UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

DISEÑO DE UN REACTOR DE PIROLISIS A PARTIR DE NEUMATICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20KG/H EN LA REGION CUSCO

PRESENTADO POR:
Br. LUIS ALDAIR HINOJOSA TTITO

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

ASESOR:
Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: DISEÑO DE UN REACTOR DE PIROLISIS A PARTIR DE NEUMATICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO

Presentado por: LUIS ALDAIR HINOJOSA TITO DNI N° 76163175;
presentado por: ..... DNI N°: .....
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO MECÁNICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 **%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 14 de SETIEMBRE de 2026

Firma

Post firma Edgar alfredo Catacora Acevedo

Nro. de DNI 23983057

ORCID del Asesor 0000-0001-6182-9814

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259 : 624348534

TESIS_FINAL_v7_revisados_final_10.09.2626 - TITULO.docx

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:624348534

Fecha de entrega

14 sep 2026, 11:37 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 sep 2026, 12:12 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_FINAL_v7_revisados_final_10.09.2626 - TITULO.docx

Tamaño del archivo

12.1 MB

244 páginas

37.931 palabras

213.310 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
9 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

SEÑORES DOCENTES MIEMBROS DEL JURADO:

En cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, pongo a vuestra consideración la presente tesis titulada:

"DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS A PARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO"

con el propósito de optar al Título Profesional de Ingeniero Mecánico.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad desarrollar el diseño de un reactor de pirólisis para el aprovechamiento de neumáticos usados granulados, considerando criterios de diseño térmico y mecánico, selección de materiales y equipos, así como la evaluación de su rentabilidad económica.

Por lo expuesto, someto a consideración del honorable jurado el presente trabajo de investigación, esperando que cumpla con los requisitos académicos establecidos por la Universidad.

DEDICATORIA

Dedicado sobre todo a Dios Todopoderoso, por ser mi guía y fortaleza en este camino y permitirme lograr esta meta tan ansiada.

A mi padre, Luis Hinojosa LLamacponcca, por su sacrificio, apoyo incondicional y sobre sobre por enseñarme los valores de respeto, perseverancia y liderazgo.

A mi madre, Sofia Ttito Quispe, por ser mi pilar y motor, mi fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por creer en mí, apoyarme en todo momento y enseñarme a no rendirme nunca y luchar siempre por mis objetivos. Esta tesis es el resultado de tu amor y sacrificio la cual te la dedico con todo mi corazón.

A mis hermanas, Nohely y Luz H. por brindarme valiosos consejos, motivación y compañía en este camino.

A mi sobrino e ahijado, Alexander, por estar cada día en mi vida, sacarme esa sonrisa diaria.

A mis familiares y amigos por brindarme ese cariño, respeto y compañerismo, la cual aprendí algo valioso de cada uno de ustedes.

A mis distinguidos docentes que me inspiraron, guiaron y me brindaron las enseñanzas para mi formación profesional.

Este trabajo de investigación, es el resultado de sus enseñanzas, valores y amor que dieron frutos al hombre y profesional que soy.

LUIS ALDAIR HINOJOSA TTITO

AGRADECIMIENTO

Quiero expresarle mi mas sincero agradecimiento a mi asesor de tesis Dr. Ing. Edgar Catacora Acevedo; por su guía, paciencia, compromiso durante el proceso de elaboración de esta tesis. Su experiencia fue el pilar fundamental para alcanzar este objetivo, asimismo sus observaciones precisas, su disposición para revisar cada avance y confianza en mi trabajo.

Quiero expresar un profundo agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica quienes, con sus conocimientos, experiencia nos proporcionaron las bases para nuestra formación académica.

Quiero expresar mi más sincera gratitud al Ing. Mario G. Castro Irrarazabal y Ing. Paola Ly Triveño Ramos, quienes fueron del Comité de Dictaminantes y replicantes de tesis, quienes nos brindaron los conocimientos suficientes y la orientación durante la realización de este trabajo.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos mis amigos y compañeros de estudio, por su apoyo incondicional, gratos momentos de compañerismo las cuales aprendí algo valioso de cada uno de ellos.

LUIS ALDAIR HINOJOSA TTITO

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN 1
DEDICATORIA 2
AGRADECIMIENTO 3
ÍNDICE GENERAL 4
ÍNDICE DE TABLAS 11
ÍNDICE DE FIGURAS 14
ÍNDICE DE ANEXOS 16
RESUMEN 17
ABSTRACT 18
NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS 19
INTRODUCCIÓN 20
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL 21
1.1. Introducción 21
1.2. Ámbito geográfico 21
1.3. Planteamiento del problema 23
1.4. Formulación del problema 27
1.4.1. Problema general 27
1.4.2. Problemas específicos 27
1.5. Objetivos 28
1.5.1. Objetivo general 28
1.5.2. Objetivos específicos 28
1.6. Justificación 28
1.7. Alcances y limitaciones 30
1.7.1. Alcances 30
1.7.2. Limitaciones 30
1.8. Hipótesis 31
1.8.1. Hipótesis general 31
1.9. Variables 31
1.9.1. Variable Independiente 31
1.9.2. Variable Dependiente 31

1.10. Metodología de la Investigación 32
1.10.1. Enfoque de la investigación 32
1.10.2. Tipo de investigación 32
1.10.3. Nivel 32
1.10.4. Diseño de investigación 32
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 34
2.1. Antecedentes 34
2.1.1. Antecedentes Internacionales 34
2.1.2. Antecedentes Nacionales 35
2.2. Bases teóricas 35
2.2.1. Pirólisis 35
2.2.2. El neumático y su composición 36
2.2.3. Granulometría de los residuos de neumático 37
2.2.4. Productos obtenidos en la pirólisis de neumáticos 38
2.2.5. Variables operativas de la pirólisis 40
2.2.6. Reactor rotativo de pirólisis 42
2.2.7. Conceptos termodinámicos 43
2.2.8. Quemador 45
2.2.9. Tubería de vapor 46
2.2.10. Aislamiento térmico del reactor 47
2.2.11. Intercambiador de calor 47
2.2.12. Separador vertical bifásico 49
2.2.13. Normas para el diseño de recipientes a presión 50
2.2.14. Recipientes a presión 51
2.2.15. Cabezales y tapas 53
2.2.16. Esfuerzos en recipientes cilíndricos a presión 54
2.2.17. Eficiencia de las uniones soldadas 57
2.2.18. Factor de seguridad 57
2.2.19. Diseño de pernos 59
2.2.20. Accionamiento y transmisión 60
2.2.21. Ejes de transmisión 60

2.2.22. Rodamiento 61
CAPÍTULO III: DISEÑO CONCEPTUAL 62
3.1. Estado de la tecnología 62
3.1.1. Estado de la tecnología del reactor 62
3.1.2. Reactor de pirólisis 62
3.1.3. Accionamiento y Transmisión 63
3.1.4. Quemador 63
3.1.5. Condensador 64
3.1.6. Separador de Gas-Líquido y Almacenamiento 65
3.2. Comprensión de la solicitud 66
3.2.1. Lista de exigencias 66
3.3. Estructura de funciones 68
3.3.1. Abstracción: Caja negra 69
3.3.2. Funciones parciales 69
3.3.3. Estructura de funciones 70
3.4. Matriz morfológica de las alternativas de diseño del sistema de pirólisis 72
3.5. Concepto de solución 74
3.5.1. Concepto de solución 1-azul 74
3.5.2. Concepto de solución 2-amarillo 75
3.5.3. Concepto de solución 3-rojo 76
3.5.4. Concepto de solución 4-verde 77
3.6. Valoración técnica y económica de los conceptos de solución 78
CAPÍTULO IV: DISEÑO TÉRMICO DEL REACTOR 83
4.1. Procesos para calculo térmico del reactor 83
4.1.1. Parámetros de diseño 83
4.2. Diseño térmico del reactor de pirólisis 87
4.2.1. Balance energético 87
4.2.2. Parámetros de calculo 88
4.2.3. Energía absorbida 88
4.2.4. Aislante del reactor 89
4.2.5. Energía perdida 90

