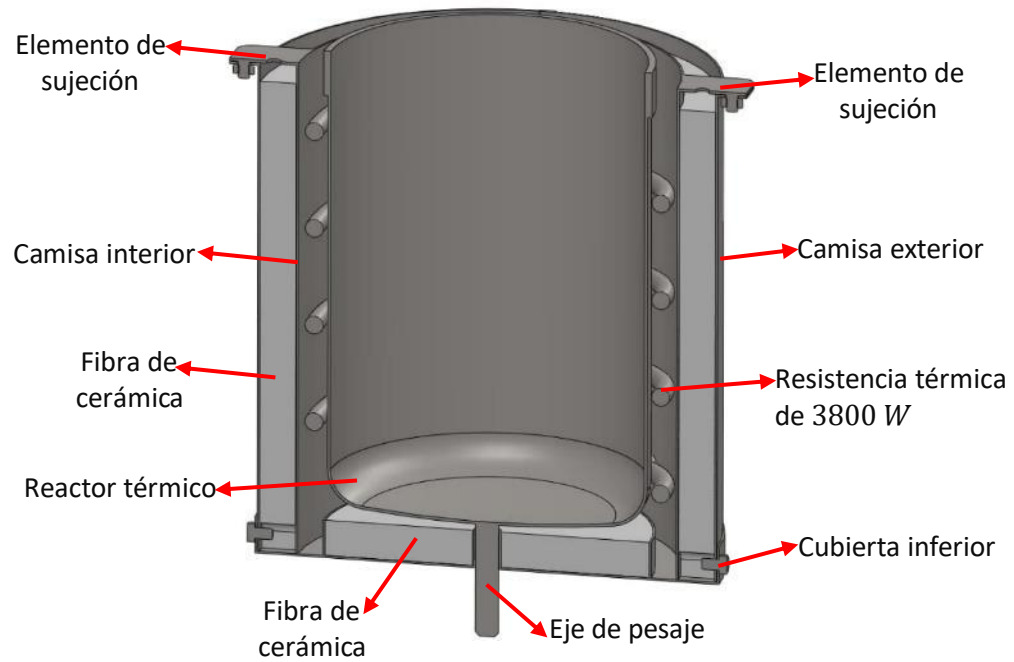
CAD del cabezal superior del reactor térmico



El subensamble del reactor térmico se monta desde la parte inferior de la mesa y se encuentra formado como se describe en la figura 87.

Figura 87

CAD del reactor térmico. Vista de corte



En la figura 88 se presenta el diseño CAD del subensamble del reactor térmico.

Figura 88

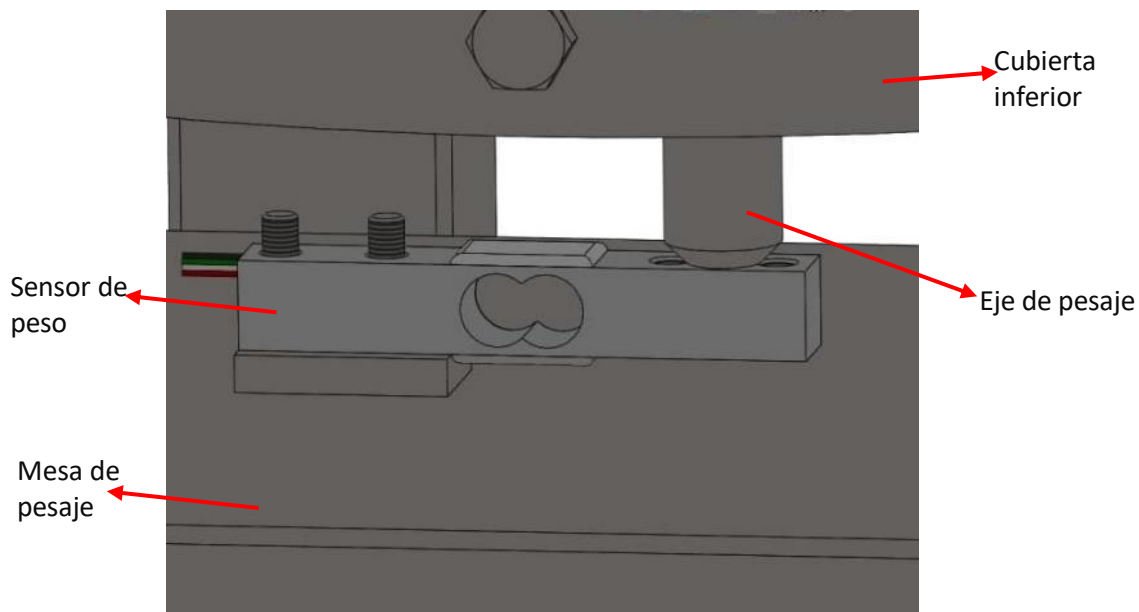
CAD del reactor térmico. Vista isométrica



Mesa de pesaje. En la figura 89 se visualiza la cubierta inferior del reactor térmico, el eje de pesaje y el sensor de peso, todos estos elementos se ensamblan sobre la mesa de pesaje.

Figura 89

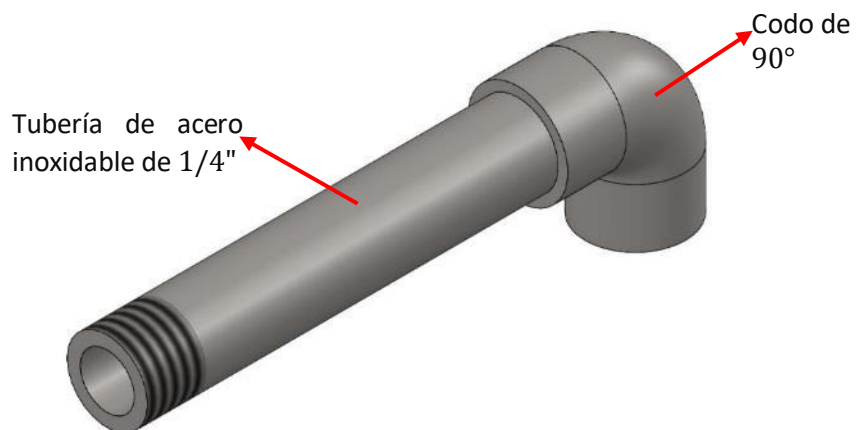
CAD de la mesa de pesaje



Entrada de nitrógeno. Para el ingreso del nitrógeno en el sistema de pirólisis se ensambla una tubería de 1/4" de acero inoxidable en el cabezal superior como se observa en la figura 90.

Figura 90

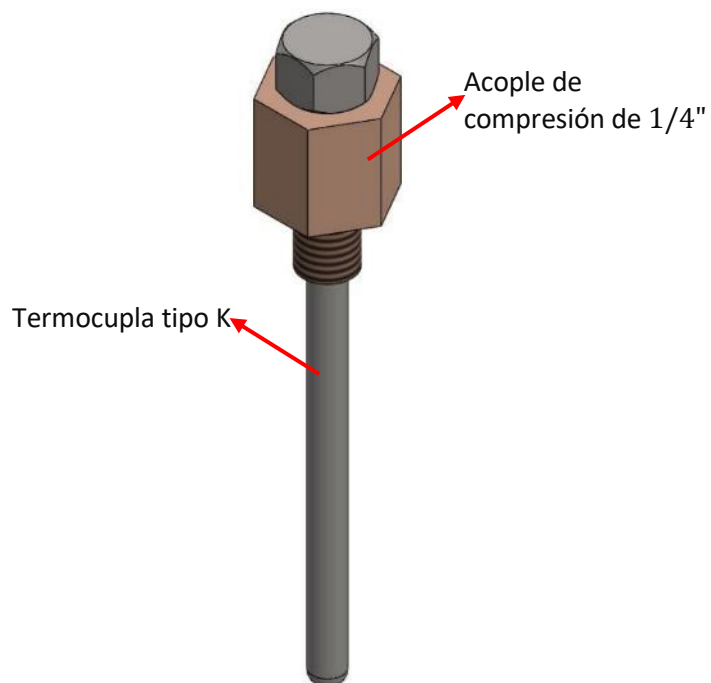
CAD de la entrada de nitrógeno



Termocupla tipo K. La termocupla tipo K que se ensambla en el cabezal superior se observa en la figura 91.

Figura 91

CAD de la termocupla tipo K

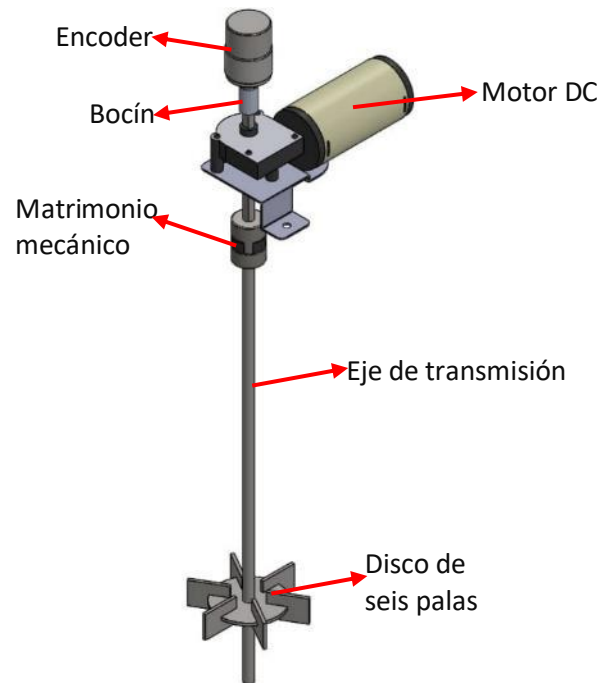


4.9.3. CAD del subsistema de agitación

El subsistema de agitación como se detalla en la figura 92 se compone del encoder, bocín, motor DC, matrimonio mecánico, eje de transmisión y el disco de seis palas.

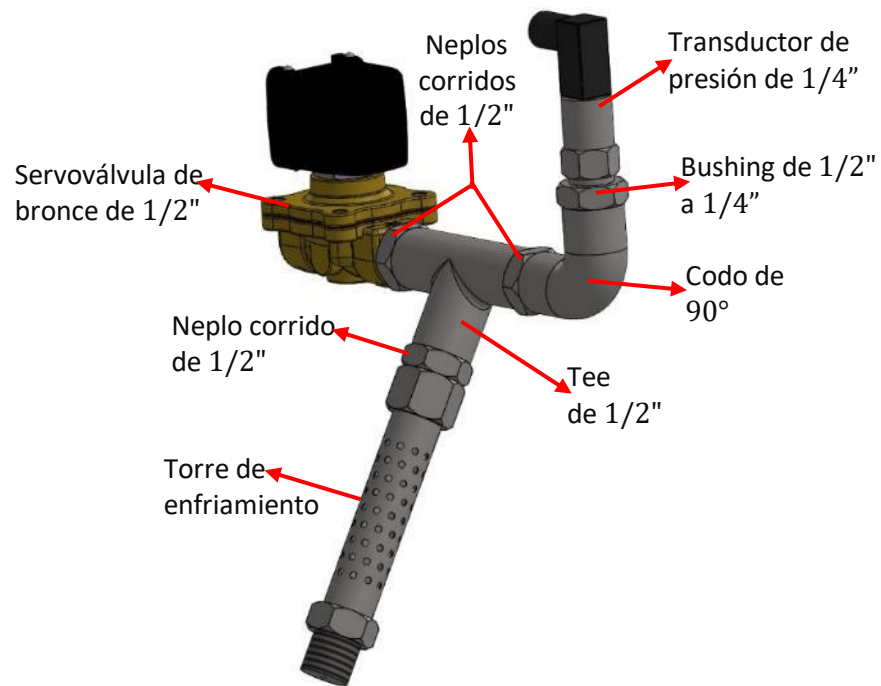
Figura 92

CAD del subsistema de agitación

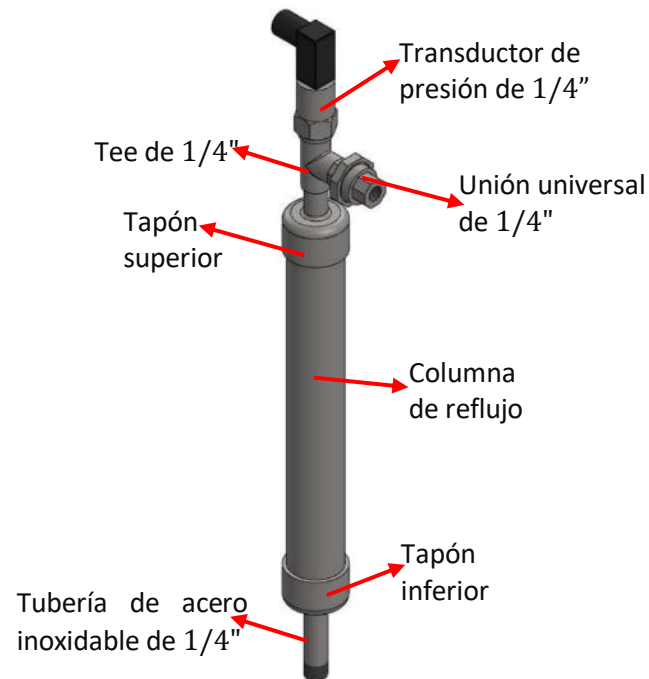


4.9.4. CAD del subsistema de alivio

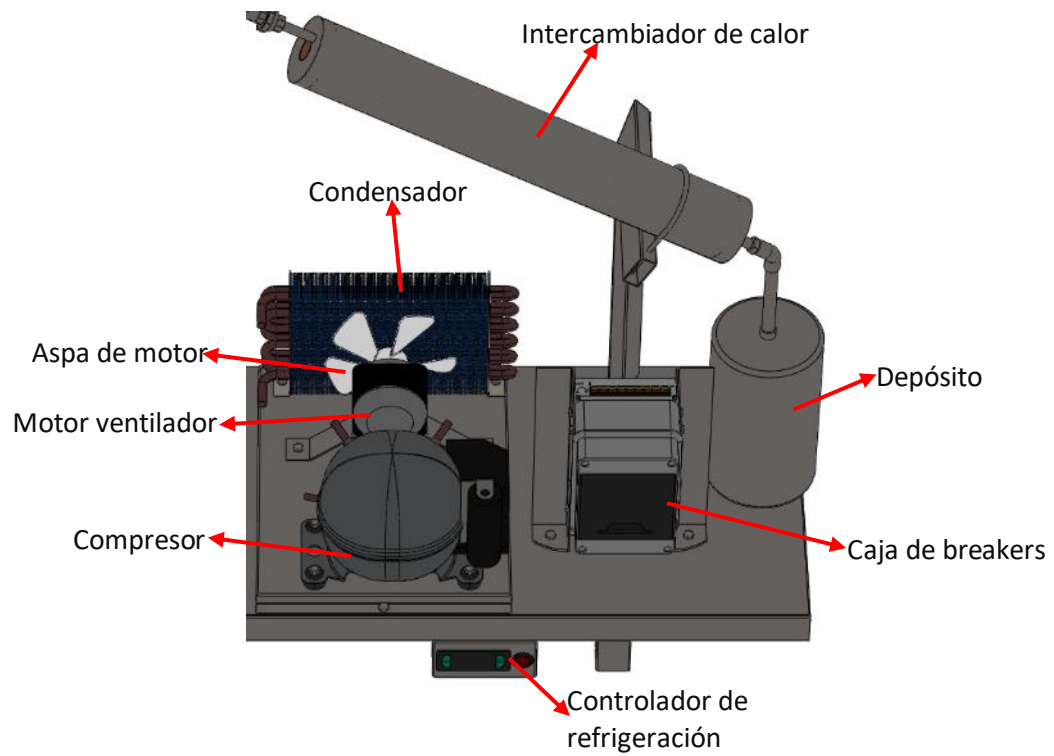
El subsistema de alivio como se describe en la figura 93 se ensambla con la torre de enfriamiento, neplós corridos de 1/2", tee de 1/2", codo de 90°, bushing de 1/2" a 1/4", transductor de presión y una servoválvula de bronce de 1/2".

Figura 93*CAD del subsistema de alivio***4.9.5. CAD del subsistema de la columna de reflujo**

La columna de reflujo como se describe en la figura 94 tiene una tubería de 1/4", tapón inferior, tapón superior, una tee de 1/4", transductor de presión y una unión universal.