4.2.6. Pérdidas de calor por conducción 90
4.2.7. Pérdidas de calor por convección 91
4.2.8. Pérdidas de calor por radiación desde la superficie externa 91
4.2.9. Energía de entrada 92
4.3. Cálculo del Quemador 92
4.3.1. Teoría de quemador 92
4.3.2. Potencia real de entrada al quemador 93
4.3.3. Área requerida de puertos para carga segura 93
4.3.4. Cálculo de puertos del quemador 94
4.3.5. Sistema de gas – aire 94
4.3.6. Exceso de aire: 95
4.3.7. Cálculo de velocidad de llama: 96
4.4. Cálculo de tubería 97
4.4.1. Teoría de tubería 97
4.4.2. Cálculo de presión en la tubería 100
4.5. Diseño del intercambiador de calor 102
4.5.1. Teoría de intercambiador 102
4.5.2. Cálculo de Intercambiador de Calor 103
4.5.3. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección Interna. 103
4.5.5. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección Externa. 104
4.5.6. Factor de incrustación interno y externo : 105
4.5.7 Conductividad térmica del material K' 106
4.5.8. Cálculo de coeficiente global de transferencia de calor U 106
4.5.9. Cálculo de temperatura de salida del agua: 107
4.6. Calculo para el diseño de bomba de impulsión 111
4.6.1. Cálculo de perdida en tubos de intercambiador 111
4.6.2 Calculo de perdida de tubo de la bomba hacia condensador 112
4.6.3. Cálculo de perdida de accesorios 113
4.6.4. Cálculo de la bomba de impulsión 114
4.6.5. Cálculo de recipiente de agua 115
4.7. Diseño y cálculo de Separador vertical bifásico 116

4.7.1. Teoría del Separador Vertical 116
4.7.2. Constante de Corrección de Souders-Brown. 117
4.7.3. Velocidad terminal de partícula. 118
4.7.4. Diámetro del Separador. 120
4.7.5. Coeficiente de arrastre (Cd/Re). 120
4.7.6. Diámetro de la partícula 121
4.7.7. Tiempo de residencia. 122
4.7.8. Volumen de Residencia. 123
4.7.9. Alturas del separador. 123
4.7.10. Eficiencia de Separación 125
4.7.11. Recipiente de Almacenamiento 125
CAPÍTULO V: DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR 127
5.1. Diseño Mecánico del Reactor de Pirólisis 127
5.1.1. Presión de Reactor 127
5.1.2. diseño cilíndrico del reactor 128
5.1.3. Diseño de tapa de reactor 129
5.1.4. Cálculo de los Esfuerzos Permisibles 131
5.1.5. Factor de seguridad 134
5.1.6. Cálculo de desplazamientos 135
5.1.7. Imagen del reactor y tapa 136
5.1.8. Cálculo de Soldadura del Reactor 137
5.1.9. Cálculo de Soldadura de la Tapa del Reactor 140
5.2. Diseño de pernos de reactor de pirólisis 141
5.2.1. Parámetros iniciales 141
5.2.2. Área de esfuerzo a la tensión 142
5.2.3. Cálculo de la precarga 143
5.2.4. Longitud de cuerda 144
5.2.5. Rigidez en el perno 144
5.2.6. Cálculo de la rigidez de la junta Kc 146
5.2.7. Factor de rigidez de la junta 148
5.2.8. Carga compresión en el material y tensión en el perno 149

5.3. Diseño mecánico del Condensador 150
5.4. Diseño mecánico del Separador Bifásico 151
5.5. Diseño y cálculo de accionamiento y transmisión 152
5.5.1. Condiciones iniciales (velocidad de rotación) 152
5.5.2. Cálculo de momento de inercia, torque y potencia 153
5.5.3. Calculo y selección de correa y poleas 155
5.5.4. Cálculo de eje de movimiento 159
5.5.5. Cálculo de rodamiento 163
5.6. Modelamiento del Reactor a Pirólisis 167
5.6.1. Análisis estático estructural e interpretación de reactor de pirólisis 167
5.6.2. Análisis estático estructural e interpretación de la tapa del reactor 171
5.7. Modelamiento de Estructura del Reactor de Pirólisis 174
5.7.1. Análisis estático estructural e interpretación de reactor de pirólisis 174
5.7.2. Simulación de la estructura 175
5.8. Simulación del proceso del reactor de Pirólisis 179
5.8.1. Simulación térmica del reactor 179
5.8.2. Resultados 180
5.8.3. Simulación térmica del condensador de tubo y corazas 180
5.8.4. Simulación del separador gas-líquido 182
5.8.5. Análisis de resultados de simulación 184
CAPÍTULO VI: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 185
6.1. Introducción 185
6.2. Especificaciones técnicas de materiales 185
6.2.1. Reactor de pirólisis 186
6.2.2. Sistema de condensación 187
6.2.3. Separador vertical bifásico 187
6.2.4. Sistema de calentamiento 188
6.2.5. Sistema de suministro de gas 189
6.2.6. Sistema de transmisión mecánica 189
6.2.7. Estructura soporte 190
6.2.8. Almacenamiento de productos líquidos 191

6.3. Especificaciones técnicas de equipos 191
6.3.1. Motor eléctrico 191
6.4. Especificaciones técnicas de fabricación y montaje 192
6.4.1. Especificaciones de unión por soldadura y otras 192
6.4.2. Especificaciones de montaje e instalaciones 192
CAPÍTULO VII: RENTABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO 193
7.1. Costos y presupuesto del sistema 193
7.2. Resumen de metrados y costos unitarios 193
7.3. Costos de producción del sistema 198
7.3.1. Costo de producción por hora 198
7.3.2. Costo de producción por mes 198
7.3.3. Costo de producción por año 199
7.4. Supuestos y datos básicos del análisis económico 199
7.5. Estado de resultados proyectado 201
7.6. Flujo neto de fondos del proyecto 203
7.7. Evaluación económica del proyecto 204
7.7.1. Valor Actual Neto (VAN) 204
7.7.2. Tasa Interna de Retorno (TIR) 206
CONCLUSIONES 208
RECOMENDACIONES 210
REFERENCIAS 212
ANEXOS 216

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Condiciones meteorológicas representativas de la ciudad del Cusco* 22
Tabla 2 *Composición de la llanta* 36
Tabla 3 *Composición Elemental de los NFU* 37
Tabla 4 *Rendimientos típicos de los productos de pirólisis en reactores rotativos* 40
Tabla 5 *Rangos típicos de variables operativas en pirólisis lenta* 42
Tabla 6 *Valores típicos de eficiencia de soldadura E según ASME Sección VIII* 57
Tabla 7 *Factor de Seguridad según el Código ASME* 58
Tabla 8 *Alternativas preliminares de diseño del reactor de pirólisis* 62
Tabla 9 *Alternativas preliminares de accionamiento y transmisión* 63
Tabla 10 *Alternativas preliminares de diseño del quemador* 64
Tabla 11 *Alternativas preliminares de diseño del condensador* 64
Tabla 12 *Alternativas preliminares de diseño del sistema de separación gas-líquido* 65
Tabla 13 *Lista de exigencias del reactor de pirólisis rotativo* 67
Tabla 14 *Caja negra del reactor de pirólisis rotativo* 69
Tabla 15 *Estructura de funciones del reactor de pirólisis rotativo* 71
Tabla 16 *Matriz morfológica* 72
Tabla 17 *Valoración técnica de los conceptos de solución* 79
Tabla 18 *Valoración económica de los conceptos de solución* 80
Tabla 19 *Resultado de la valoración técnico-económica de los conceptos de solución* 81
Tabla 20 *Eficiencia de quemadores según altura sobre el nivel del mar* 93
Tabla 21 *Velocidades recomendadas y caída de presión admisible en tuberías según el tipo de servicio* 99
Tabla 22 *Valores de factores de incrustación* 105
Tabla 23 *Parámetros iniciales de diseño del separador vertical bifásico* 117
Tabla 24 *Valores típicos de K y Factor de corrección (GPSA, 1998)* 118
Tabla 25 *Porcentaje corrección de velocidad terminal diseño de separadores bifásicos (GPSA, 1998)* 119
Tabla 26 *Leyes de coeficiente de arrastre (GPSA, 1998)* 121
Tabla 27 *Tiempo de residencia en separadores bifásicos en función del API (API SPECIFICATION 12J)* 122
Tabla 28 *Propiedades mecánicas de soldadura E316L* 137

Tabla 29 *Tabla de factor de seguridad (FS) según el código de diseño* 138
Tabla 30 *Geometría técnica de doble bisel en ¼"* 139
Tabla 31 *Características dimensionales del perno M16×50* 142
Tabla 32 *Longitudes características del perno M16×50* 144
Tabla 33 *Resumen de parámetros de carga de compresión en el material y tensión en el perno* 150
Tabla 34 *Parámetros iniciales de diseño mecánico del condensador* 151
Tabla 35 *Parámetros de diseño mecánico del separador bifásico* 151
Tabla 36 *Peso de componentes y radio de giro* 154
Tabla 37 *Propiedades físicas del SAE 1045* 160
Tabla 38 *Factor de Seguridad recomendadas para construcción de maquinaria* 161
Tabla 39 *Valores orientativos sobre la vida especificada de diferentes tipos de máquinas* 165
Tabla 40 *Parámetros de ingreso, a analizar en SolidWorks Simulation* 179
Tabla 41 *Parámetros de operación para la simulación térmica del condensador de tubo y coraza* 181
Tabla 42 *Parámetros de operación para la simulación del separador bifásico* 183
Tabla 43 *Especificaciones técnicas del reactor de pirólisis* 186
Tabla 44 *Propiedades de los materiales principales del reactor* 187
Tabla 45 *Especificaciones técnicas del sistema de condensación* 187
Tabla 46 *Especificaciones técnicas del separador bifásico* 188
Tabla 47 *Especificaciones técnicas del sistema de calentamiento* 188
Tabla 48 *Especificaciones técnicas del sistema de suministro de gas* 189
Tabla 49 *Especificaciones técnicas del sistema de transmisión* 189
Tabla 50 *Especificaciones técnicas de la estructura soporte* 190
Tabla 51 *Especificaciones técnicas del almacenamiento de productos líquidos* 191
Tabla 52 *Especificaciones técnicas del motorreductor* 191
Tabla 53 *Especificaciones técnicas de soldadura y procesos de fabricación* 192
Tabla 54 *Especificaciones técnicas de montaje e instalaciones* 192
Tabla 55 *Costos de materiales, subcontratos de servicios de reactor de pirólisis* 194
Tabla 56 *Resumen de metrados y costos unitarios del sistema de pirólisis* 197
Tabla 57 *Costos de producción del sistema por hora, mes y año* 199
Tabla 58 *Supuestos económicos del proyecto* 200
Tabla 59 *Datos económicos del primer año de operación* 200

Tabla 60 *Estado de resultados proyectado en soles peruanos* 202
Tabla 61 *Flujo neto de fondos del proyecto*..... 203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Ubicación del proyecto de diseño del reactor de pirólisis en la región Cusco* 22
Figura 2 *Crecimiento vehicular en la región del Cusco en los últimos años* 25
Figura 3 *Composición de un neumático*..... 37
Figura 4 *Gránulos de NFU* 38
Figura 5 *Conducción de calor a través de una pared plana*..... 44
Figura 6 *Tipos de recipientes* 51
Figura 7 *Cuerpo cilíndrico con costura longitudinal* 52
Figura 8 *Distribución de esfuerzos en un elemento de pared delgada sometido a presión*..... 55
Figura 9 *Distribución de esfuerzos circunferenciales y longitudinales en un recipiente cilíndrico de pared delgada sometido a presión* 55
Figura 10 *Estructura de funciones del reactor de pirolisis rotativo*..... 72
Figura 11 *Concepto de solución 1 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo horizontal*... 75
Figura 12 *Concepto de solución 2 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo vertical* 76
Figura 13 *Concepto de solución 3 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo vertical* 77
Figura 14 *Concepto de solución 4 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo inclinado* 78
Figura 15 *Análisis técnico-económico de los conceptos de solución* 81
Figura 16 *Balance de energía personalizado al reactor* 87
Figura 17 *Etapas de transferencia de calor en un intercambiador tubulares* 106
Figura 18 *Coeficiente típicos de transferencia global de calor en intercambiador tubulares*... 107
Figura 19 *Esquema de temperaturas de intercambiador de calor* 108
Figura 20 *Factor de corrección de LMTD, para intercambiadores 4-8*..... 109
Figura 21 *Esquema de separador vertical gas–líquido y criterios de diseño geométrico*..... 124
Figura 22 *Esquema geométrico del cilindro horizontal parcialmente lleno* 125
Figura 23 *Representación geométrica de la tapa plana circular sometida a presión interna* ... 130
Figura 24 *Modelo tridimensional del reactor de pirólisis diseñado en SolidWorks* 136
Figura 25 *Modelo tridimensional de la tapa del reactor de pirólisis* 136
Figura 26 *Fuerza de precarga y deflexiones iniciales* 143
Figura 27 *Conjunto roscado con empaquetadura* 145
Figura 28 *Sistema de sujeción con múltiples juntas* 146

Figura 29 *Componentes del sistema de rotación del reactor de pirólisis para el análisis de momento de inercia, torque y potencia* 153
Figura 30 *Sistema de transmisión por correa y poleas del reactor de pirólisis* 155
Figura 31 *Potencia corregida para el cálculo en H.P* 156
Figura 32 *Geometría y dimensiones del eje seleccionadas para el sistema de accionamiento del reactor* 163
Figura 33 *Selección de rodamiento SKF 61805 a partir de catálogo técnico* 166
Figura 34 *Soporte con rodamiento autoalineable y base de cuatro pernos para eje de 1 pulgada* 166
Figura 35 *Análisis Von Mises del reactor térmico para presión de diseño* 167
Figura 36 *Análisis de deformación del reactor térmico para presión de diseño* 168
Figura 37 *Análisis y evaluación del factor de seguridad del reactor térmico bajo presión de diseño* 169
Figura 38 *Análisis von Mises de la tapa del reactor para presión de diseño* 171
Figura 39 *Análisis de deformación de la tapa del reactor térmico para presión de diseño* 172
Figura 40 *Análisis y evaluación de factor de seguridad de la tapa del reactor para presión de diseño* 173
Figura 41 *Diseño de estructura metálica diseñada para soportar el reactor y sus componentes* 175
Figura 42 *Análisis de tensiones equivalentes de von Mises en la estructura soporte del reactor* 176
Figura 43 *Análisis de desplazamientos resultantes de la estructura soporte del reactor* 177
Figura 44 *Análisis y evaluación del factor de seguridad de la estructura soporte* 178
Figura 45 *Distribución de las temperaturas en el reactor* 180
Figura 46 *Simulación térmica del condensador en vista longitudinal* 181
Figura 47 *Simulación térmica del condensador en vista isométrica* 182
Figura 48 *Trayectorias del flujo y distribución de temperatura en el separador vertical bifásico* 182
Figura 49 *Distribución de temperatura del flujo en el separador vertical bifásico* 183

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA 216
Anexo 2. Propiedades físicas y químicas de gránulos de caucho 217
Anexo 3. Leyes de sedimentación por gravedad y características de las partículas 218
Anexo 4. Electrobomba centrifuga 219
Anexo 5. Motor del catálogo Sew Eurodrive.....220
Anexo 6. Coeficiente de corrección de la potencia.....221
Anexo 7. Selección de correa comercial según longitud primitiva nominal 221
Anexo 8. Especificaciones para tubos de acero comercial norma BWG-ANSI 222
Anexo 9. Propiedades del acero AISI 304 y AISI 316 223
Anexo 10. Tabla de costos operativos 224
Anexo 11. Tabla de ingresos por venta, rendimiento de productos.....224
Anexo 12. Cotizaciones 225
Anexo 13. Planos 226

RESUMEN

La presente investigación aborda el diseño de reactor de pirólisis a partir del procesamiento de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h debido a la creciente acumulación de residuos en la Región del Cusco, orientada para la obtención de combustibles hidrocarburos. Para la solución de este problema, se considera gránulos de neumáticos usados, una presión de operación (101,32 kPa) y temperatura de 500 °C (Bridgwater, 2012).

La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental de nivel descriptivo-propositivo y esta se respalda en revisión documentaria académica. Para el desarrollo del estudio se empleó la metodología VDI 2221 para la generación de conceptos de solución y de la VDI 2225 para la comparación técnico-económica de alternativas.

Se desarrolló el diseño térmico del reactor, determinándose sistema de calentamiento, quemador de gas, condensador tubular y separador bifásico. Asimismo, para el diseño mecánico del reactor, la presión de diseño, espesor de cuerpo cilíndrico y sistema de transmisión.

Del mismo modo, el análisis técnico permitió seleccionar materiales adecuados, principalmente acero inoxidable AISI 316 y AISI 304, mientras que la evaluación económica mostró indicadores favorables, con un Valor Presente Neto positivo y una Tasa Interna de Retorno superior a la tasa de interés de oportunidad. Se concluyó que el diseño propuesto es técnica y económicamente viable para el aprovechamiento de neumáticos usados granulados mediante pirólisis.

Palabras clave: Pirólisis, Neumáticos usados granulados, Reactor rotatorio, Diseño térmico, Diseño mecánico.