Figura 94*CAD de la columna de reflujo***4.9.6. CAD del subsistema de condensación**

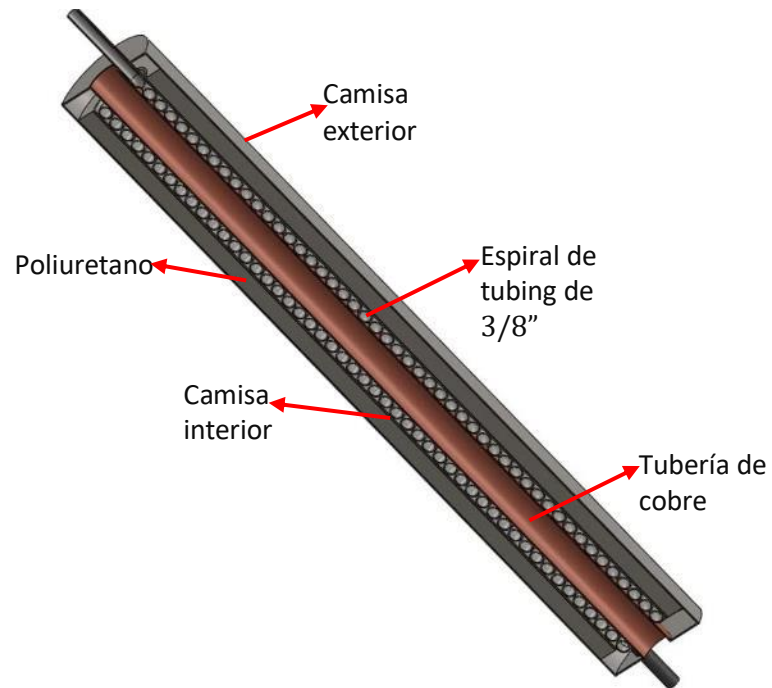
En la figura 95 se describe el subsistema de condensación, que consta del intercambiador de calor, compresor, condensador, motor ventilador, aspa de motor y controlador de refrigeración y depósito. Además, en esta sección se visualiza la caja de breakers que energiza todo el sistema de pirólisis.

Figura 95*CAD del subsistema de condensación*

En la figura 96 se presenta como se encuentra construido internamente el intercambiador de calor, el mismo que consta de una camisa exterior de acero inoxidable, poliuretano, camisa interior, espiral de tubing de 3/8" y una tubería de cobre.

Figura 96

CAD del intercambiador de calor. Vista de corte



En la figura 97 se presenta el ensamble del intercambiador de calor.

Figura 97

CAD del intercambiador de calor. Vista isométrica

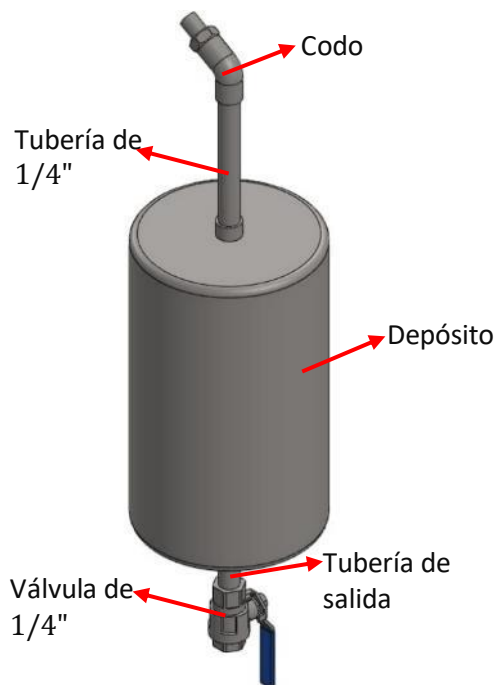


4.9.7. CAD del subsistema del depósito

El subsistema del depósito mostrado en la figura 98, se encuentra formado por codo, tubería de 1/4", depósito, tubería de salida y una válvula de 1/4".

Figura 98

CAD del subsistema del depósito

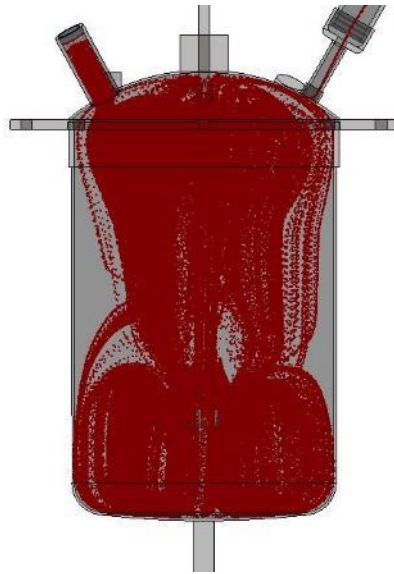


4.10. Simulación del funcionamiento del sistema de reacción

En la figura 99 se visualiza la simulación del posible movimiento de las partículas que se encuentran en el interior del reactor térmico durante el proceso de pirólisis. En esta figura se nota una trayectoria envolvente, las partículas realizan movimientos curvos de abajo hacia arriba por el accionar del agitador en el interior de reactor térmico.

Figura 99

Trayectoria envolvente del vapor de pirólisis



El vapor de pirólisis contenido en el reactor térmico va a desplazarse por la columna de reflujo y sigue su trayecto hacia el serpentín, el movimiento de estas partículas se muestra en la figura 100.

Figura 100

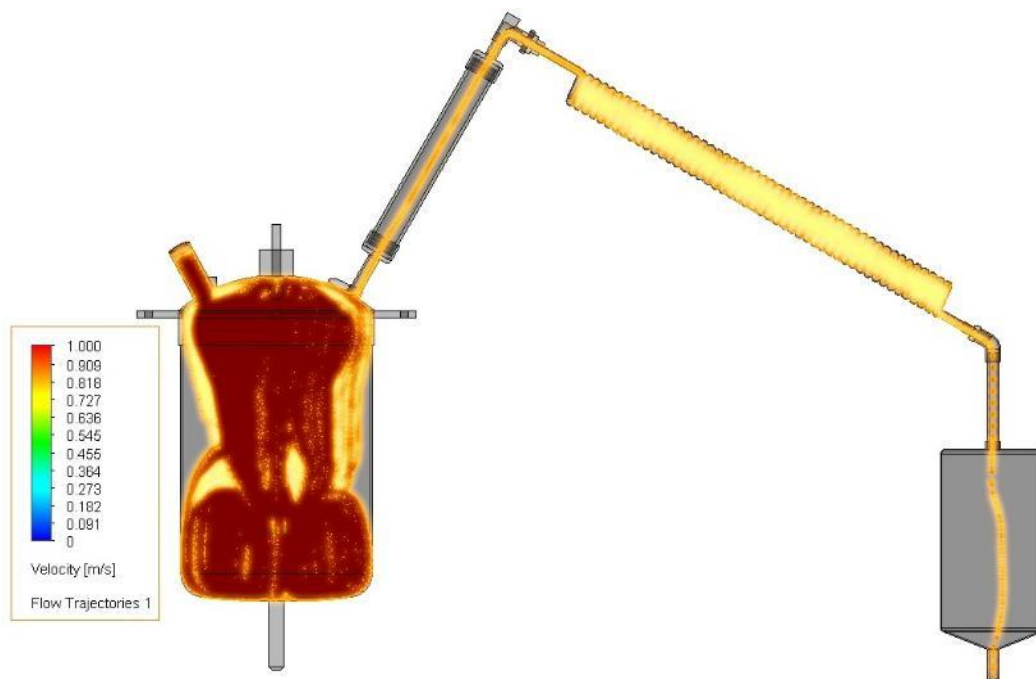
Movimiento del vapor de pirólisis



Según los cálculos generados en el software CAE, el vapor de pirólisis se desplazaría a una velocidad de 1 m/s, como se visualiza en la figura 101.

Figura 101

Simulación del funcionamiento del sistema de reacción



4.11. Simulación de transferencia de calor

En la presente sección se realiza la simulación de transferencia de calor en los subsistemas que se encuentran ensamblados con las resistencias térmicas. Como se menciona en la sección 4.8.5 las resistencias eléctricas son el componente que elevan la temperatura en la tolva de alimentación y en el reactor térmico.

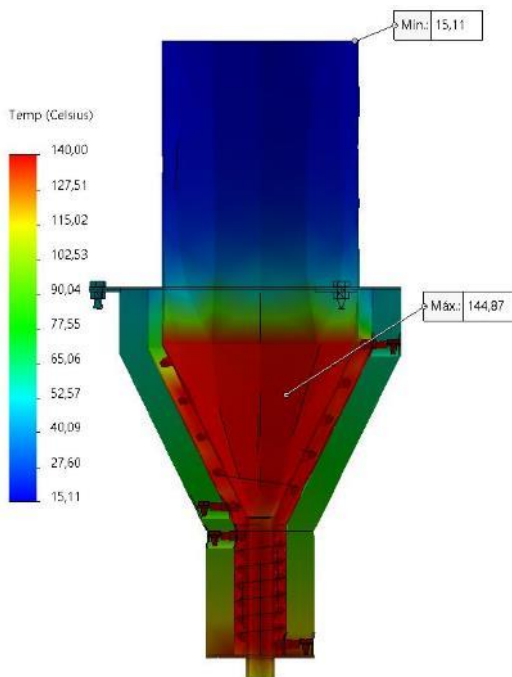
También en esta sección se simula la pérdida de calor en el intercambiador, este fenómeno físico es de suma importancia para que se condense efectivamente el vapor de pirólisis y se obtenga un gran porcentaje de producto.

4.11.1. Simulación de transferencia de calor en la tolva de alimentación

Por medio de la utilización del software CAE se realiza la simulación de la transferencia de calor en la tolva de alimentación, en la parte izquierda se observa el rango de temperatura que se tiene a lo largo del subensamble. Según los valores calculados en el software, como se observa en la figura 102, la temperatura generada por la resistencia recta y cónica es de 140 °C. En la cubierta interior se registra una temperatura máxima de 144.87 °C y la temperatura más baja se establece en 15.11 °C en la parte superior.

Figura 102

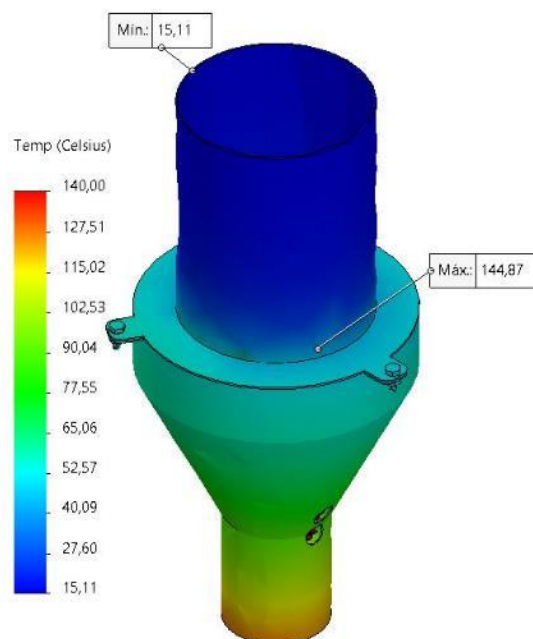
Temperatura en el interior de la tolva



En la figura 103 se presenta una vista isométrica de la tolva de alimentación y se visualiza las temperaturas máximas y mínimas que calcula el software CAE.

Figura 103

Vista isométrica de la temperatura en la tolva de alimentación



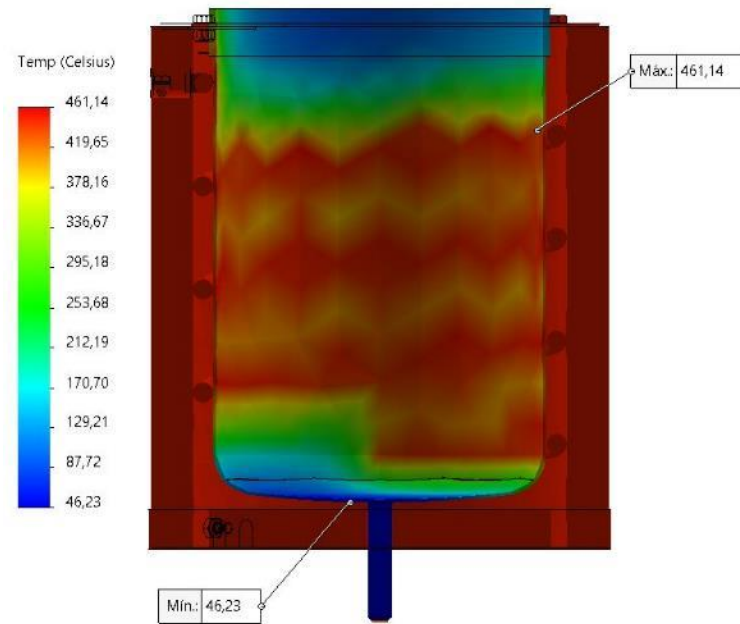
4.11.2. Simulación de transferencia de calor en el reactor térmico

Para realizar la simulación de transferencia de calor en el reactor térmico, la temperatura ingresada en la resistencia térmica es igual a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Según los valores calculados en el software CAE, en la parte izquierda se observa el rango de temperatura que se obtiene a lo largo del subensamble. Como se visualiza en la figura 104 en la cubierta interior se registra una temperatura máxima de $461.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura más baja se establece en $46.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el eje de pesaje.

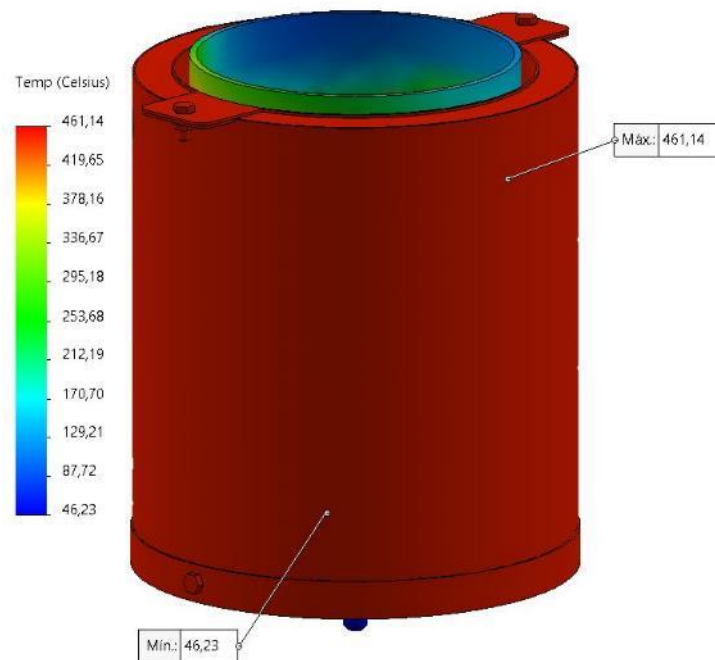
En la figura 105 se muestra una vista isométrica del reactor térmico, en donde se registran las temperaturas máximas y mínimas calculadas por el software CAE.

Figura 104

Temperatura en el reactor térmico

**Figura 105**

Vista isométrica de la temperatura en el reactor térmico

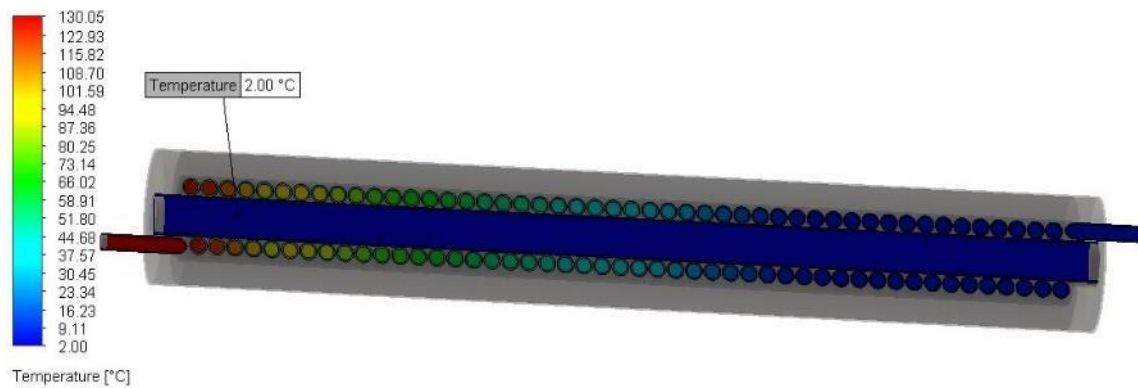


4.11.3. Simulación de la pérdida de calor en el intercambiador

Para la simulación en el intercambiador de calor se realiza un plano de corte del ensamblaje, con ello se puede visualizar la pérdida de calor a lo largo del serpentín. La temperatura inferior corresponde al gas freon 134a utilizado en la refrigeración, este gas se localiza en el interior de la tubería de cobre. En la figura 106 se observa que la tubería de cobre está de color azul que corresponde a la temperatura de 2 °C.