ABSTRACT

This research addresses the design of a pyrolysis reactor—with a capacity of 20 kg/h and intended for the production of hydrocarbon fuels—to process granulated used tires, a measure prompted by the growing accumulation of waste in the Cusco Región. The design parameters considered include the use of granulated used tires, an operating pressure of 101.32 kPa, and a temperature of 500 °C (Bridgwater, 2012).

The study was applied research with a quantitative approach and a non-experimental, descriptive-propositive design, supported by an academic literature review. The VDI 2221 methodology was employed to generate solution concepts, while VDI 2225 was used for the technical-economic comparison of alternatives.

The thermal design of the reactor was developed, determining the heating system, gas burner, tubular condenser, and two-phase separator. Likewise, the mechanical design of the reactor addressed the design pressure, cylindrical shell thickness, and transmission system.

Technical analysis facilitated the selection of suitable materials—primarily AISI 316 and AISI 304 stainless steel—while the economic evaluation yielded favorable indicators, including a positive Net Present Value and an Internal Rate of Return exceeding the opportunity cost of capital. It was concluded that the proposed design is technically and economically viable for utilizing granulated used tires through pyrolysis.

Keywords: Pyrolysis, Granulated waste tires, Rotary reactor, Thermal design, Mechanical design.

NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS

A : área
C_p : capacidad calorífica específica
D : diámetro
e : espesor
F : fuerza
FS : factor de seguridad
g : aceleración de la gravedad
h : altura
I : momento de inercia
k : conductividad térmica
L : longitud
m : masa
N : número de revoluciones / número de tubos
P : presión
Pot : potencia
Q : calor o tasa de transferencia de calor
R : radio
Re : número de Reynolds
S : esfuerzo permisible del material
t : espesor
T : temperatura
U : coeficiente global de transferencia de calor
V : volumen
v : velocidad
W : peso
ΔT : diferencia de temperatura
Δx: espesor del aislamiento
ρ : densidad
μ : viscosidad dinámica
σ : esfuerzo
ω : velocidad angular
π : constante pi
AISI : American Iron and Steel Institute
API : American Petroleum Institute
ASME : American Society of Mechanical Engineers
ASTM : American Society for Testing and Materials
BTU/h : British Thermal Unit por hora
FEA : análisis por elementos finitos
GEI : gases de efecto invernadero
HP : caballo de fuerza
NFU : neumáticos fuera de uso
PCI : poder calorífico inferior
PCS : poder calorífico superior
RPM : revoluciones por minuto
SCH : schedule
TIG : tungsten inert gas
MIG : metal inert gas
VDI : Verein Deutscher Ingenieure
VPN : valor presente neto
TIR : tasa interna de retorno
WACC : costo promedio ponderado de capital

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como propósito el diseño de un reactor de pirólisis a partir de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h en la región Cusco, considerando criterios de diseño térmico y mecánico, selección de materiales y equipos, así como la evaluación de la rentabilidad económica del sistema propuesto. El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, utilizando la metodología de diseño ingenieril basada en la VDI 2221 y 2225, complementada con cálculos de ingeniería, modelamiento tridimensional y simulaciones mediante el software SolidWorks.

El trabajo se encuentra estructurado en siete capítulos. El Capítulo I presenta las generalidades de la investigación, incluyendo el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la hipótesis, las variables y la metodología empleada. El Capítulo II desarrolla el marco teórico relacionado con el proceso de pirólisis, las características de los neumáticos usados y los diferentes tipos de reactores utilizados en estos procesos. El Capítulo III establece los criterios de diseño del reactor y de sus componentes principales. El Capítulo IV presenta el diseño térmico del sistema de pirólisis, incluyendo el reactor, el quemador, el intercambiador de calor y el separador bifásico. El Capítulo V desarrolla el diseño mecánico del reactor y de sus sistemas de accionamiento y soporte mediante modelamiento y simulación. El Capítulo VI describe las especificaciones técnicas Finalmente, el Capítulo VII presenta la evaluación de la rentabilidad económica del proyecto. El trabajo concluye con las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos correspondientes.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Introducción

El incremento del parque automotor ha generado un aumento considerable en la generación de neumáticos fuera de uso (NFU), los cuales representan un problema ambiental debido a su lenta degradación y al impacto que producen cuando no son gestionados adecuadamente. La acumulación de estos residuos puede provocar contaminación del suelo, proliferación de vectores y riesgo de incendios, por lo que resulta necesario desarrollar alternativas tecnológicas que permitan su aprovechamiento y valorización.

Una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de este tipo de residuos es el pirólisis, proceso termoquímico mediante el cual los neumáticos son sometidos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, permitiendo su descomposición en productos como gases, combustibles líquidos y residuos carbonosos. Este proceso contribuye no solo a la reducción del volumen de residuos, sino también a la recuperación de energía y a la obtención de productos con valor energético.

1.2. Ámbito geográfico

El presente trabajo de investigación se desarrolla en la región Cusco, ubicada en la zona sur del Perú, caracterizada por su altitud promedio de aproximadamente 3250 m s. n. m. En estas condiciones, la presión atmosférica es menor en comparación con el nivel del mar, por lo que se considera un valor representativo para la ciudad del Cusco de:

Figura 1

Ubicación del proyecto de diseño del reactor de pirólisis en la región Cusco

Nota. La imagen muestra la ubicación geográfica referencial del área de estudio en la región Cusco, utilizada para el desarrollo del diseño del reactor de pirólisis. La imagen fue obtenida mediante herramientas de georreferenciación digital (Google, 2026).

Tabla 1

Condiciones meteorológicas representativas de la ciudad del Cusco

Condiciones Meteorológicas	Valor	Fuente
Altitud promedio	3250 m s. n. m.	SENAMHI
Presión atmosférica promedio	0.69 bar (≈ 0.7 atm ≈ 69 kPa)	
Equivalencia de presión	70 % del nivel del mar	
Temperatura mínima promedio anual	0 °C – 1.6 °C	
Temperatura máxima promedio anual	21 °C – 24 °C	

Nota. La tabla presenta las condiciones meteorológicas representativas de la ciudad del Cusco, utilizadas como base para el análisis térmico y diseño del reactor de pirólisis. Los datos han sido obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

1.3. Planteamiento del problema

En Perú, la problemática asociada a los neumáticos fuera de uso (NFU) ha crecido significativamente debido al aumento continuo del parque automotor. En el período de 2014 a 2018, la importación de neumáticos aumentó de 55,673 toneladas a 92,659 toneladas, lo que evidencia un incremento considerable en la generación de estos residuos. Estos neumáticos, al alcanzar su vida útil, contribuyen significativamente a la acumulación de residuos sólidos en el país (gob.pe, 2021).

Actualmente, el porcentaje de reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) en Perú es extremadamente bajo, debido a la falta de infraestructura. Las proyecciones futuras indican que, sin intervenciones significativas, la cantidad de neumáticos fuera de uso (NFU) seguirá aumentando en paralelo al crecimiento del número de vehículos. Se estima que para el año 2030, la generación de neumáticos fuera de uso NFU podría superar las 120,000 toneladas anuales, exacerbando los desafíos de gestión ambiental en el país (gob.pe, 2021).

En el caso de neumáticos fuera de uso (NFU), es fundamental aplicar un enfoque de responsabilidad extendida del productor (REP), donde los fabricantes o importadores asuman la responsabilidad de gestionar los desechos producidos de los neumáticos en la etapa posterior al consumo. Esto implica implementar mecanismos de logística inversa para asegurar la recuperación y valorización de los NFU, ya sea a través de sistemas colectivos o individuales. La falta de una gestión apropiada de los NFU puede resultar en la disposición inadecuada de estos neumáticos, lo que genera riesgos ambientales y para la salud.

Por ejemplo, los NFU pueden acumularse en vertederos o abandonarse en espacios abiertos, lo que puede dar lugar a la proliferación de enfermedades transmitidas por vectores o la contaminación del suelo y el agua. Para abordar esta problemática, el MINAM ha promulgado el

“D.S N° 024-2021-MINAM”, que establece un “Régimen Especial de Gestión de neumáticos fuera de uso”. Esta normativa tiene como objetivo regular y promover una gestión adecuada de los NFU, fomentando la revalorización tanto material como energética de estos desechos, en raya con las nociones promulgados en la “Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos” (MINAM, 2021).