Figura 106

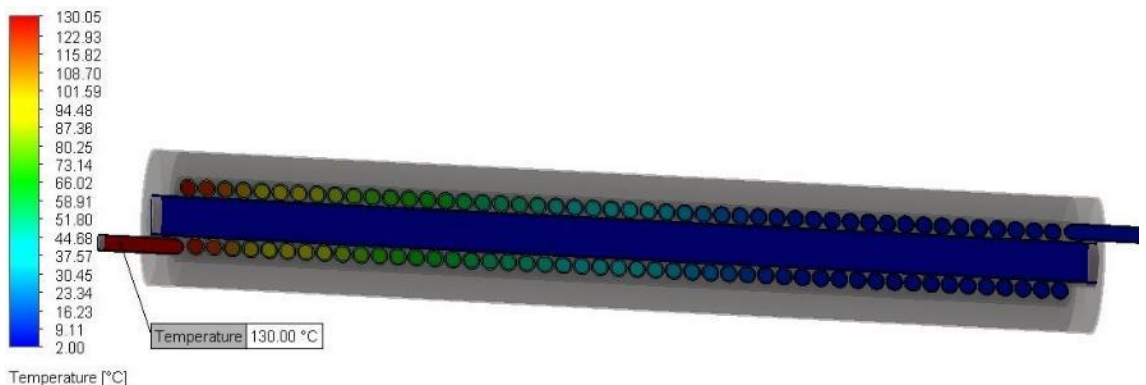
Temperatura del gas freon 134a



En el inicio del serpentín se visualiza el color rojo que corresponde a la temperatura a la que se asume ingrese el vapor de pirólisis, esta temperatura se establece en 130 °C y se observa en la figura 107.

Figura 107

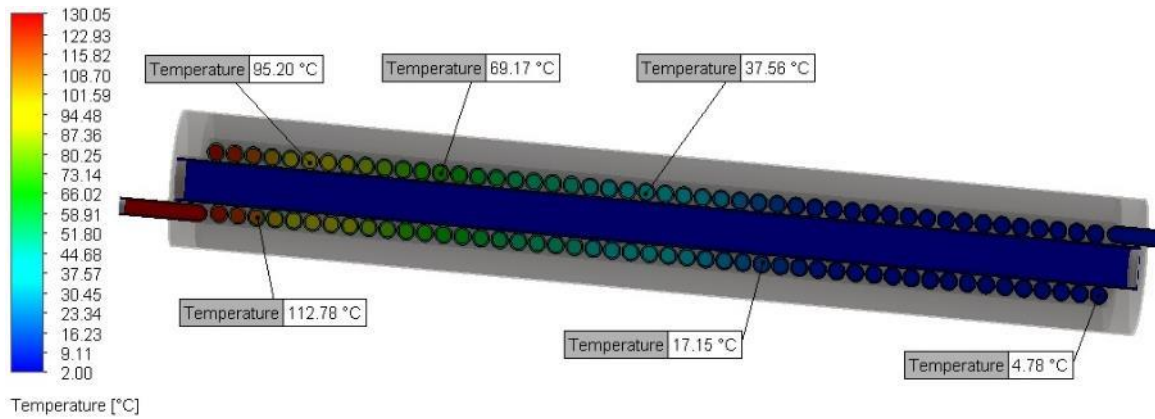
Temperatura del vapor de pirólisis



Como el serpentín se encuentra en contacto directo con la tubería de cobre se genera pérdida de calor y en la figura 108 se observa la escala de las diferentes temperaturas calculadas por el software CAE, a lo largo de todo el conjunto.

Figura 108

Temperaturas en el intercambiador de calor



Capítulo V

5. Construcción del sistema de reacción por pirólisis

En este capítulo se presenta el diagrama de flujo para la construcción mecánica, en el cual se detallan los diferentes procesos de manufactura que se emplean para la construcción del sistema de reacción por pirólisis. Se describe el ensamblaje de los subsistemas que conforman el equipo. Se presenta el diagrama de flujo del montaje y desmontaje del reactor térmico. Se exponen las pruebas de funcionamiento que se realizaron, con el fin de demostrar la funcionalidad de la máquina. Finalmente se presenta el análisis de costos para la construcción del sistema de reacción por pirólisis.

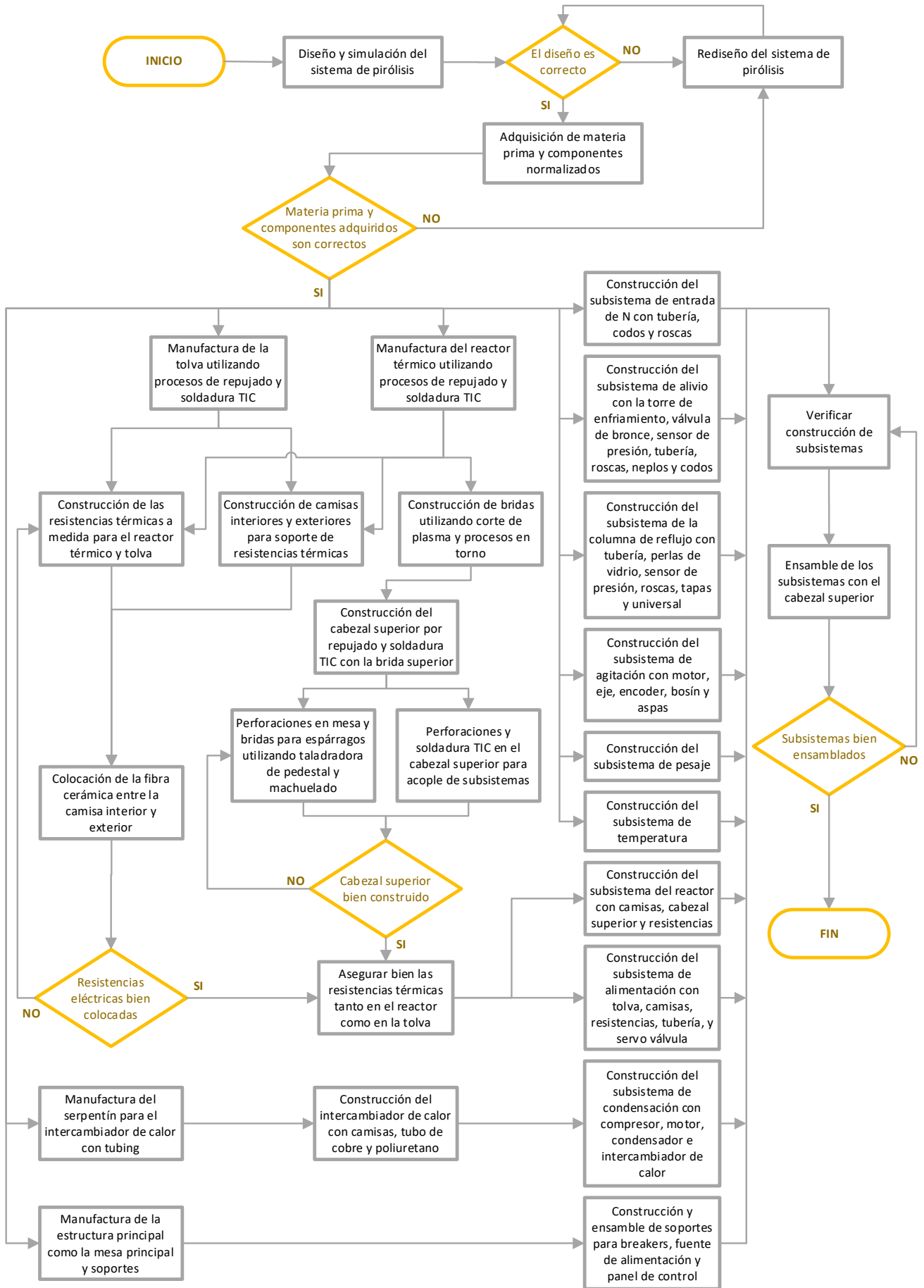
5.1. Construcción mecánica

Para exponer la información de forma precisa y compacta se realiza un diagrama de flujo, en el mismo se puntualizan los pasos a realizar para la construcción mecánica, en donde se puede fabricar los subsistemas en forma paralela para optimizar tiempo. En la figura 109 se visualiza la construcción final del sistema de reacción.

Figura 109

Construcción del sistema de reacción





5.2. Ensamblaje de los subsistemas

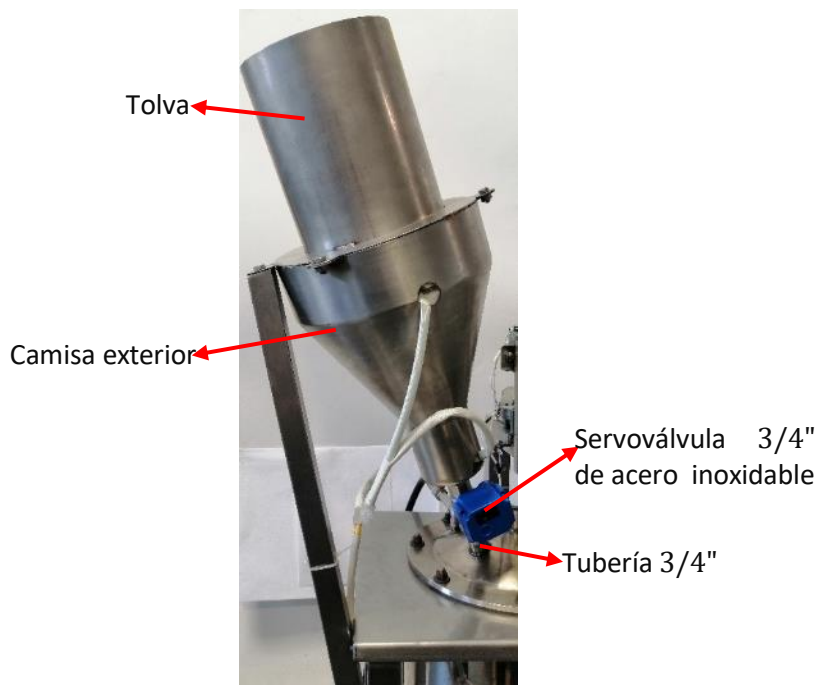
En esta sección se presenta el ensamble de todos los componentes que conforman cada subsistema.

5.2.1. Subsistema de alimentación

Como se observa en la figura 110 el subsistema de alimentación se conforma de la tolva, camisa exterior, servoválvula de acero inoxidable de 3/4" y la tubería de 3/4" que ingresa al reactor térmico.

Figura 110

Subsistema de alimentación

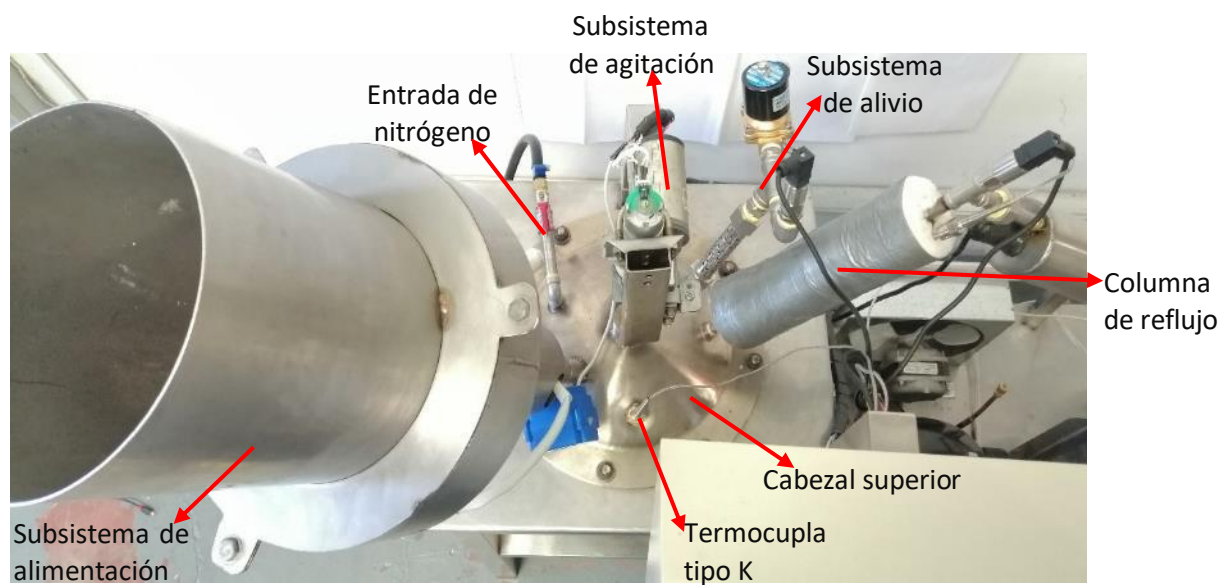


5.2.2. Subsistema del reactor térmico

El cabezal superior del reactor térmico se encuentra localizado fijamente en la parte superior de la mesa, en la figura 111 se detallan todos los subsistemas y componentes que se ensamblan en el cabezal.

Figura 111

Cabezal superior del reactor térmico



En la figura 112 se presenta al reactor térmico acoplado a la mesa.

Figura 112

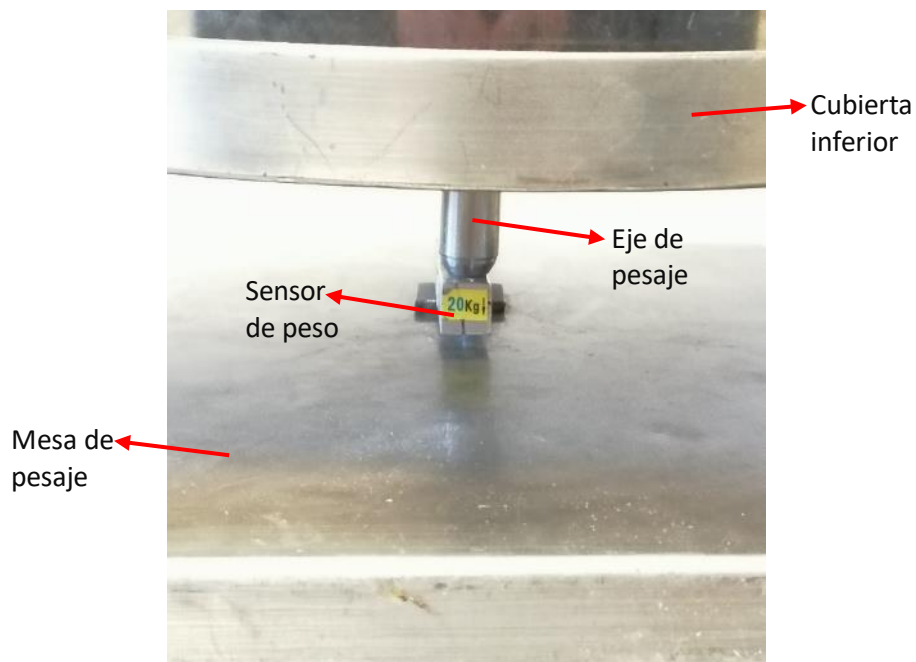
Reactor térmico



Mesa de pesaje. En la figura 113 se visualiza la cubierta inferior del reactor térmico, el eje de pesaje y el sensor de peso, todos estos elementos se ensamblan sobre la mesa de pesaje.

Figura 113

Mesa de pesaje



Entrada de nitrógeno. Para el ingreso del nitrógeno en el sistema de pirólisis, se ensambla una tubería de 1/4" de acero inoxidable en el cabezal superior como se observa en la figura 114.

Figura 114

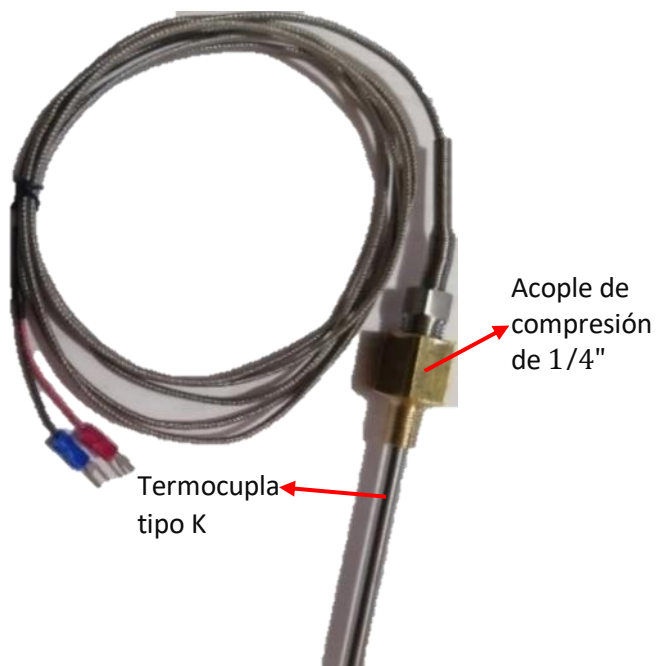
Entrada de nitrógeno



Termocupla tipo K. La termocupla tipo K que se ensambla en el cabezal superior se observa en la figura 115.

Figura 115

Termocupla tipo K

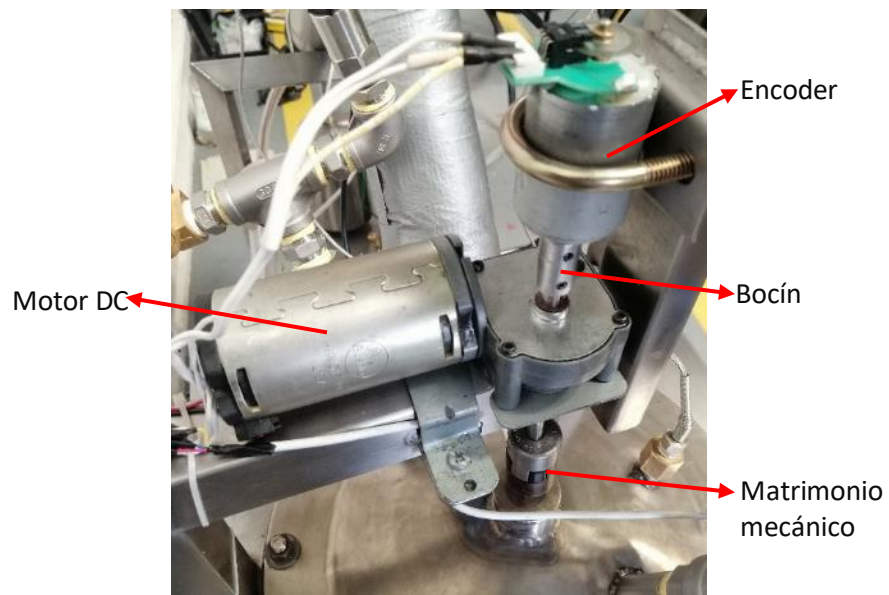


5.2.3. Subsistema de agitación

En la figura 116 se visualiza la parte superior del subsistema de agitación que consta del encoder, bocín, motor DC y el matrimonio mecánico.

Figura 116

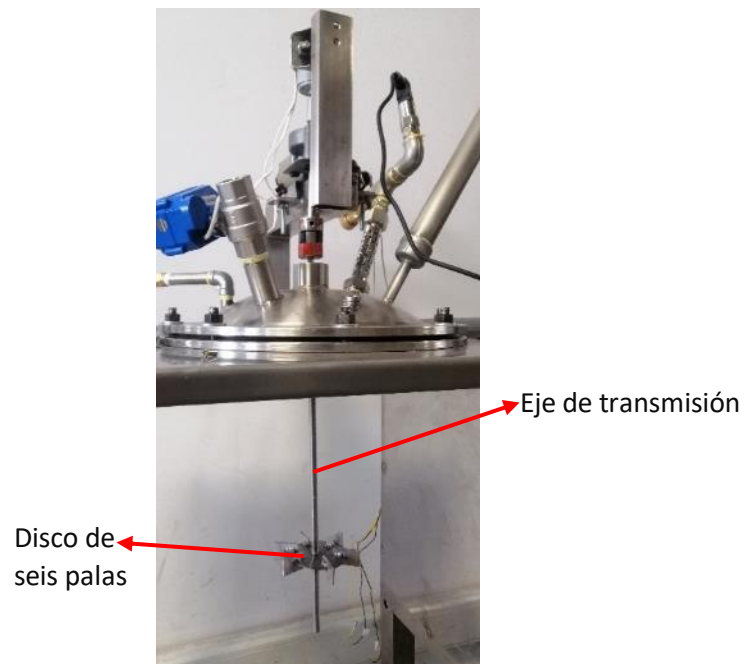
Parte superior del subsistema de agitación



En la figura 117 se visualiza la parte inferior del subsistema de agitación que consta del eje de transmisión y el disco de seis palas.

Figura 117

Parte inferior del subsistema de agitación

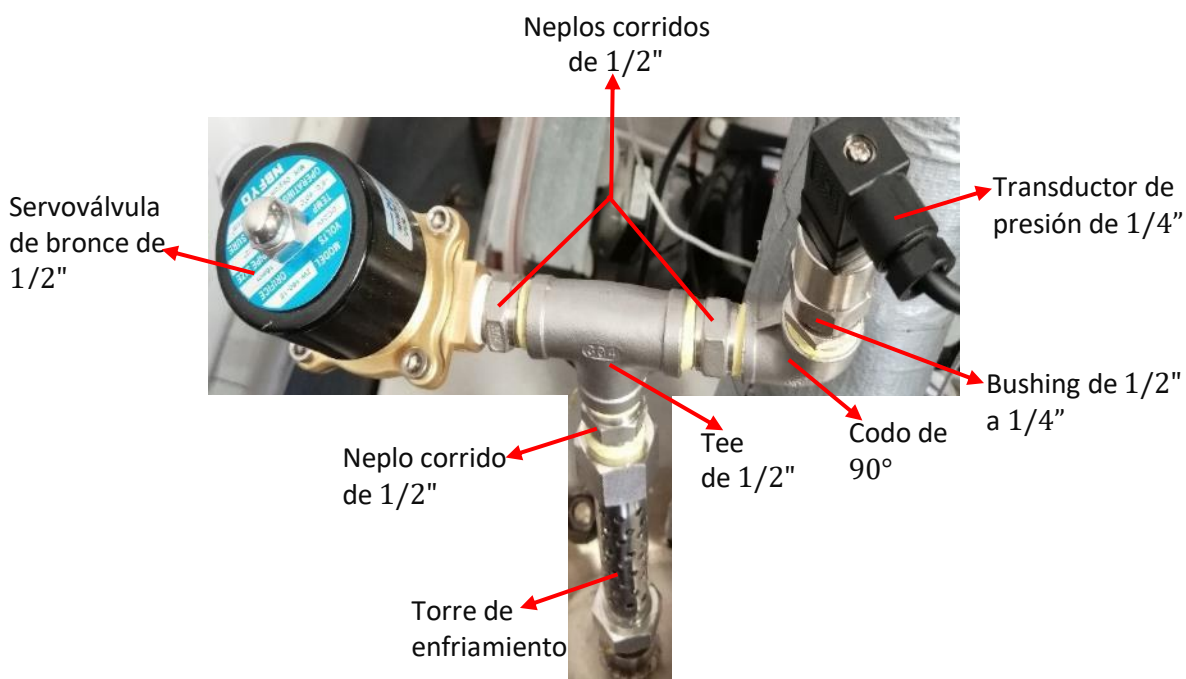


5.2.4. Subsistema de alivio

El subsistema de alivio como se describe en la figura 118 se ensambla con la torre de enfriamiento, neplos corridos de 1/2", tee de 1/2", codo de 90°, bushing de 1/2" a 1/4", transductor de presión y una servoválvula de bronce de 1/2".

Figura 118

Subsistema de alivio



5.2.5. Subsistema de la columna de reflujo

La columna de reflujo como se describe en la figura 119 tiene una tubería de 1/4", tapón inferior, tapón superior, una tee de 1/4" y una unión universal.

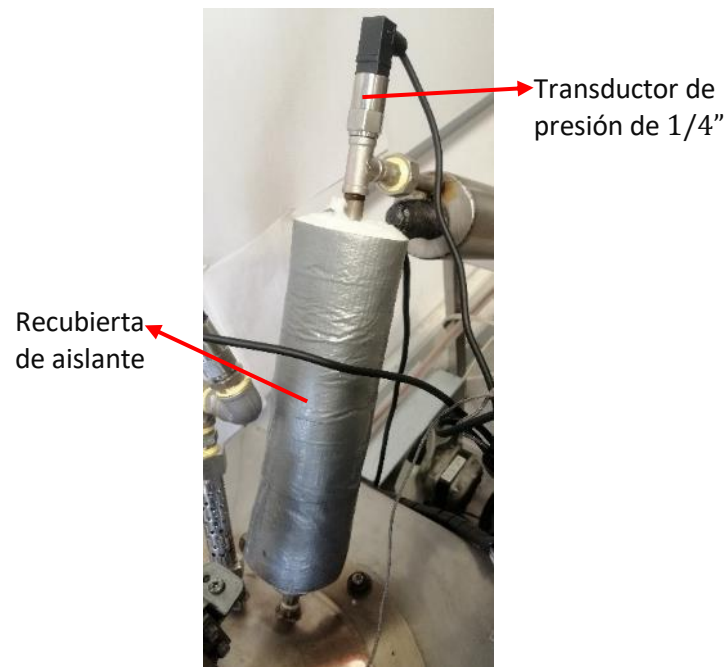
En la figura 120 se presenta la columna de reflujo recubierta con material aislante (fibra de cerámica), esto se realiza para evitar la pérdida de calor en esta zona y permitir que el vapor de pirólisis se traslade a altas temperaturas hacia el sistema de condensación.

Figura 119

Subsistema de la columna de reflujo

**Figura 120**

Columna de reflujo con aislante



5.2.6. Subsistema de condensación

En la figura 121 se describe el subsistema de condensación, que consta del intercambiador de calor, compresor, condensador, motor ventilador, aspa de motor y controlador de refrigeración y depósito. Además, en esta sección se visualiza la caja de breakers que energiza todo el sistema de pirólisis. En la figura 122 se presenta el ensamble del intercambiador de calor.

Figura 121

Subsistema de condensación

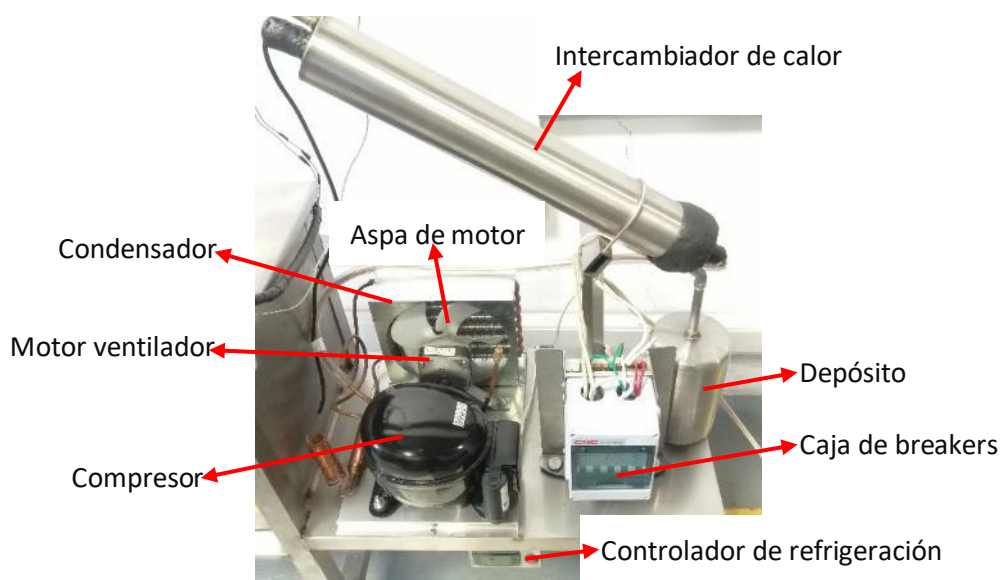


Figura 122

Intercambiador de calor

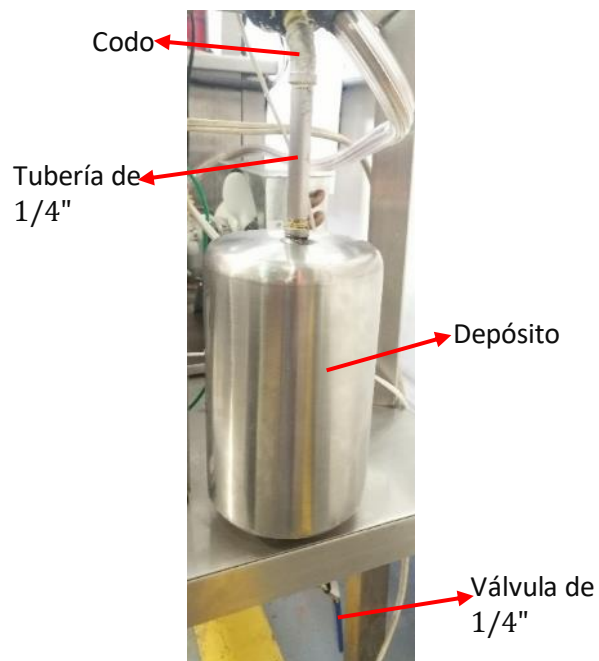


5.2.7. Subsistema del depósito

El subsistema del depósito mostrado en la figura 123, se encuentra formado por codo, tubería de 1/4", depósito, tubería de salida y una válvula de 1/4".

Figura 123

Subsistema del depósito



En la figura 124 se presenta el sistema de reacción por pirólisis.

Figura 124

Sistema de reacción por pirólisis



5.3. Montaje y desmontaje del reactor térmico

Se presentan los diagramas de flujo del montaje y desmontaje respectivamente, en donde se describe el procedimiento para acoplar y desacoplar el reactor térmico.

Diagrama de flujo del montaje

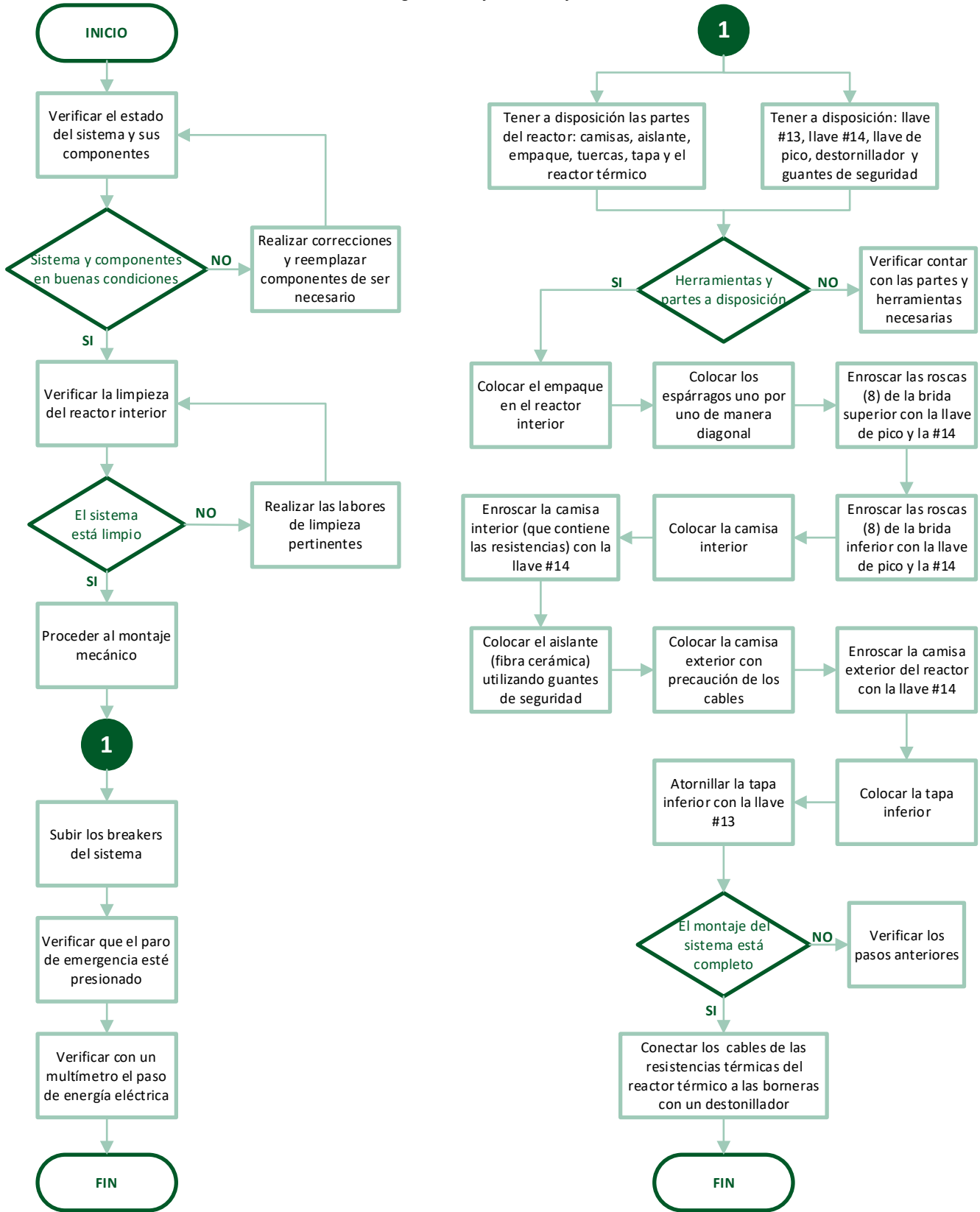
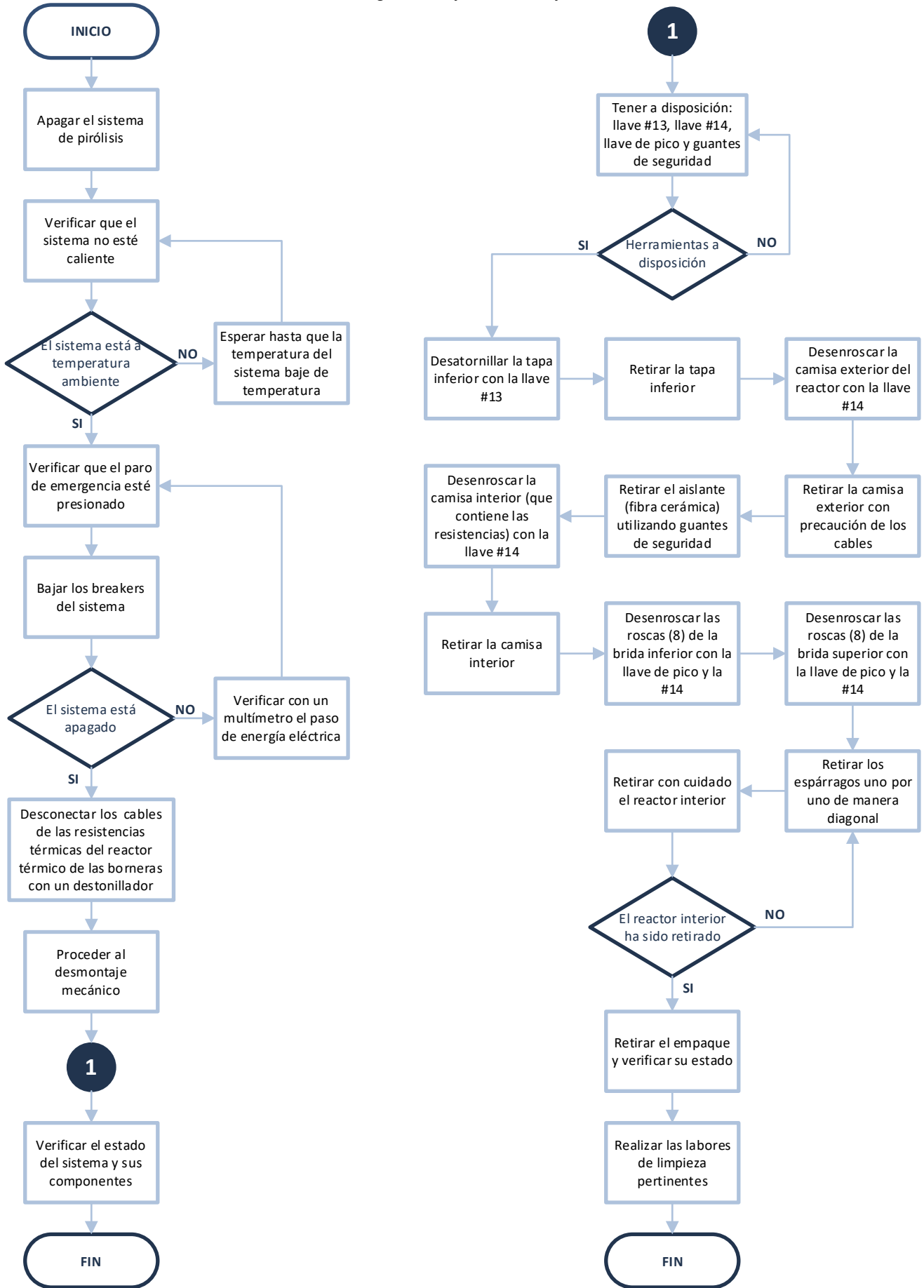