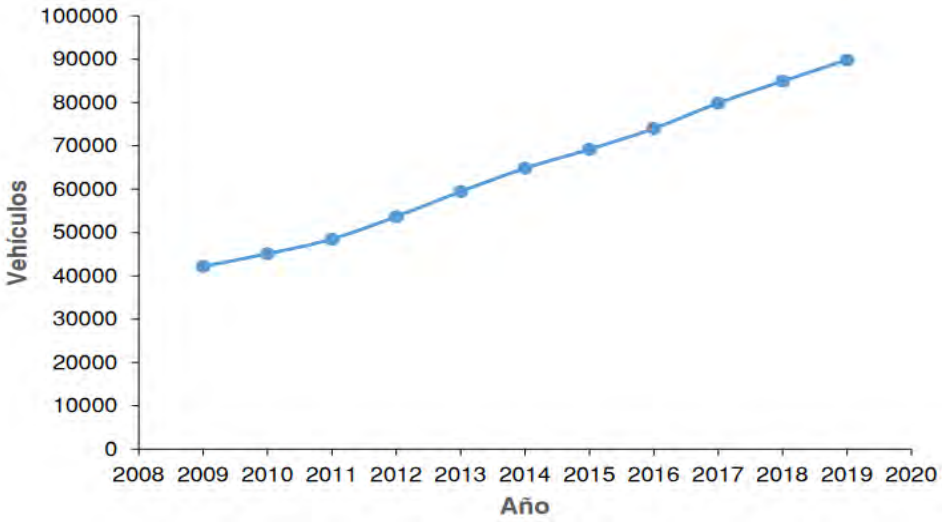
La gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) en Perú enfrenta varios desafíos críticos. Primero, la infraestructura para el reciclaje de estos materiales es insuficiente. Solo alrededor del 10% de los NFU se reciclan adecuadamente, mientras que el 90% restante termina en vertederos o es incinerado, prácticas que conllevan serios riesgos ambientales y de salud pública. La quema de neumáticos, en particular, libera toxinas y partículas finas al aire, contribuyendo a la contaminación atmosférica y afectando la calidad del aire en áreas urbanas y rurales.

En la ciudad del Cusco se estima una generación de 320 kg de llantas desechadas por día, esto según los datos de la “Municipalidad provincial del Cusco” (Municipalidad Provincial del Cusco, comunicación personal, 12 de septiembre de 2023), mediante el programa PANTI, es por ello que se debe realizar eta investigación ya que, el aumento en la generación de llantas desechadas en el Cusco plantea desafíos en la gestión de residuos.

La investigación propone una solución sostenible para tratar y aprovechar estos desechos, reduciendo su impacto ambiental y preservando el entorno. El diseño de un reactor de pirólisis permitiría convertir el caucho de las llantas en combustible utilizable, proporcionando una fuente de energía alternativa y sostenible. Esto menguaría la codependencia de los combustibles fósiles y contribuiría a mitigar el cambio climático. Además, los desarrollos de este diseño para obtener combustibles por medio de llantas podrían promover la implementación de prácticas de economía circular en el Cusco, fomentando la reutilización, el reciclaje y generando oportunidades económicas, al tiempo que se reduce la extracción de recursos naturales.

Figura 2

Crecimiento vehicular en la región del Cusco en los últimos años



Nota. Parque Vehicular Estimado por Años, Según Departamento o Región: 2009-2019. Adaptado de: Oficina de Estadística–Superintendencia Nacional de los Registros Públicos (SUNARP) Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La figura muestra el crecimiento del parque vehicular en la región del Cusco durante el período 2008–2020, evidenciando una tendencia sostenida al alza en el número de vehículos registrados. Este comportamiento refleja un incremento progresivo en la demanda de neumáticos y, en consecuencia, en la generación de neumáticos fuera de uso, lo que agrava la problemática de gestión de estos residuos en la región.

De acuerdo con el gráfico, el número de vehículos pasó de aproximadamente 30,000 unidades en 2008 a cerca de 90,000 en 2020, lo que representa un incremento cercano al 200 % en un periodo de doce años. Esta expansión del parque automotor permite inferir un aumento proporcional en la generación de residuos de neumáticos, situación que incrementa la presión sobre los sistemas de manejo y disposición final de residuos sólidos.

La región de Arequipa ha tomado el liderazgo nacional al implementar la primera planta de pirólisis en el Peru. La pirólisis se presenta como una solución técnica e innovadora mediante el uso de cinco reactores de alta tecnología. Operada por Inversiones Ambientales Camed S.A.C., la planta cuenta con cinco reactores capaces de procesar 10 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU).La instalación cuenta con el respaldo del Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (SENACE) y cumple con la normativa vigente del Ministerio del Ambiente (MINAM). La planta opera bajo la Resolución Directorial N° 00264-2022-MINAM, lo que garantiza su compromiso con el desarrollo sostenible e innovación tecnológica.

En este contexto, la presente investigación plantea el diseño de un reactor de pirólisis como alternativa tecnológica para el aprovechamiento energético de neumáticos usados granulados en la región del Cusco. Esta propuesta busca no solo contribuir a la reducción del impacto ambiental generado por la disposición inadecuada de estos residuos, sino también promover la obtención de productos de valor, como combustibles hidrocarburados, dentro de un enfoque de sostenibilidad ambiental y aprovechamiento de residuos.

En cuanto al tipo de reactor, se considera que el reactor rotativo de pirólisis constituye la alternativa más adecuada para el procesamiento de neumáticos usados granulados, debido a que favorece una distribución térmica más homogénea, facilita el movimiento continuo del material y mejora la transferencia de calor entre la superficie calentada y el lecho sólido. Asimismo, su configuración mecánica presenta mayor flexibilidad operativa y menor riesgo de formación de puntos calientes, características que lo hacen apropiado para operar en las condiciones exigidas por el proceso de pirólisis. Este proceso de pirólisis descompone los neumáticos fuera de uso (NFU), descompone estos componentes a altas temperaturas sin oxígeno, convirtiéndolos en recursos valiosos como aceite, gas, negro del carbón y alambre de acero.

Respecto a la capacidad de procesamiento de 20 kg/h adoptada en el presente diseño, esta se sustenta en las condiciones del mercado local, donde el granulado de neumático suele comercializarse en presentaciones de 20 kg por bolsa o lote de despacho. Esta capacidad resulta adecuada para una instalación piloto a escala semiindustrial, ya que facilita la alimentación, dosificación y control del sistema, además de permitir la evaluación del desempeño térmico y mecánico del reactor en condiciones representativas.

Por lo tanto, la creciente generación de neumáticos fuera de uso en la región Cusco, sumada a la ausencia de soluciones tecnológicas locales orientados a su valorización energética, justifica la necesidad de diseñar un reactor de pirólisis rotativo con capacidad de 20 kg/h, adaptado a las condiciones técnicas y operativas del contexto regiónal.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema general

¿De qué manera se puede aprovechar los neumáticos usados granulados, utilizando un reactor de pirólisis con una capacidad de 20 kg/h en la región del Cusco?

1.4.2. Problemas específicos

Los siguientes problemas son los siguientes:

- ¿Qué conceptos y metodologías se deben aplicar para el diseño de reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h?
- ¿Cuáles son los parámetros para el diseño térmico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados para una capacidad de 20 kg/h?

- ¿En qué medida el desarrollo del diseño mecánico; podría dar una solvencia técnica en el dimensionamiento de componentes mecánicos del reactor de pirólisis con una capacidad de 20 kg/h?
- ¿De qué manera se puede verificar la rentabilidad y factibilidad económica del reactor de pirólisis?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar un reactor de pirólisis a partir de neumáticos usados granulados, con una capacidad de 20 kg/h en la Región del Cusco

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir los conceptos y metodologías para el diseño de reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h.
- Definir los parámetros técnicos y desarrollar el diseño térmico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h.
- Desarrollar el diseño mecánico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h.
- Desarrollar un análisis económico del reactor de pirólisis, para determinar su rentabilidad y factibilidad mediante los indicadores VAN y TIR

1.6. Justificación

El diseño de un prototipo de reactor de pirólisis para la valorización energética de neumáticos fuera de uso resulta conveniente debido a la creciente acumulación de este tipo de residuos en la Región del Cusco, los cuales presentan dificultades técnicas y ambientales para su

disposición final. La pirólisis se plantea como una alternativa tecnológica viable que permite transformar estos residuos en combustibles líquidos, gaseosos y sólidos, aportando una solución técnica frente a un problema ambiental local.

Desde el punto de vista social, la investigación es relevante porque contribuye a la mejora de la gestión de residuos sólidos, reduciendo riesgos asociados a la quema informal de neumáticos y a su acumulación en espacios no autorizados, prácticas que afectan la salud pública y el entorno. Asimismo, la implementación futura de este tipo de tecnología podría generar oportunidades de empleo vinculadas a la recolección, procesamiento y aprovechamiento energético de los neumáticos fuera de uso en la región.