Diagrama de flujo del desmontaje






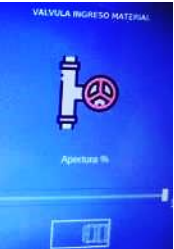







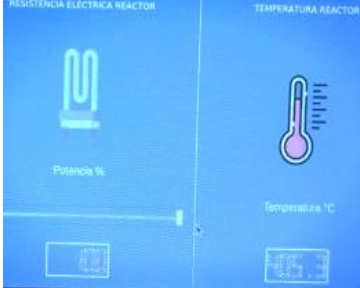
5.4. Pruebas de funcionamiento del sistema de reacción por pirólisis


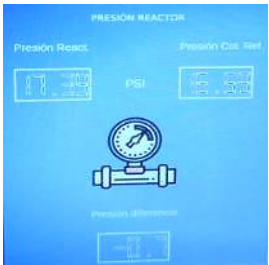






En la tabla 24 se presentan las pruebas de funcionamiento realizadas en cada subsistema que conforman el sistema de reacción por pirólisis; en el anexo 26 se presentan los de videos de respaldo en donde constan las pruebas de funcionamiento.

Tabla 24

Pruebas de funcionamiento de los subsistemas

Subsistemas	Descripción	Funcionamiento	
Subsistema de alivio	<p>El subsistema de alivio permite la apertura de la válvula de bronce, en el momento que el sistema de reacción presente alguna elevación anormal en la presión durante el proceso de pirólisis.</p> <p>Entonces se realiza una prueba de funcionamiento que consiste en la apertura y cierre de la válvula de bronce. La iluminaria verde se enciende cuando la válvula de bronce se encuentra abierta y cuando esta iluminaria se encuentra apagada es porque la válvula ya está cerrada.</p>	Válvula de bronce abierta	Válvula de bronce cerrada
			
Subsistema de alimentación	<p>En el subsistema de alimentación la prueba de funcionamiento consiste en la apertura y cierre de la servoválvula de 3/4" de acero inoxidable.</p> <p>Para la primera prueba de funcionamiento, en un comienzo la servoválvula se encuentra completamente cerrada y se coloca agua en el interior de la tolva de alimentación. Posteriormente se abre la servoválvula y el agua empieza a caer a través de la tubería, para llegar al interior de reactor térmico.</p> <p>Cuando se realizan las pruebas para la obtención de combustible, en la tolva de alimentación se ingresa la materia prima que es el polipropileno.</p> <p>En el anexo 26 se presentan los de videos donde se verifica que la servoválvula funciona correctamente.</p>	Servoválvula cerrada y tolva llena de agua	Servoválvula abierta y el agua desciende por la tubería
			
		Reactor térmico lleno de agua	Abertura de la servoválvula
			

Subsistemas	Descripción	Funcionamiento	
Subsistema de agitación	<p>Para el subsistema de agitación, la prueba de funcionamiento consiste en encender al motor y que el agitador mecánico gire en intervalos controlados de tiempo. Como se observa en esta prueba de funcionamiento, se activa al motor en un 70% del pwm que corresponde a una velocidad de 32 rpm.</p>	Motor girando a 32 rpm	Visualización en el panel
			
Subsistema del reactor térmico	<p>En el subsistema del reactor térmico, la principal prueba de funcionamiento se realiza con el fin de verificar si existen fugas en el reactor. Esto se comprueba en el momento de la inyección del nitrógeno, ya que este gas debe trasladarse a través de todo el sistema y salir por la válvula que se encuentra al final del depósito, cuando esto sucede se puede visualizar el burbujeo en el recipiente lleno de agua.</p>	Reactor térmico acoplado	Burbujeo del N a la salida
			
Termocuplas tipo K	<p>La prueba de funcionamiento para las termocuplas consiste en obtener datos de temperatura; para ello se procede a encender las resistencias térmicas y subir su potencia para calentar el interior del reactor térmico y la tolva de alimentación. Como se visualiza en un comienzo se registra una temperatura de 20.75 °C y al transcurrir 2 horas se registra una temperatura de 405.3 °C; con ello se comprueba que las termocuplas tipo K se encuentran funcionando correctamente.</p>	Temperatura inicial	Temperatura final
			

Subsistemas	Descripción	Funcionamiento	
Transductores de presión	<p>La prueba de funcionamiento para los transductores de presión consiste en leer datos de presión; para ello se calienta el interior del reactor térmico. En un inicio se registra una presión de 14.96 <i>psi</i> en el reactor y una presión de 14.88 <i>psi</i> en la columna de reflujo; al transcurrir 1 hora se registra una presión de 17.39 <i>psi</i> en el reactor y una presión de 16.69 <i>psi</i> en la columna de reflujo; se comprueba que los transductores de presión funcionan correctamente.</p>	<p>Presión inicial</p> 	<p>Presión final</p> 
Sensor de peso	<p>Para la prueba de funcionamiento del sensor de peso, se procede a ingresar la materia prima que es el polipropileno; se coloca la materia prima en la tolva y se abre la servoválvula. Entonces el sensor comienza a leer la cantidad de polipropileno en el interior del reactor térmico. Como se puede observar el sensor ha detectado 384.4 <i>gramos</i> de materia prima en el interior del reactor térmico.</p>		<p>PESO MATERIAL</p> 
Subsistema de condensación	<p>En el subsistema de condensación se ingresa un set point de 5 °C, entonces todo el subsistema va a disminuir la temperatura inicial y tiende a cumplir el valor del set point ingresado. Como se observa se registra una temperatura inicial de 18.3 °C y al transcurrir 2 horas la temperatura baja a 9 °C.</p>		
Subsistema del depósito	<p>La principal función del subsistema del depósito es la recolección del producto que se obtiene al finalizar el proceso de pirólisis. Como se visualiza se logra obtener 850 <i>ml</i> de combustible en el recipiente de vidrio.</p>		

5.5. Análisis de costos

En la tabla 25 se visualizan los componentes utilizados para la construcción mecánica del sistema de reacción por pirólisis.

Tabla 25

Análisis de costos

Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Construcción de la tolva	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Resistencias de la tolva	1	\$ 160,00	\$ 160,00
Termocupla de 1/4" NPT	1	\$ 20,00	\$ 40,00
Servo válvula de 3/4" NPT	1	\$ 44,00	\$ 44,00
Motor DC de 24 V a 47 rpm	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Bocín para acoplar eje y encoder	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Perlas de vidrio de 3.5 – 4.5 mm	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Transductor de presión de 1/4" NPT	1	\$ 34,00	\$ 68,00
Bushing de 1/2" a 1/4" NPT	1	\$ 4,00	\$ 4,00
Torre de enfriamiento de 1/2" NPT	1	\$ 98,00	\$ 98,00
Válvula de bronce de 1/2" NPT	1	\$ 61,00	\$ 61,00
Acople de bronce para termocupla	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Sensor de peso de 20 Kg	1	\$ 13,00	\$ 13,00
Manguera, neplo y abrazadera	1	\$ 7,00	\$ 7,00
Unión y válvula de 1/4" NPT	1	\$ 3,00	\$ 3,00
Fibra cerámica (aislante)	1	\$ 27,00	\$ 27,00
Resistencias del reactor interior	1	\$ 160,00	\$ 160,00
Empaque de asbesto de 2 mm	2	\$ 40,00	\$ 40,00
Empaques de bronce	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Construcción del sistema de refrigeración	1	\$ 240,00	\$ 240,00
Construcción del intercambiador de calor	1	\$ 220,00	\$ 220,00
Tubo de polietileno (aislante)	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Tubo de cobre de 1 in	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Soporte para el cajetín de control	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Soporte para la fuente y breakers	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Soporte para el encoder	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Bridas (acero inoxidable 8 mm de espesor)	2	\$ 210,00	\$ 420,00
Materiales extras ^a	1	\$ 45,00	\$ 45,00
Construcción del sistema ^b	1	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
TOTAL			\$ 2.950,00

Nota. Esta tabla muestra el análisis de costos del presente proyecto. ^a Juntas, neplos, tee, codos, universal, válvula, etc. ^b Estructura, camisas, mesas, depósito, tubería, etc.

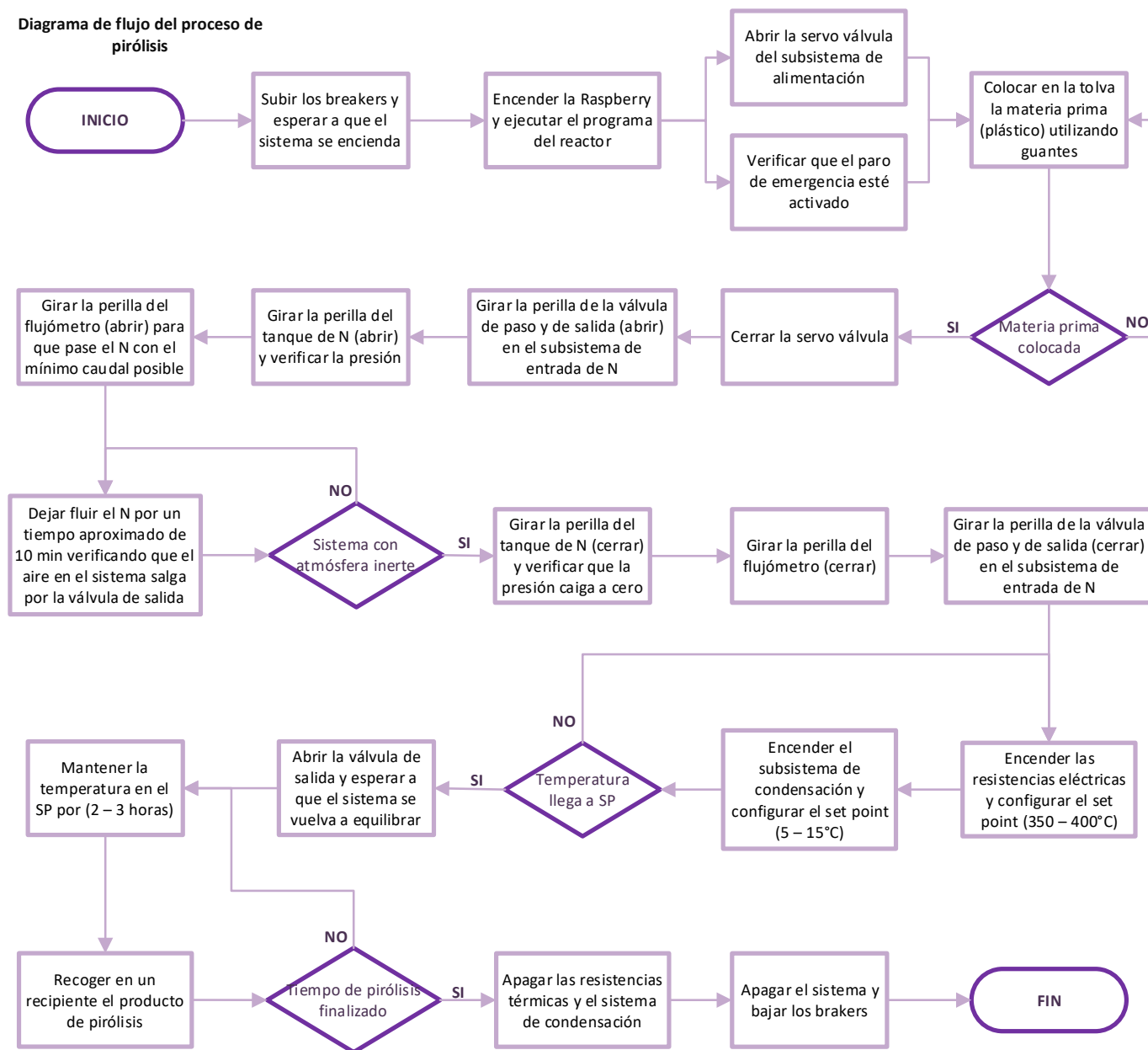
Capítulo VI

6. Análisis de resultados

6.1. Pruebas de obtención de combustible a partir de polímeros

En el siguiente diagrama de flujo se describe el proceso a seguir para la obtención de combustible, utilizando polímeros urbanos de reciclo.



Diagrama de flujo del proceso de pirólisis





En la tabla 26 se presentan las cuatro pruebas de funcionamiento realizadas.

Tabla 26

Pruebas de funcionamiento para obtener combustible

Prueba de funcionamiento	Objetivo	Problema mecánico detectado	Solución realizada en el sistema	Evidencia fotográfica
Primera prueba (en vacío)	<p>Verificar fugas en el reactor térmico. Comprobar que los sensores detecten los parámetros físicos y que los actuadores funcionen correctamente.</p>	<p>No se observa el burbujeo del nitrógeno a la salida, entonces existen fugas en el reactor térmico. Se procede con la prueba para llegar a la temperatura de operación y verificar que los sensores y actuadores funcionen correctamente.</p>	<p>Para solucionar la fuga del nitrógeno en el reactor térmico; se coloca una pasta sellante que resiste altas temperaturas, en el borde del reactor. Como resultado se obtiene poco burbujeo a la salida del depósito.</p>	
Segunda	<p>Ingresar 1 Kg de polipropileno. Verificar que no existan fugas en el reactor térmico. Conseguir lectura de sensores y accionar los actuadores. Obtener producto al finalizar la pirólisis.</p>	<p>Se ingresa 1 Kg de materia prima y no se detectan fugas en el reactor. Después de 2 horas, entre la mesa y el reactor se detecta fugas del vapor de pirólisis. Se continúa con el proceso para verificar el funcionamiento de sensores y actuadores. Se obtiene poco producto a la salida del depósito.</p>	<p>Para lograr un buen proceso de pirólisis y obtener gran cantidad de combustible, se debe descartar cualquier fuga en el sistema. Por lo que se elimina la medición del peso para que el reactor térmico sea hermético, con ello se evita las fugas del nitrógeno y el vapor de pirólisis.</p>	

Prueba de funcionamiento	Objetivo	Problema mecánico detectado	Solución realizada en el sistema	Evidencia fotográfica
Tercera	<p>Ingresar 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Inyectar nitrógeno y verificar que no existan fugas en el reactor térmico.</p> <p>Conseguir lectura de sensores y accionar los actuadores.</p> <p>Realizar el proceso completo de pirólisis.</p> <p>Obtener mayor cantidad de producto.</p>	<p>Se ingresa 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Al inyectar nitrógeno se nota el burbujeo inmediatamente en la salida del depósito. No se detectan fugas entre la mesa y el reactor. Después de 3 horas se detecta fugas en el eje del agitador.</p> <p>Se continua con el proceso para verificar el funcionamiento de los sensores y actuadores.</p> <p>Se realiza el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y se obtiene cerca de 100 g de producto a la salida del depósito, lo que representa un rendimiento del 10%.</p>	<p>Nuevamente se concluye que para lograr un buen proceso de pirólisis y obtener gran cantidad y calidad de combustible, se debe eliminar cualquier fuga en el sistema.</p> <p>Entonces se cierra la salida del eje de agitación, al soldar una placa de acero inoxidable en el interior del casco superior. Con esto el reactor térmico es completamente hermético, pero ya no dispone de agitación mecánica en el reactor.</p>	
Cuarta	<p>Ingresar 1 Kg de polipropileno.</p> <p>Poner en marcha el sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclo.</p>	<p>En esta prueba de funcionamiento no se detectan problemas mecánicos durante todo el proceso de pirólisis.</p> <p>Se realiza el proceso de pirólisis con una tasa de calentamiento de $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.</p>	<p>Con el sistema de reacción completamente funcional, se ejecuta todo el proceso de pirólisis.</p> <p>Al finalizar esta prueba de funcionamiento se obtiene 850 g de producto a la salida del depósito, lo que representa un rendimiento del 57%.</p>	

6.1.1. Análisis de la cuarta prueba de funcionamiento

Una vez corregidos los problemas mecánicos descritos en la tabla 20, se ejecuta la cuarta prueba de funcionamiento. El objetivo es realizar el proceso de pirólisis para la obtención de combustible, a partir de polipropileno (tamaño de muestra entre 4 – 6 mm). En esta prueba de funcionamiento, se introduce 1.5 Kg de materia en la tolva de alimentación y se abre la servoválvula como se visualiza en la figura 125.

Figura 125

Ingreso del polipropileno en la tolva de alimentación



Se verifica si existen fugas en el reactor térmico. Esto se comprueba al inyectar el nitrógeno; se abre la válvula del tanque con un flujo de 5 l/min durante 5 min. En los primeros segundos de inyección, se verifica si existe fugas en la unión del reactor térmico con la mesa. Cuando no existe escape el nitrógeno desplaza el aire de todo el sistema y enseguida se observa el burbujeo en el recipiente con agua que se encuentra al final del depósito; entonces se concluye que el nitrógeno está depurando el oxígeno presente en el interior del sistema de reacción. Como se visualiza en la figura 126.

Figura 126

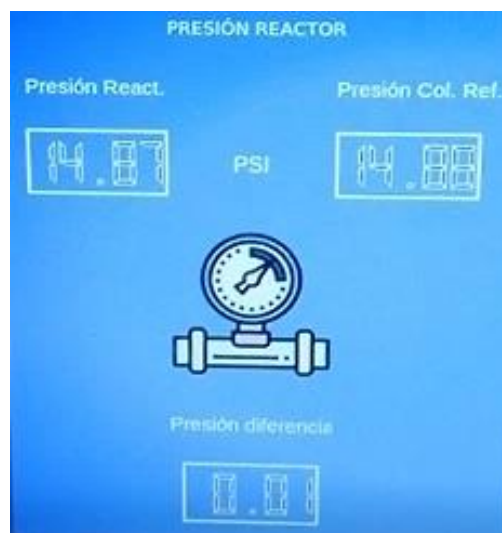
Inyección del nitrógeno en el sistema de reacción



Cuando se inyecta el nitrógeno los transductores empiezan a registrar datos de la presión, como se observa en la figura 127 existe una presión de 14.87 *psi* en el reactor térmico y 14.88 *psi* en la columna de reflujo. A lo largo del proceso de pirólisis, se registra un aumento proporcional de esta variable, entonces se comprueba el funcionamiento de los transductores.

Figura 127

Lectura de la presión inicial en el sistema



Cuando finalizan los 5 *min* de la inyección de nitrógeno, se cierra la válvula de salida. Y se enciende la resistencia térmica del reactor con un 20% de la potencia, el proceso de pirólisis inicia con una temperatura de 20.75 °C como se observa en la figura 128.

Figura 128

Temperatura inicial en el proceso de pirólisis



Simultáneamente se enciende el subsistema de condensación y registra una temperatura inicial de 19.5 °C. Como se detalla en la figura 129.

Figura 129

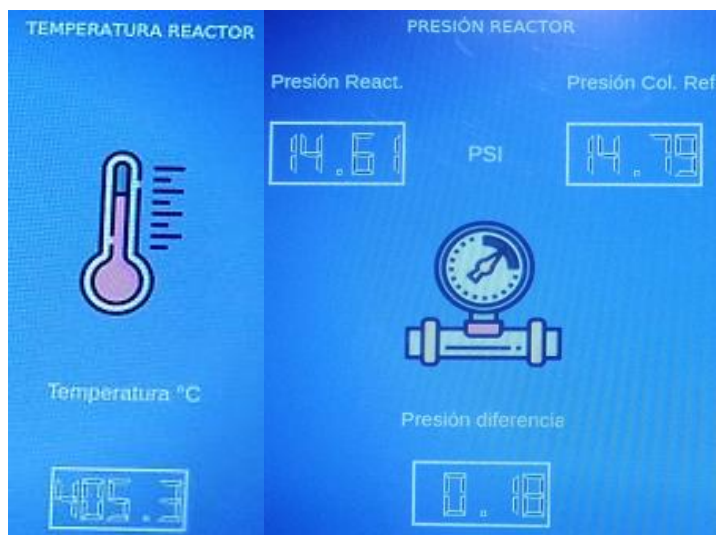
Temperatura inicial en el subsistema de condensación



Cuando transcurren 2 horas, se registra una temperatura de $405.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una presión de 14.61 psi en el reactor térmico, mientras que en la columna de reflujo es 14.79 psi como se presenta en la figura 130.

Figura 130

Temperatura y presión después de 2 horas

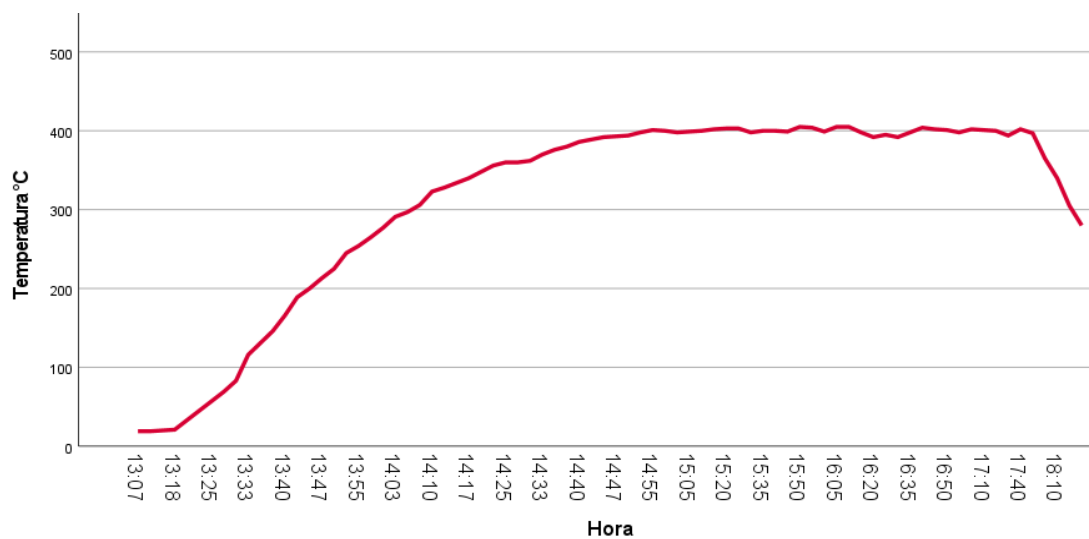


Durante las 4 horas que dura el proceso de pirólisis, las termocuplas tipo K y los transductores de presión adquieren señales y monitorean constantemente las variables de temperatura y presión en el sistema de reacción. Entonces se puede concluir que estos sensores funcionan correctamente.

En la figura 131 se presenta las temperaturas registradas del reactor térmico durante el proceso de pirólisis.

Figura 131

Temperaturas del reactor térmico



En la figura 132 se visualiza la temperatura que tiene el sistema de condensación cuando empieza a salir el producto condensado.

Figura 132

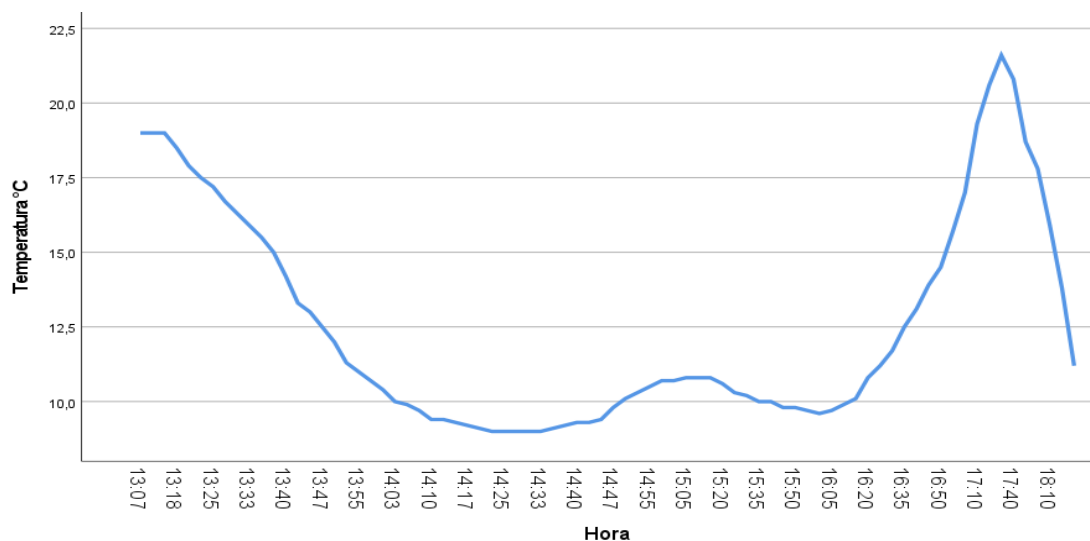
Temperatura final en el sistema de condensación



En la figura 133 se presenta las temperaturas registradas en el sistema de condensación durante el proceso de pirólisis.

Figura 133

Temperaturas del sistema de condensación



Cuando se abre la válvula de salida, el producto que resulta de la pirólisis desciende al recipiente de vidrio, como se observa en la figura 134. Al obtener 850 *ml* de producto se puede concluir que el sistema de condensación cumple con su función porque durante todo el proceso extrae el calor del vapor de pirólisis, logrando condensar y transformarlo en líquido al final del intercambiador. Entonces se verifica que el valor calculado de la pérdida de calor en el intercambiador ($q = -0.5720 \frac{btu}{h}$) cumple con un buen proceso de enfriamiento en el subsistema de condensación.

Figura 134

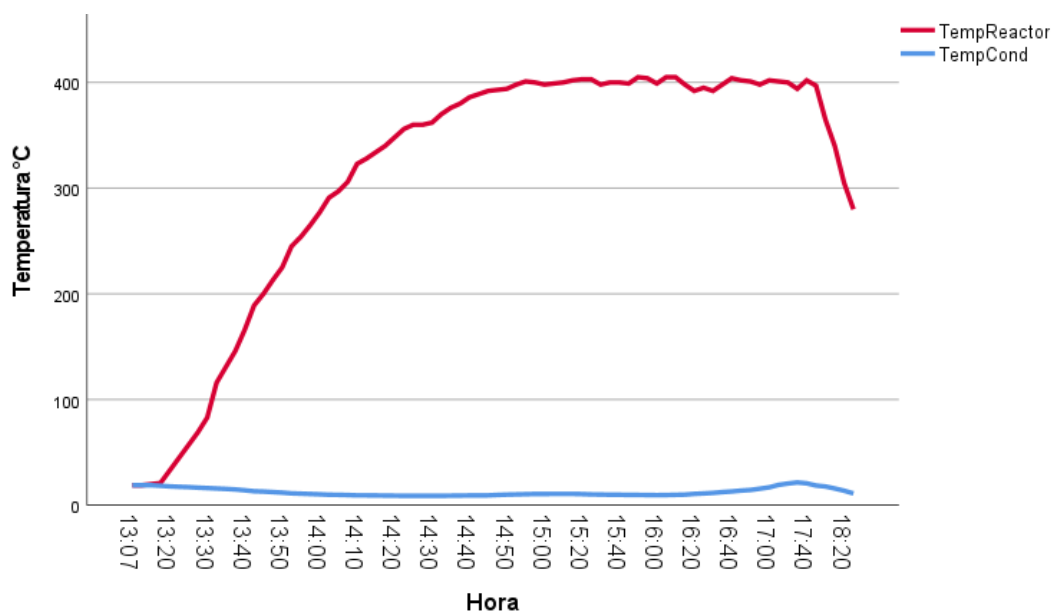
Producto condensado



En la figura 135 se presentan las temperaturas que se registraron en el reactor térmico y en el sistema de condensación a lo largo del proceso de pirólisis.

Figura 135

Temperaturas registradas del proceso de pirólisis



En la figura 136 se observan los productos obtenidos en la tercera y cuarta prueba de funcionamiento.

Figura 136

Productos obtenidos



En la figura 137 se presentan las muestras recolectadas durante el proceso de pirólisis.

Figura 137

Muestras recolectadas



1. Polipropileno
2. Polipropileno fundido
3. Tercer prueba
4. Cuarta prueba
5. Muestra de análisis

En la figura 138 se muestra el residuo que permanece en el interior de reactor térmico y se extrae cuando el sistema de reacción se enfría.

Figura 138

Residuo sólido al final del proceso de pirólisis



6.2. Análisis cualitativos y cuantitativos del producto obtenido

Al producto de la cuarta prueba se realizó un estudio llamado cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GCMS), que consiste en una técnica analítica especializada en la separación, identificación y cuantificación de moléculas en porcentajes relativos de masa de sustancias volátiles y semivolátiles de acuerdo con una base de datos en un laboratorio especializado. En el anexo 25 se presenta el reporte de resultados avalados por el laboratorio y en la tabla 27 se extrae los resultados de la cromatografía GCMS.