El estudio aporta valor teórico al consolidar y aplicar principios de la ingeniería química y térmica relacionados con el proceso de pirólisis, el diseño de reactores, la transferencia de calor y la separación de fases. Asimismo, contribuye a la sistematización de criterios de diseño mecánico y de simulación estructural aplicados a reactores de pirólisis, fortaleciendo el marco conceptual para futuras investigaciones en el aprovechamiento energético de residuos.

Desde el enfoque metodológico, la investigación es útil porque desarrolla y valida una metodología integral de diseño que combina cálculos teóricos, criterios normativos y simulaciones mediante el método de elementos finitos. Esta metodología puede ser replicada o adaptada para el diseño de otros equipos térmicos similares, sirviendo como referencia para estudios académicos y proyectos de ingeniería aplicados.

La investigación es viable desde el punto de vista técnico y económico, ya que se basa en el uso de herramientas de diseño asistido por computadora y software de simulación disponibles, así como en materiales y tecnologías accesibles en el contexto nacional. Además, el alcance del

estudio se limita al diseño y análisis del prototipo, lo que permite su desarrollo dentro de los recursos, el tiempo y las condiciones propias de una investigación académica.

1.7. Alcances y limitaciones

1.7.1. Alcances

La presente investigación está diseñada bajo la metodología alemana VDI 2221 y VDI 2225.

El estudio comprendió la definición de criterios de diseño, el análisis de alternativas y la selección de la configuración más adecuada del sistema de pirólisis

Se desarrollan los planos, el cálculo de componentes térmicos y mecánicos, necesarios para el reactor de pirólisis

Se realizo un análisis estático estructural del reactor y soporte estructura, mediante el uso de SolidWorks.

Se realizo un análisis computacional del proceso del reactor de pirólisis mediante el programa SolidWorks, que contempla al reactor, condensador y separador bifásico

1.7.2. Limitaciones

Los datos se determinan mediante la revisión bibliográfica

El estudio no incluyó la determinación experimental de los rendimientos reales de aceite pirolítico, fase gaseosa y char, por lo que estos productos fueron considerados únicamente desde un enfoque teórico y funcional

La presente investigación no contemplo la construcción física del reactor de pirólisis.

No se realiza el diseño eléctrico y sistema de control electrónico

No se realizará cálculo de soldadura y cargas, sobre el soporte-estructura

No se incluyeron estudios de suelos, diseño de cimentaciones, evaluación de desniveles de superficie, análisis de vibraciones, resonancia estructural ni interacción suelo-estructura.

Los costos considerados correspondieron a valores referenciales de materiales, equipos, fabricación y montaje.

No se evaluará influencia social- ambiental del reactor de pirólisis.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

El diseño de reactor de pirólisis con capacidad 20 kg/h, permitirá aprovechar los neumáticos usados granulados, utilizando herramientas de diseño conceptual, diseño térmico y mecánico, simulación y análisis económico.

1.9. Variables

1.9.1. Variable Independiente

Parámetros técnicos de diseño del reactor de pirólisis: Comprende el conjunto de criterios y condiciones técnicas consideradas para el diseño del reactor de pirólisis.

- Densidad y tamaño de neumáticos usados granulados (kg/m^3, mm)
- Flujo masico de gránulos de neumáticos usados (kg/h)
- Parámetros de operación (temperatura °C, presión de diseño Pa)

1.9.2. Variable Dependiente

Rendimiento de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis de neumáticos usados granulados: Corresponde a la distribución de productos generados durante el pirólisis.

- Rendimiento de productos (% líquidos, gases y char)

1.10. Metodología de la Investigación

1.10.1. Enfoque de la investigación

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que se emplearon cálculos de ingeniería, dimensionamientos, relaciones matemáticas, simulaciones y análisis numéricos para el diseño del reactor de pirólisis, sus componentes auxiliares y la evaluación de su rentabilidad económica.

1.10.2. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, porque estuvo orientada a resolver un problema específico relacionado con el aprovechamiento de neumáticos usados granulados mediante el diseño de un reactor de pirólisis con capacidad de 20 kg/h en la región del Cusco.

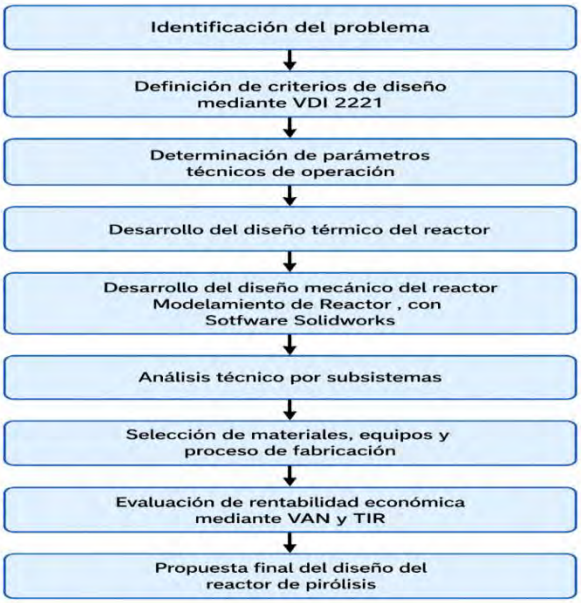
1.10.3. Nivel

El nivel de la presente investigación fue descriptivo-aplicativo, debido a que permitió describir y analizar los criterios, parámetros técnicos y condiciones de diseño requeridas para el desarrollo de un reactor de pirólisis para neumáticos usados granulados y, a partir de ello, proponer una solución de ingeniería materializada en el diseño térmico, diseño mecánico, análisis técnico por subsistemas y evaluación de rentabilidad económica del sistema. En ese sentido, la investigación no se limitó únicamente a caracterizar el problema, sino que planteó una alternativa técnica de diseño orientada a la obtención de combustibles hidrocarburos a partir del procesamiento de neumáticos usados.

1.10.4. Diseño de investigación

La investigación presentó un diseño no experimental, de alcance descriptivo-propositivo, ya que no se manipularon deliberadamente variables ni se realizaron ensayos experimentales

directos sobre una muestra, sino que se describieron las condiciones técnicas del proceso y, a partir de ello, se formuló una propuesta de diseño del reactor de pirólisis y de sus sistemas complementarios.



El procedimiento de investigación se estructuró de manera secuencial. En una primera etapa se identificó la problemática y se establecieron los criterios de diseño del reactor utilizando la metodología alemana VDI 2221. Posteriormente, se definieron los parámetros técnicos de operación, tales como capacidad de procesamiento, temperatura y presión de diseño. En una tercera etapa se desarrolló el diseño térmico del reactor y de sus subsistemas asociados, incluyendo el sistema de calentamiento, condensación y separación. Luego, se efectuó el diseño mecánico mediante modelamiento en SolidWorks, integrando el reactor, el sistema de transmisión, la estructura soporte y los principales componentes auxiliares. Finalmente, se realizó el análisis técnico por subsistemas, la selección de materiales, equipos y procesos de fabricación, y la evaluación de la rentabilidad económica del proyecto mediante los indicadores VAN y TIR.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Li et al. (2004), en el artículo titulado "Pilot-Scale Pyrolysis of Scrap Tires in a Continuous Rotary Kiln Reactor", tuvieron como objetivo investigar la pirólisis de neumáticos usados en un reactor rotativo continuo a escala piloto, evaluando el efecto de la temperatura sobre la distribución de productos sólidos, líquidos y gaseosos. La metodología fue experimental y se desarrolló en un horno rotatorio continuo, trabajando con temperaturas entre 450 °C y 650 °C. Los resultados mostraron que, al incrementar la temperatura, el rendimiento de char se mantuvo relativamente constante, con un promedio de 39.8 % en peso, mientras que el rendimiento máximo de aceite pirolítico alcanzó 45.1 % a 500 °C. Asimismo, los aceites obtenidos presentaron un poder calorífico de 40 a 42 MJ/kg, viscosidad adecuada y contenido razonable de azufre, por lo que fueron considerados combustibles líquidos potenciales. En conclusión, los autores demostraron que el reactor rotativo continuo es una configuración técnicamente viable para la valorización energética de neumáticos usados, debido a su operación continua, control térmico y capacidad para obtener fracciones líquidas aprovechables. Este antecedente se relaciona directamente con la presente investigación, ya que respalda la selección de un reactor rotativo para el procesamiento de neumáticos usados granulados.