Tabla 27

Resultados de la cromatografía GCMS

TR (min)	Molécula Identificada	Porcentaje relativo (%)
5.614	Butil-Ciclopentano	4.035
5.722	7, 8 dioxi biciclo [4.2.2] decano	3.999
6.779	Alil-meta-alil eter	3.391

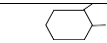
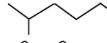
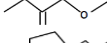
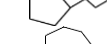
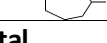



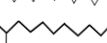
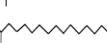
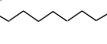



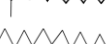
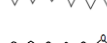
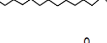
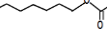
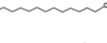
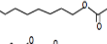
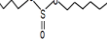




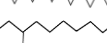

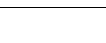
TR (min)	Molécula Identificada	Porcentaje relativo (%)
6.878	2, 4, 6 trimetil-decano	3.998
7.842	2-metil, 2-undecanotiol	3.224
7.930	Ácido oxálico, alil nonil ester	3.839
8.822	1-trideceno	2.861
8.903	Tridecano	3.641
9.735	1, 2 dimetil-ciclohexano	3.176
9.809	Ácido oxálico, octil propil ester	4.512
10.591	Ácido oxálico, alil tridecil ester	2.851
10.659	2-metil decano	4.596
11.400	Ceteno	2.657
11.463	Hexadecano	4.729
12.166	Ácido oxálico, alil dodecil ester	2.337
12.224	2, 6 dimetil-heptano	4.652
12.893	Ácido oxálico, alil dodecil ester	1.958
12.948	Octadecano	4.496
13.586	5-octadeceno	1.683
13.635	2-metil octadecano	4.338
14.246	Ácido oxálico, alil tridecil ester	1.436
14.292	2-metil, heptadecano	3.736
14.878	1-docoseno	0.988
14.920	Heneicosano	3.480
15.483	Metil-cicloheptano	0.719
15.521	2-metil, octadecano	3.046
16.028	3-metil 5-fenil oxazolidin 2-uno	1.259
16.061	2-n-butylacroleína	0.719
16.098	2-metil, heptadecano	2.750
16.650	2-metil, octadecano	2.564
17.182	3-metil eicosano	2.154
17.694	2-metil pentadecano	1.693
18.188	Ácido sulfuroso, butil-dodecil ester	1.364
18.665	2-metil tricosano	1.101
19.126	2, 6, 10, 14-tetrametil hexadecano	0.873
19.572	Eicosano	0.656
20.004	Tetratetracontano	0.489

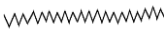
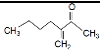


El cromatograma enviado por el laboratorio se puede visualizar en la figura 139, en el que se detalla el tiempo en el que cada compuesto se separa de la muestra principal, la cromatografía selecciona por puntos de ebullición el componente mientras que la columna cromatográfica retiene los compuestos y los separa uno a uno enviándola al espectrómetro de masa donde las moléculas son bombardeadas por iones másicos y fragmentada, entonces se analiza cada

Como se muestra en la tabla 28, con los resultados de la cromatografía se procedió a agrupar de acuerdo con el número de carbonos de la siguiente manera: gasolina pesada $C_8 - C_9$ (contiene algunos isómeros cíclicos); diésel $C_{11} - C_{24}$ (contiene hidrocarburos cíclicos y lineales, algunos esterés y sulfuros); gasóleo pesado C_{44} (contiene alcanos pesados de cadena recta); otros productos $C_7 - C_{10}$ (contiene moléculas presumiblemente de contaminación del polipropileno).

Tabla 28

Agrupación de las moléculas según el número de carbonos

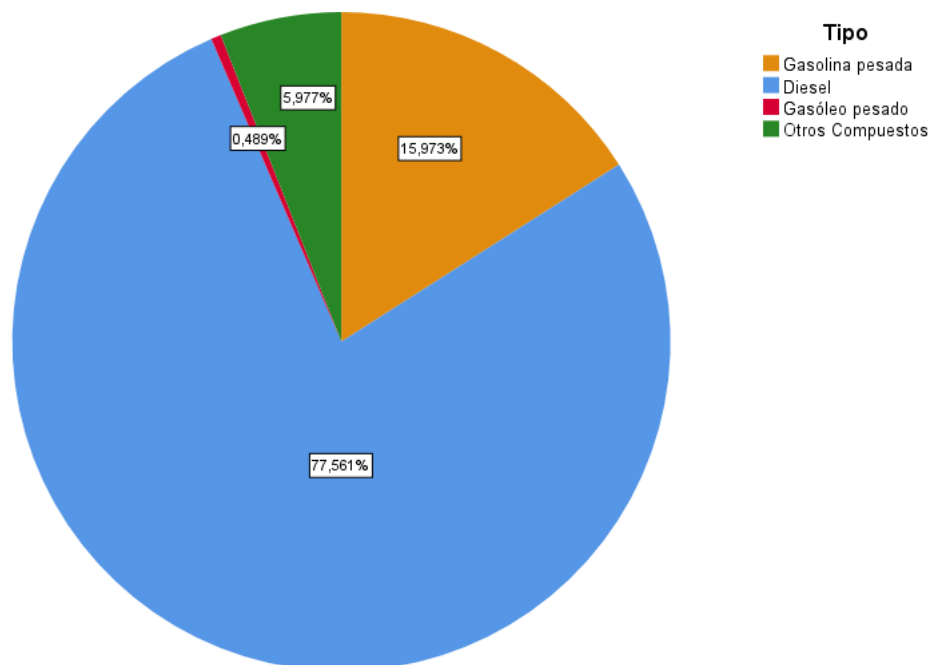
Tipo	Molécula	Fórmula	Estructura	Porcentaje
Gasolina pesada $C_8 - C_9$	1, 2 dimetil-ciclohexano	C_8H_{16}		3.176 %
	2, 6 dimetil-heptano	C_9H_{20}		4.652 %
	Alil-meta-alil eter	$C_7H_{12}O$		3.391 %
	Butil-ciclopentano	C_9H_{18}		4.035 %
	Metil-cicloheptano	C_8H_{16}		0.719 %
	Subtotal			15.973 %
Diesel $C_{11} - C_{24}$	1-docoseno	$C_{22}H_{44}$		0.988 %
	1-trideceno	$C_{13}H_{26}$		2.861 %
	2-metil, decano	$C_{11}H_{24}$		4.596 %
	2-metil, octadecano	$C_{19}H_{40}$		9.948 %
	2-metil, pentadecano	$C_{16}H_{34}$		1.693 %
	2-metil, tricosano	$C_{24}H_{50}$		1.101 %
	2-metil, 2-undecanotiol	$C_{12}H_{26}S$		3.224 %
	2-metil, heptadecano	$C_{18}H_{38}$		6.486 %
	2, 4, 6 trimetil-decano	$C_{13}H_{28}$		3.998 %
	2, 6, 10, 14-tetrametil hexadecano	$C_{20}H_{42}$		0.873 %
	3-metil eicosano	$C_{21}H_{44}$		2.154 %
	5-octadeceno	$C_{18}H_{38}$		1.683 %
	Ácido oxálico, alil dodecil ester	$C_{17}H_{30}O_4$		4.295 %
	Ácido oxálico, alil nonil ester	$C_{14}H_{24}O_4$		3.839 %
	Ácido oxálico, alil tridecil ester	$C_{18}H_{32}O_4$		4.287 %
	Ácido oxálico, octil propil ester	$C_{12}H_{24}O_4$		4.512 %
	Ácido sulfuroso, butil-dodecil ester	$C_{16}H_{34}O_3S$		1.364 %
	Ceteno	$C_{16}H_{32}$		2.657 %
	Eicosano	$C_{20}H_{42}$		0.656 %
	Heneicosano	$C_{21}H_{44}$		3.480 %
	Hexadecano	$C_{16}H_{34}$		4.729 %
	Octadecano	$C_{18}H_{38}$		4.496 %
Tridecano	$C_{13}H_{28}$		3.641 %	
	Subtotal			77.561 %

Tipo	Molécula	Fórmula	Estructura	Porcentaje
Gasóleo pesado C_{44}	Tetratetracontano	$C_{44}H_{90}$		0.489 %
	Subtotal			0.489 %
Otros Compuestos $C_7 - C_{10}$	2-n-butylacroleína	$C_7H_{12}O$		0.719 %
	3-metil 5-fenil oxazolidin 2-u	$C_{10}H_{11}NO_2$		1.259 %
	7, 8 dioxi biciclo [4.2.2] decano	$C_8H_{14}O_2$		3.999 %
Subtotal			5.977 %	
TOTAL				100 %

En resumen, la figura 140 presenta el porcentaje de cada uno de los compuestos que forman parte del producto de pirólisis.

Figura 140

Análisis de compuestos de pirólisis



El análisis muestra un 15.97% de gasolina pesada constituyente principalmente de isómeros cíclicos; 0.49% de gasóleo pesado contenido por una molécula lineal muy grande de carbonos e hidrógenos que le da viscosidad al producto; 5.98% de otros compuestos contenidos por moléculas cíclicas complejas oxigenadas y nitrogenadas que se pueden considerar como

contaminación; finalmente un 77.56 % de diésel que contiene un pequeño porcentaje de hidrocarburos cíclicos de cadena corta y una gran cantidad de hidrocarburos lineales de cadena larga, un compuesto sulfurado que puede haber aparecido debido a aditivos añadidos en la fabricación del polipropileno utilizado como materia prima y compuestos oxigenados causados por la presencia de oxígeno en el reactor o por humedad en el polipropileno.

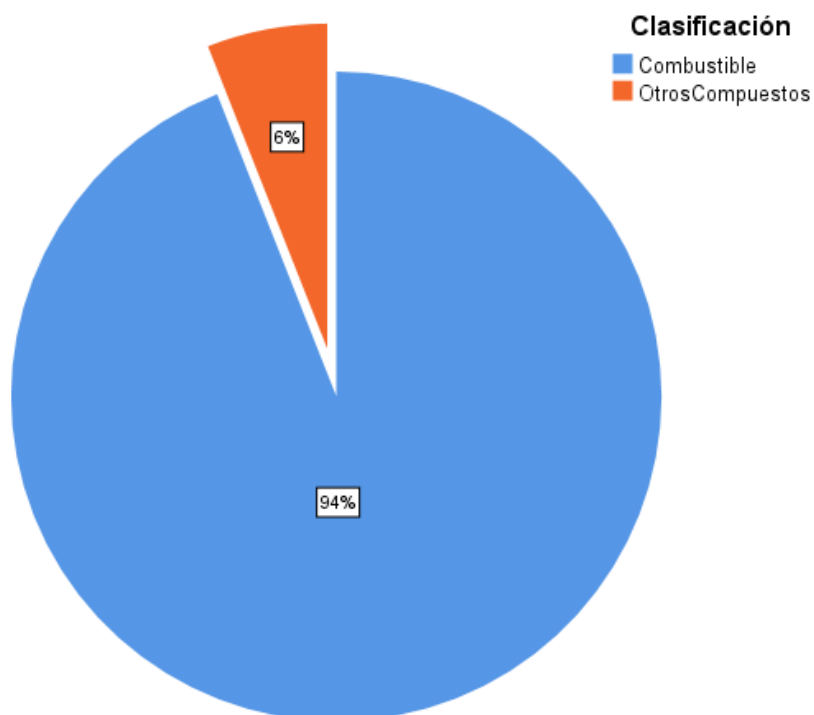
6.3. Validación de la hipótesis

El sistema de reacción por pirólisis fue diseñado en un software CAD, se validó el diseño en un software CAE y se construyó siguiendo los parámetros de diseño. Se realizaron cuatro pruebas, y utilizando una metodología experimental se optimizó la planta, es así que en la última prueba se controló variables como la temperatura, presión, refrigeración y se obtuvo un producto final con un rendimiento del 56 % que finalmente se envió a analizar en un laboratorio especializado para avalar los resultados.

Los resultados obtenidos con la cromatografía GCMS representados tanto en la tabla 27 como en la figura 139 y el detalle del número de carbonos analizados de cada molécula en la tabla 28, demuestra que el producto contiene una gran cantidad de hidrocarburos (cadenas de CH) como oleofinas y parafinas con estructuras orgánicas lineales que conduce a un diésel lineal de alto valor. Así mismo los tipos de moléculas analizados se clasificaron en gasolina pesada, diésel y gasóleo pesado que corresponden a un porcentaje del 94 % de combustibles y el 6 % a otros compuestos como se puede apreciar en la figura 141. Por tanto, se puede verificar que la hipótesis planteada se cumple satisfactoriamente.

Figura 141

Clasificación de porcentaje de combustibles



La fracción de diésel contiene un pequeño porcentaje de ésteres y de ácido sulfuroso, lo cual no supone un problema al análisis, ya que al agregar compuestos oxigenados, sulfurados o nitrogenados se puede llegar a mejorar el cetano del diésel, así como su rendimiento y potencia que mejoraría el proceso de combustión en una determinada máquina térmica en proporciones a validar según la necesidad. En el diésel comercial se agregan aditivos y en compuestos como el biodiesel FAME existen compuestos oxigenados.

Conclusiones

Se fundamentó teóricamente el proceso de pirólisis a través de la metodología establecida por el código ASME sección VIII división 1 que indica las actividades para realizar el diseño y construcción de tanques a presión de manera apropiada partiendo de los criterios de evaluación técnicos que establece parámetros como presión, temperatura y esfuerzos. Se realiza el diseño CAD con una presión de trabajo atmosférica y una temperatura de diseño de 550 °C que da como resultado un espesor de los recipientes a presión de 2 mm y una presión de trabajo máxima del sistema de 0.85 MPa o 124 psi. Se construyen los subsistemas de reacción, alimentación, pesaje, entrada de nitrógeno, agitación, alivio, columna de reflujo, condensación, depósito y finalmente se realizan las pruebas de obtención de combustible.

La pirólisis es un proceso de degradación térmica de una sustancia en una atmósfera inerte que depende de un sinnúmero de parámetros operacionales para que este proceso se ejecute correctamente, entre los más importantes son la temperatura de reacción, la velocidad de calefacción, el tiempo de residencia de los gases en el recipiente de reacción, el tipo, cantidad, tamaño, densidad y humedad de la muestra.

Para el diseño mecánico se establece en primera instancia el tipo de reactor en función de características requeridas como la alimentación, agitación, costo, que sea modular y semicontinuo, disponibilidad de manufactura e inyección de nitrógeno utilizando el método ordinal corregido de criterios ponderados se estableció que es factible el diseño del reactor semibatch. El material seleccionado para la construcción del sistema fue el acero inoxidable austenítico AISI 304 por sus propiedades térmicas y mecánicas ideales para este proceso y se seleccionó componentes estándares que cumplen con los criterios de diseño como temperatura y presión para la construcción del sistema como servoválvulas, transductores de presión, motor

DC, termocuplas, torre de enfriamiento, resistencias eléctricas, perlas de vidrio, material aislante, sensor de peso y componentes del sistema de condensación.

La simulación de transferencia de calor en el reactor térmico registra una temperatura máxima en la cubierta interior de 461.14 °C y la temperatura más baja se establece en 46.23 °C en el eje de pesaje, en la tolva de alimentación la simulación en la cubierta cónica interior registra 144.87 °C y 15.11 °C en la parte superior, en el intercambiador de calor la temperatura de enfriamiento está simulada a 2 °C, ingresa por el serpentín a 130 °C y sale a 4.78 °C, finalmente la simulación de flujo verifica que las partículas en el interior del reactor se desplazan por el sistema y llegan hasta el depósito.

Los resultados de la cromatografía GCMS fueron analizados conforme a los tipos de moléculas de acuerdo con su número de carbonos y se clasificaron en gasolina pesada 15.97 %, diésel 77.56 % y gasóleo pesado 0.49 % que corresponden a un porcentaje del 94 % de combustibles y el 6 % a otros compuestos; en otras palabras, se verifica que el producto contiene una gran cantidad de hidrocarburos como oleofinas y parafinas con estructuras orgánicas lineales que conduce a un diésel lineal de alto valor. Sin embargo, la fracción de diésel contiene porcentaje de esteres y ácido sulfuroso, que se puede interpretar como aditivos que podrían mejorar su potencia y rendimiento del proceso de combustión en una determinada máquina térmica en proporciones a validar según la necesidad.

Recomendaciones

Se puede implementar un reactor catalítico o un segundo sistema de reacción con el fin de optimizar el sistema, además de garantizar que sea hermético es necesario un sistema de agitación para la transferencia de masa y calor a prueba de fugas, además de una válvula en el depósito para que el nitrógeno sea constante en todo el proceso, lo que podría significar un aumento considerable en el rendimiento en la calidad del producto.

Al producto de pirólisis se puede hacer una destilación para separar sus componentes y a las diferentes fracciones obtenidas es importante realizar algunas pruebas de acuerdo con la normativa vigente para determinar la calidad del combustible y estableciendo algunos parámetros químicos como el uso de catalizadores se puede optimizar el rendimiento de la planta obteniendo un producto con mayor rendimiento y calidad.

Al provenir de diferentes fuentes como la mezcla y el reciclaje los resultados del proceso de pirólisis con el polipropileno puede variar en función de muchos parámetros como el tamaño de grano, la densidad y la humedad por lo que esto representa la principal dificultad del uso de este material como materia prima. Es importante utilizar el mismo tipo de polipropileno para realizar pruebas y poder comparar los resultados.

Trabajos futuros

El presente proyecto sirve de base para un amplio campo de estudios que deriva en un sinnúmero de investigaciones y optimizaciones de la planta como la implementación de un reactor catalítico para mejorar la cantidad de cadenas de hidrocarburos ramificados que aumentan significativamente la calidad de la fracción de diésel.

Se puede utilizar puro o realizar mezclas con diésel comercial utilizando la fracción diésel obtenida del proceso de pirólisis como aditivo para determinar la calidad, la potencia y el rendimiento en base a diferentes fracciones realizando pruebas de desempeño de torque, potencia y análisis termodinámico y realizar comparación del consumo de combustible desde el punto de vista volumétrico y específico, además de la estructuración de los subproductos de la combustión y relacionarlos con reductores de SCR.

Bibliografía

- Aguado, J., Serrano, D., Escola, J., & Garagorri, E. (2002). Catalytic conversion of low-density polyethylene using a continuous screw kiln reactor. *Catalysis Today*, 257–262. doi:[https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00077-9)
- Amazon. (2021). *Transductor de presión psi 4-20 mA salida G1/4" transmisor de presión de silicona para aceite, gas o agua (0-1 MPA)*. Recuperado el 27 de marzo de 2021, de https://www.amazon.com/dp/B07HL6NVK6/ref=sspa_dk_detail_6/?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B07HL6NVK6p13NParams&smid=A28ZWXW3ZSVNZU&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFXQlRCSIEyWFRaRjQmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTA5ODI0ODk0SzZYMkxLMkRVRFYmZW5jcnlwdGVkQWRJZD1BMDM4OTUwODNRNkc3S0x
- Amazon. (2021). *Twidec/2M NPT 1/4 "pulgada (6X100MM) rosca tubo sensor temperatura sonda dos hilos controlador de temperatura (0 ~ 1,112.0 °F) 304 acero inoxidable K tipo termopar MT-205-1/4*. Recuperado el 25 de marzo de 2021, de https://www.amazon.com/-/es/temperatura-controlador-112-0-%C2%B0F-inoxidable-termopar/dp/B07QN33FFB/ref=psdc_5006547011_t3_B0748DFJFN?th=1#descriptionAndDetails
- Aparicio, B. (11 de febrero de 2019). *Pirólisis (descomposición térmica de la materia)*. Recuperado el 04 de marzo de 2021, de <https://reca-energy.com/pirolisis-descomposicion-termica-de-la-materia/>
- Aracil, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). *Tesis Doctoral*. Universidad de Alicante.

- Arandes, J., Ereña, J., Bilbao, J., López-Valerio, D., & De la Puente, G. (2003). Valorization of polyolefins dissolved in light cycle oil over HY zeolites under fluid catalytic cracking unit conditions. *Ind. Eng. Chem. Res* 42, 3952-3961. doi:10.1021/ie020986g
- Ausa Special Steel. (2016). *Aceros de alta aleación*. Recuperado el 01 de junio de 2021, de <https://www.ausasteel.com/glossary/aceros-alta-aleacion/#:~:text=Este%20tipo%20de%20aceros%20suele,de%20alta%20resistencia%20y%20tenacidad.>
- Beer, F. P., Johnston, R. E., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2020). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill.
- Blanco Leal, L. A. (2014). Modelado y simulación del proceso de pirólisis rápida de biomasa en un reactor de lecho fluidizado. *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bockhorn, H., Hentschel, J., Hornung, A., & Hornung, U. (1999). Environmental engineering: Stepwise pyrolysis of plastic waste. *Chemical Engineering Science*, 3043-3051. doi:[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00385-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00385-6)
- Buekens, A., & Huang, H. (1998). Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources, Conservation and Recycling* 23, 163-181. doi:10.1016/s0921-3449(98)00025-1
- Chiu, S., & Cheng, W. (1999). Thermal degradation and catalytic cracking of poly(ethylene terephthalate). *Polymer degradation and stability* 63, 407-412. doi:10.1016/S0141-3910(98)00121-9
- Colet, M. (2015). Estudio de las variables de operación del proceso de pirólisis catalítica de polietileno. *Tesis de Maestría*. Universidad de Chile.

- Comité técnico de los gases licuados del petróleo. (2014). *Código del gas licuado de petróleo*. NFPA.
- Conesa Ferrer, J. A. (2010). Reactores de lecho fluidizado. Diseño de reactores heterogéneos. *Tesis de Ingeniería*. Universidad de Alicante.
- Conesa, J. A. (2013). *Mecanismos de transferencia de calor*. Universidad de Alicante.
- Corma, A., Bermúdez, O., Martínez, C., & Ortega, F. (2002). Dilution effect of the feed on yield of olefins during catalytic cracking of vacuum gas oil. *Applied catalysis a: General* 230 (1-2), 111-125. doi:10.1016/s0926-860x(01)01000-6
- Coronel Aguilar, J. C. (2014). Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ciencias ambientales de la universidad internacional SEK. *Tesis de Ingeniería*. Universidad Internacional SEK.
- De Paul, I. (2000). Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; vol. 4*, 27-32.
- Desarrollo, S. N. (2017). Objetivos nacionales de desarrollo. En S. N. Desarrollo, *Plan nacional de desarrollo 2017-2021. Toda una vida* (pág. 80).
- Dismetal. (2020). *Dismetal*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de <https://dismetal.ec/productos/planchas/acero-inoxidable>
- EcuRed Contributors. (29 de agosto de 2019). *Metales no ferrosos*. Recuperado el 03 de septiembre de 2021, de https://www.ecured.cu/Metales_no_ferrosos#:~:text=Son%20todos%20los%20metales%20y,%2C%20Aluminio%2C%20N%C3%ADquel%20y%20Manganeso.

Envaselia. (2018). *Qué es el polipropileno*. Recuperado el 09 de septiembre de 2021, de <https://www.ensavelia.com/blog/que-es-el-polipropileno-id13.htm>

Estévez, R. (28 de agosto de 2019). *Datos sobre la contaminación que causa el plástico*. Recuperado el 18 de abril de 2021, de ambientum.com/ambientum/residuos/contaminacion-plastico.asp

Ferrum Aceros. (2018). *Ferrum*.

Galvis Gutierrez, N. (2014). Caracterización del polipropileno reciclado disponible a partir de tapas, para reincorporarlo en procesos productivos, mezclado con polipropileno virgen. *Tesis de Ingeniería*. Universidad EAFIT.

Gao, F. (2010). Pyrolysis of waste plastics into fuels. *Tesis Doctoral*. Universidad de Canterbury.

Garrido, P. (2013). Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros. *Tesis de Ingeniería*. Universidad de Chile.

Goodfellow. (2021). *Acero Inoxidable. AISI 304*. Recuperado el 13 de mayo de 2021, de Información sobre el material: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>

Guido, K. (02 de abril de 2012). *Clasificación de los polímeros*. Recuperado el 23 de abril de 2021, de <https://adicionalaquimica.wordpress.com/2012/04/02/clasificacion-de-los-polimeros/>

Hernández, M. (2007). Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados. *Tesis Doctoral*. Universidad de Alicante.

- Ibáñez Vega, S. (2020). Sistemas de control "on line" de reactores químicos batch. *Tesis de Ingeniería*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Intelligy. (2021). *Análisis térmico estructural*. Recuperado el 30 de junio de 2021, de <https://intelligy.com/simulation/anlisis-trmico-estructural/>
- Jordán Morales, W. D., & Zurita Garcés, P. O. (2018). Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH. *Tesis de Ingeniería*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Jung, C., & Fontana, A. (2006). *Production of gaseous and liquid fuels by pyrolysis and gasification of plastics: Technological approach*. (J. S. Kaminsky, Ed.) Bélgica: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/0470021543.ch10
- Karaduman, A., Şimşek, E., Çiçek, B., & Bilgesü, A. (2001). Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 60, 179-186. doi:10.1016/S0165-2370(00)00169-8
- Laurens Arredondo, L. A. (2019). Normas Internacionales de diseño de recipientes a presión: Comparación de procedimientos para determinación de espesor mínimo requerido. *Universidad, Ciencia y Tecnología Vol. 23, N° 90, 72-80*.
- Lee, C.-G., Cho, Y.-J., Song, P.-S., Kang, Y., Kim, J.-S., & Choi, M.-J. (2003). Effect of temperature distribution on the catalytic pyrolysis of polysterene waste in a fluidized-bed reactor. *Catalysis Today* 79-80, 453-464. doi:10.1016/S0920-5861(03)00060-9
- León Estrada, J. M. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. Inglesa.
- Lugmania Endara, L. d., & Cisneros Recalde, R. A. (2018). Análisis y simulación mediante CFD (computational fluid dynamics) de ansys del comportamiento térmico del refrigerante

134a en un condensador dentro de un ciclo de refrigeración. *Tesis de Ingeniería*. Universidad Politécnica Salesiana.

Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Johana, E. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>

Mancilla Aguilar, W. A. (2019). Efecto de los briguet de la cascarilla de arroz para el desarrollo de plántulas en vivero. *Tesis de Ingeniería*. Universidad de Guayaquil.

Massa, J., Giró, J., & Giudici, A. (2015). Recipientes a Presión. En *Compendio de Cálculo Estructural II* (págs. 371-387).

Masuda, T., Kuwahara, H., Mukai, S., & Hashimoto, K. (1999). Production of high quality gasoline from waste polyethylene derived heavy oil over Ni-Rey catalyst in steam atmosphere. *Chemical Engineering Science*, 2773-2779. doi:[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00295-4)

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw-Hill.

Megyesy, E. F. (1992). *Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo*. Limusa S.A.

Metalium. (18 de marzo de 2014). *Acero al carbono*. Recuperado el 11 de octubre de 2021, de <https://metalium.mx/acero-al-carbono#:~:text=Es%20un%20tipo%20de%20acero%20que%20contiene%20carbono%2C%20el%20cual,que%20pueda%20obtener%20cualquier%20forma.>

- Miandad, R., Barakat, M., Rehan, M., Aburizaiza, A., Gardy, J., & Nizami, A. (2018). Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil. *Process Safety and Environmental Protection, Volume 116*, 542-552. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.024>
- Mizrahi, R., & Cragolino, G. A. (1994). Selección de materiales de construcción para equipos de una planta experimental de reprocesamiento. *Gerencia Tecnología*. Departamento Ingeniería de Plantas Químicas.
- Norton, R. L. (2011). *Machine design. An integrated approach*. Pearson education.
- Obando, G. A. (2015). Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS). *Tesis de Maestría*. Universidad de Manizales.
- Obeid, F., Zeaiter, J., Al-Muhtaseb, A. H., & Bouhadir, K. (2014). Thermo-Catalytic pyrolysis of waste polyethylene bottles in a packed bed reactor with different bed materials and catalysts. *Energy Conversion and Management* 85, 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.075>
- Onelab. (2021). *Onelab*. Recuperado el 18 de mayo de 2021, de <https://www.onelab.com.ar/perlas-de-vidrio-origen-alemania-x-1kg#:~:text=Las%20perlas%20de%20vidrio%20sirven%20para%20mezclar%20y%20desmenuzar%20en%20molinos.&text=Esferas%20fabricadas%20de%20vidrio%20s%C3%B3dico,2%2C5%20kg%2Fdm3>.
- Ortega, J. (13 de noviembre de 2020). *Tubo capilar*. Recuperado el 05 de noviembre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_capilar

- Panda, A., Singh, R., & Mishra, D. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel, a suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products. *A world prospective. Renewable and sustainable energy reviews* 14, 233-248. doi:10.1016/j.rser.2009.07.005
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica Vol. 30(1)*, 137–144. Recuperado el 05 de diciembre de 2021, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5522/1/Oswaldo-Proa%C3%B1o.pdf>
- Prospector. (2021). *Polyolefin plastic*. Recuperado el 10 de mayo de 2021, de <https://plastics.ulprospector.com/generics/38/polyolefin>
- Quiminet. (14 de mayo de 2010). *Usos y aplicaciones del polietileno tereftalato (PET)*. Recuperado el 29 de agosto de 2021, de <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-polietileno-tereftalato-pet-42703.htm>
- Redes, L. (26 de julio de 2019). *Principales motivos para reciclar plástico*. Recuperado el 27 de febrero de 2021, de <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/por-qu-es-importante-reciclar-el-plastico#:~:text=El%20principal%20motivo%20para%20reciclar,y%201.000%20a%C3%B1os%20en%20degradarse.&text=Adem%C3%A1s%2C%20si%20reciclamos%20el%20pl%C3%A1stico,naturales%20y%20energ%C3%A9>
- Refractory Bricks. (2021). Recuperado el 08 de marzo de 2021, de <https://www.facebook.com/profile.php?id=100063611767174>
- Rivaton, A., Gardette, J.-L., Mailhot, B., & Morlat-Therlas, S. (2005). Basic aspects of polymer degradation. *Macromol. Symp.* 225(1), 129-146. doi:10.1002/masy.200550711

- Rodríguez, M. L., Molina, M. M., Pardo, M. J., Afzal, Z. N., Cauet, S. I., Davies, T. E., . . . Lopez Sanchez, J. A. (2016). Synthesis and kinetic modeling of biomass derived renewable polyesters. *Journal of Polymer Science Part a Polymer Chemistry*, 2876-2887. doi:<https://doi.org/10.1002/pola.28173>
- Rogers, K. (2021). *Polymer*. Recuperado el 05 de noviembre de 2021, de britannica.com/science/polymer
- Romero Vásquez, L. E. (2013). Elaboración de procedimientos para la inspección técnica, mantenimiento y reparación de tanques a presión para almacenamiento de GLP. *Tesis de Ingeniería*. Escuela Politécnica Nacional.
- Romeva, C. R. (2002). El enmarque del diseño. En C. R. Romeva, *Diseño concurrente* (págs. 61-62). Barcelona: Edicions UPC.
- Romeva, C. R. (2002). Métodos de evaluación de soluciones. En C. R. Romeva, *Diseño concurrente* (págs. 59-62). Edicions UPC.
- Salinas, J., & Rony, V. (2010). Diseño y construcción de un sistema de combustión para caracterización térmica de desechos plásticos utilizados como combustible alternativo. *Tesis de Ingeniería*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Schmalz. (2021). *Schmalz*. Recuperado el 01 de octubre de 2021, de <https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/conocimientos-y-conceptos-basicos/unidades-de-medida-de-vacio/>
- Serrano, D., Aguado, J., Escola, J., & Garagorri, E. (2003). Performance of a continuous screw kiln reactor for the thermal and catalytic conversion of polyethylene lubricating oil base mixtures. *Applied Catalysis*, 95-105. doi:[https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00024-9)

Siuce Bonifacio, R. (2019). Diseño de tolvas.

Solomon, E., Berg, L., & Martin, D. (2013). *Biología*. Cengage Learning Editores, S.A.

Sorrentino, A., & Pantani, R. (2013). Determination of the effect of pressure on viscosity of an isotactic polypropylene. *Springer*, 2005-2014.

Tesla material eléctrico industrial. (2021). *Válvula solenoide de bronce 220 vac 1/4 gas, aire, agua*.

Recuperado el 31 de octubre de 2021, de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431281971-valvula-solenoide-de-bronce-220vac-14-gas-aire-agua-_JM#redirectedFromParent

Textos Científicos. (26 de agosto de 2005). *Usos y aplicaciones del polietileno*. Recuperado el 19 de octubre de 2021, de textoscientificos.com/polimeros/polietileno/ usos

Textos, C. (23 de junio de 2013). *Clasificación de los polímeros*. Recuperado el 29 de marzo de 2021, de [https://www.textoscientificos.com/polimeros/clasificacion#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20forma%20de%20la,ramificaciones%20\(peque%C3%B1as%20cadenas%20laterales\)](https://www.textoscientificos.com/polimeros/clasificacion#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20forma%20de%20la,ramificaciones%20(peque%C3%B1as%20cadenas%20laterales).).

The American Society of Mechanical Engineers. (2013). *Código ASME para calderas y recipientes a presión*. ASME.

Torres, M. (2005). Metodología para el ajuste de la red gravimétrica fundamental del Ecuador continental. *Tesis de ingeniería*. Escuela Politécnica del Ejército.

U.S. Solid. (2021). *U.S. Solid motorized ball valve- 3/4" stainless steel electrical ball valve with full port, 9-24 V AC/DC, 3 wire setup*. Recuperado el 22 de septiembre de 2021, de <https://ussolid.com/u-s-solid-motorized-ball-valve-3-4-stainless-steel-electrical-ball-valve-with-full-port-9-24-v-ac-dc-3-wire-setup.html>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. (2019). *Líneas y proyectos de investigación*. Recuperado el 10 de diciembre de 2021, de <https://ugp.espe.edu.ec/lineas-y-proyectos-de-investigacion/>

Valbruna México. (2020). *Aceros Inoxidables Ferríticos*. Recuperado el 04 de marzo de 2021, de <http://valbruna.com.mx/clasificacion-de-los-acero-inoxidables/aceros-inoxidables-ferriticos/#:~:text=Los%20aceros%20inoxidables%20Ferr%C3%ADticos%20son,contiene n%20poco%20nada%20de%20n%C3%ADquel.>

Vasile, C., Pakdel, H., Mihai, B., Onu, P., Darie, H., & Ciocalteu, S. (2000). Thermal and catalytic decomposition of mixed plastics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 287–303. doi:[https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00151-0)

Williams, P., & Williams, E. (1999). Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 51, 107-126. doi:[10.1016/s0165-2370\(99\)00011-x](https://doi.org/10.1016/s0165-2370(99)00011-x)

Yoshio, U., & Toshihiro, S. (1999). H-Gallosilicate-Catalyzed degradation of polyethylene into aromatic hydrocarbons using different types of reactors. *Chemistry Letters*, 1137-1138. doi:<https://doi.org/10.1246/cl.1999.1137>

Anexos