Díez et al. (2005), en el estudio titulado "Pyrolysis of tyres: A comparison of the results from a fixed-bed laboratory reactor and a pilot plant (rotatory reactor)", tuvieron como objetivo comparar los resultados de la pirólisis de neumáticos obtenidos en un reactor de laboratorio de lecho fijo y en una planta piloto con reactor rotatorio. La metodología fue experimental y comparativa, evaluando la obtención de fracciones sólida, líquida y gaseosa, así como las

propiedades de los productos generados. Los resultados evidenciaron que la configuración del reactor influye en el comportamiento del proceso, debido a diferencias en la rampa de calentamiento, el tiempo de residencia y la distribución de productos. En conclusión, el estudio confirmó que el tipo de reactor modifica el desempeño global de la pirólisis de neumáticos y que el reactor rotatorio constituye una alternativa aplicable a escala piloto. Este antecedente es pertinente para la presente tesis porque permite justificar técnicamente la elección de un reactor rotativo frente a configuraciones estáticas.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Proch et al. (2021), en el artículo titulado "Development of an up-scalable rotary kiln design for the pyrolysis of waste tyres", tuvieron como objetivo desarrollar un diseño escalable de horno rotatorio calentado indirectamente para la pirólisis de neumáticos fuera de uso. La metodología se basó en simulación numérica y modelamiento unidimensional, considerando transferencia de calor y masa, perfiles de temperatura, flujo másico de partículas, altura del lecho y condiciones de operación del horno rotatorio. Los resultados permitieron establecer criterios de diseño para escalar el reactor desde laboratorio hasta nivel industrial, manteniendo características adecuadas de transferencia térmica y residencia del material. En conclusión, los autores demostraron que el diseño de un reactor rotativo para pirólisis de neumáticos debe sustentarse en criterios de escalabilidad, transferencia de calor, residencia del sólido y comportamiento del lecho. Este antecedente se relaciona de manera directa con la presente investigación, especialmente con el diseño térmico, mecánico y conceptual del reactor de pirólisis de 20 kg.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que se realiza en ausencia de oxígeno, o con una cantidad limitada del mismo, lo que permite la descomposición térmica de materiales orgánicos a altas temperaturas. Este proceso es fundamental para convertir residuos como los neumáticos fuera de uso en productos útiles como gas, aceite y carbón (Aguado et al., 2014). La eficacia de la pirólisis depende significativamente de los parámetros operativos, tales como la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, los cuales determinan la calidad y cantidad de los productos finales.

2.2.2. El neumático y su composición

La llanta es un elemento fundamental del vehículo, ya que establece el contacto directo entre el automóvil y la carretera, con un impacto directo en el desempeño, seguridad y confort. La composición del neumático es el resultado de una mezcla esmerada de diversos materiales diseñados para cumplir funciones específicas (Dickerson & Soria, 2013).

Estructuralmente, la llanta consiste en varias capas superpuestas. En la parte externa se encuentra la banda de rodadura, principalmente compuesta por caucho vulcanizado, que proporciona tracción y resistencia al desgaste. Se incorporan compuestos especiales para mejorar la adherencia frente a distintas condiciones climáticas (Dickerson & Soria, 2013). En términos de composición global, un neumático contiene aproximadamente 70 a 75 % de caucho, 12 a 15 % de fibra textil, 12 a 15 % de acero en cables o cinturones y cerca del 1 % de aditivos químicos (Repsa, 2023) [VERIFICAR: falta ficha completa de esta fuente].

Tabla 2

Composición de la llanta

Componente	Composición (% peso)
Caucho natural	29,6
Caucho de estireno-butadieno	29,6
Carbón negro	29,6

Óxido de magnesio	3,0
Azufre	0,9
Aceite aromático	2,4
Resina fenólica	2,4
Ácido esteárico	0,6
IPPD (antioxidante)	0,9
CBS (acelerador de vulcanización)	0,9
Otros aditivos	0,3

Nota. Adaptado de Aguado et al. (2014).

Figura 3

Composición de un neumático

Nota. Elaboración propia. (Repsa, 2023)

2.2.3. Granulometría de los residuos de neumático

Los gránulos de neumáticos fuera de uso (NFU) se clasifican en diferentes tamaños para optimizar el proceso de pirólisis. La granulometría influye directamente en la eficiencia del proceso, ya que tamaños menores permiten una mayor superficie de contacto con el calor, mejorando la descomposición térmica del material y facilitando una conversión más eficiente en productos de mayor valor.

Tabla 3

Composición Elemental de los NFU

Composición química	Porcentaje (%)
Carbono	70 – 80
Hidrógeno	7,5
Azufre	1,2 – 1,9
Cloro	0,2 – 0,6

Hierro	15
Óxido de Zinc	2
Dióxido de Silicio	5
Cromo	97 ppm
Níquel	77 ppm
Plomo	60 – 760 ppm
Cadmio	5 – 10 ppm

Nota. Adaptado de Mejía et al. (2021) y Meza (2014).

Figura 4

Gránulos de NFU

Nota. Recuperado de Anh Tuan Hoang (2020).

La distribución de tamaños de partícula y la composición química de los NFU son determinantes para la selección de las condiciones de operación y el diseño del reactor de pirólisis. La presencia de metales pesados (cromo, níquel, plomo, cadmio) exige consideración especial por sus potenciales impactos ambientales y en la salud, lo que influye en las rutas de valorización energética y en las medidas de control de emisiones del proceso.

2.2.4. Productos obtenidos en la pirólisis de neumáticos

La pirólisis de neumáticos fuera de uso genera tres fracciones principales: una fracción líquida (aceite pirolítico), una fracción gaseosa (gas no condensable) y una fracción sólida (char). La distribución de estos productos depende de las condiciones de operación del proceso, especialmente de la temperatura, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, la presión y el tamaño de partícula del material alimentado (Camargo & Moreno, 2018).

2.2.4.1. Aceite pirolítico

El aceite pirolítico es la fracción líquida obtenida tras el enfriamiento y la condensación de los vapores generados durante la descomposición térmica del neumático. Está constituido por una mezcla compleja de compuestos aromáticos y alifáticos cuya composición depende de las condiciones operativas y del tipo de neumático empleado. Por su poder calorífico y su potencial uso como combustible alternativo o materia prima química, el aceite pirolítico representa uno de los productos de mayor interés del proceso (Suárez, 2018).

2.2.4.2. Gas no condensable

La fracción gaseosa de la pirólisis está formada por gases no condensables, principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos ligeros. Estos gases pueden aprovecharse energéticamente dentro del propio sistema, contribuyendo a la eficiencia térmica global del reactor (Camargo & Moreno, 2018).

2.2.4.3. Char o residuo sólido

El char es la fracción sólida remanente del proceso de pirólisis y está compuesto principalmente por carbón fijo, negro de humo, cenizas y residuos minerales. Su proporción depende de las condiciones de operación y de la composición del neumático, especialmente del contenido de negro de humo y materiales inorgánicos (Camargo & Moreno, 2018).

2.2.4.4. Rendimientos en reactores rotativos

Diversos estudios han reportado los rendimientos típicos obtenidos en la pirólisis de neumáticos fuera de uso en reactores de tipo rotativo. La fracción líquida suele ser el producto de mayor interés económico, mientras que las fracciones sólida y gaseosa presentan comportamientos complementarios en función del régimen térmico (Ochoa & Mahecha, 2018).

Tabla 4

Rendimientos típicos de los productos de pirólisis en reactores rotativos

Referencia	Materia prima	Líquido (%)	Char (%)	Gas (%)
Suárez (2018)	Llantas de auto y camión	40 – 50	30 – 40	10 – 20
Ochoa y Mahecha (2018)	Llantas usadas	35 – 50	36 – 45	10 – 20
Pretell et al. (2021)	NFU	35 – 54	39 – 42	5 – 22

Nota. Elaboración propia a partir de Suárez (2018), Ochoa y Mahecha (2018) y Pretell et al. (2021).

2.2.5. Variables operativas de la pirólisis

Las variables operativas condicionan directamente la distribución de productos, la eficiencia de conversión y el comportamiento térmico del reactor. Las más relevantes son la temperatura de operación, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula y la presión, las cuales influyen en la velocidad de descomposición, la transferencia de calor y la estabilidad del proceso (Dickerson & Soria, 2013).

2.2.5.1. Temperatura de operación

Es una de las variables más influyentes; controla el grado de descomposición térmica y la distribución de productos. A temperaturas moderadas se favorece la formación de fracción líquida y sólida, mientras que a temperaturas elevadas aumenta la producción de gases no condensables por mayor ruptura de compuestos intermedios (Aguado et al., 2014).

2.2.5.2. Tiempo de residencia

Corresponde al periodo durante el cual el material o los vapores permanecen sometidos a las condiciones de reacción. Influye en el grado de conversión y en la proporción de productos finales (Balseca et al., 2021).

2.2.5.3. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula del neumático triturado influye en la transferencia de calor y en la uniformidad de la descomposición térmica. Partículas más pequeñas presentan una mayor superficie específica, favoreciendo un calentamiento más rápido y homogéneo (Balseca et al., 2021).

2.2.5.4. Presión manométrica

La presión manométrica es la diferencia entre la presión interna de un sistema y la presión atmosférica externa. Se mide con un manómetro, que muestra un valor positivo si la presión interna es mayor a la atmosférica, o negativo si es menor (vacío). Este concepto es clave en ingeniería y aplicaciones prácticas como calderas, tanques de gas, circuitos hidráulicos y sistemas industriales, ya que permite controlar la presión relativa para garantizar seguridad, eficiencia y buen funcionamiento La fórmula para calcular la presión manométrica se expresa de la siguiente manera:

Presión Manométrica = Presión Absoluta - Presión Atmosférica

La presión manométrica es útil cuando se trabaja con sistemas cerrados, como tuberías o tanques, ya que proporciona una medida de la presión interna relativa a la presión externa (Çengel & Boles).

2.2.5.5. Presión absoluta

La presión total o absoluta, es la presión real que ejerce un fluido en un sistema medida desde el cero absoluto (0°K, -273.15 °C), por lo que siempre incluye la presión atmosférica y nunca es negativa. A diferencia de la presión manométrica que se mide en relación con la atmosfera, la presión absoluta refleja el valor real del fluido sin depender de su entorno. Es esencial

en ingeniería y dinámica de fluidos para analizar gases, flujos en conductos, donde la precisión en la presión absoluta garantiza la seguridad y eficiencia (Çengel & Boles)

2.2.5.6. Presión de operación

La presión afecta la formación y extracción de vapores, el equilibrio de fases y la recuperación de la fracción líquida. En reactores rotativos para neumáticos suele operarse a presión cercana a la atmosférica (Suárez, 2018).

Tabla 5

Rangos típicos de variables operativas en pirólisis lenta

Variable	Rango
Temperatura (°C)	300 – 550
Tiempo de residencia (s)	300 – 3600
Tamaño de partícula (mm)	5 – 50
Presión (kPa)	100 – 500

Nota. Adaptado de Lanteigne et al. (2013).

2.2.6. Reactor rotativo de pirólisis

El reactor de pirólisis es el equipo en el que se desarrolla la descomposición térmica del neumático en ausencia de oxígeno o en atmósfera inerte. Para el presente estudio se adopta el reactor rotativo, debido a su capacidad para manejar materiales sólidos heterogéneos como los neumáticos granulados y su distribución térmica favorable durante el proceso (Osayi et al., 2014).

Su principio de funcionamiento se basa en el movimiento giratorio del recipiente, lo que facilita el desplazamiento del material dentro de la cámara de reacción y contribuye a una mejor distribución térmica del proceso. El reactor rotativo admite distintas configuraciones geométricas (horizontal, vertical e inclinada), las cuales pueden variar en función del espacio disponible, la forma de alimentación, el desplazamiento del material y la integración con los demás componentes del sistema (Suárez, 2018).

2.2.7. Conceptos termodinámicos

2.2.7.1. Equilibrio térmico

El equilibrio térmico, indica cuando dos objetos de diferente temperatura están en contacto térmico, durante un determinado tiempo; esta alcanza una temperatura de equilibrio

Para lograr el equilibrio térmico consideramos dos objetos de masas (kg) y calores específicos (J/kg. K).

2.2.7.2. Balance energético

El balance energético es el principio fundamental en la termodinámica, ciencia que estudia la energía, sus transformaciones y la capacidad para poder realizar trabajo. Este principio se base en la primera ley de la termodinámica, también conocida como el principio de la conservación de la energía, la cual establece que la energía no se crea ni tampoco se destruye, solo se transforma de una forma a otra.

Primera ley de la termodinámica

El principio básico donde la energía del sistema es igual a la que entra al sistema menos la energía que sale, esta aplicada para un volumen de control cerrado y se denota por la siguiente ecuación:

$$E_{entrada} = E_{sale} + \Delta E_{sistema}$$

2.2.7.3. Transferencia de calor

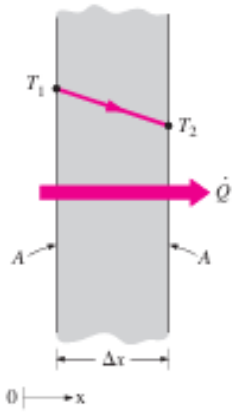
La transferencia de calor es la energía en tránsito y se presenta debido a una diferencia de temperaturas o cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionarios que puede ser un sólido o un fluido. Asimismo, esta tiene principalmente tres mecanismos de transmisión de calor que son: Conducción, convección y radiación. (Yunus A & Afshin, 2011).

2.2.7.4. Conducción

Es la transferencia de energía entre partículas de una sustancia de mayor a menor energía. La conducción es debido al choque y difusión de las moléculas durante un movimiento aleatorio; esta se presenta en solidos líquidos y gases.

Figura 5

Conducción de calor a través de una pared plana



Nota. Adaptado de Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4.ª ed.), por Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, 2011, McGraw-Hill.

$$\dot{Q}_{conduccion} = KA\frac{T_1 - T_2}{\Delta X} = kA\frac{\Delta T}{\Delta X}$$

Donde:

- K: conductividad térmica del material
- A : área de transferencia de calor
- $\frac{\Delta T}{\Delta X}$: gradiente de temperatura

2.2.7.5. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida, liquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y

el movimiento de fluidos. Si se aprecia una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o gas, es seguro que se producirá un movimiento del fluido.

La convección se clasifica por natural por efectos naturales como viento; y también forzados sometidas por aparatos como bombas, con lo que fuerza su movimiento.

2.2.7.6. Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas(fotones), a consecuencia del movimiento de los átomos o moléculas.

2.2.8. Quemador

El quemador es responsable de proporcionar la energía térmica necesaria para iniciar y mantener la reacción de pirólisis. Un quemador adecuado debe ser capaz de alcanzar y controlar las temperaturas altas necesarias para descomponer eficazmente las llantas granuladas en productos útiles como gases, aceites y carbono. Los principios de funcionamiento incluyen la combustión controlada del combustible con aire, el control de la temperatura mediante la regulación del flujo de aire/combustible, y la selección del tipo de combustible (gas natural, propano u otros) según las características del proceso.

La potencia real de entrada al quemador se determina a partir de la potencia útil requerida y la eficiencia del equipo:

$$Q_{entrada} = \frac{Q_{util}}{\eta} \qquad (1)$$

El área requerida de puertos del quemador para una carga segura se obtiene a partir de la potencia de entrada y la carga térmica estable por unidad de área:

$$A_{puertos} = \frac{Q_{entrada}}{Q'_{carga\ estable}} \qquad (2)$$

2.2.9. Tubería de vapor

El sistema de tubería debe tener en cuenta el transporte de vapor a presión y temperaturas adecuadas.

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}}{\pi * C}}$$

Donde:

- $\dot{V}$: m $\dot{*}$ v , caudal volumétrico (m^3/s)
- v: volumen especifico (m^3/kg)
- C: velocidad de flujo (m/s)

2.2.9.1. Numero de Reynolds

Para el desarrollo de cálculo de tubería, se analizará el número de Reynolds según la siguiente formula

$$R_e = \frac{\rho * di * V}{\mu}$$

Donde:

- ρ: densidad (kg/m3)
- V: velocidad del fluido(m/s)
- di : diámetro de tubería (m)
- μ : viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)

En conductos cerrados (tuberías circulares), los limites estándares son

- Flujo laminar (R_e< 2300): fluido se mueve paralelas y ordenadas
- Flujo transición (2300< R_e< 4000): comportamiento intermedio donde el fluido laminar cambia a turbulento

- Flujo turbulento (R_e> 4000): el fluido se mueve de forma caótica en todas direcciones

2.2.10. Aislamiento térmico del reactor

El aislamiento térmico es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción. Es una barrera que impide la entrada y salida indeseada del calor. Por ende, se utilizan en tuberías, calderas, reactores industrias petroquímicas y procesos industriales en general.

El aislamiento térmico del reactor es crucial para mantener la eficiencia térmica, minimizar la pérdida de calor y garantizar la seguridad operacional.

La fibra de vidrio es un material aislante comúnmente utilizado por su baja conductividad térmica, resistencia al fuego y disponibilidad comercial. El espesor del aislamiento se determina a partir de la ley de Fourier para la conducción de calor en estado estacionario:

$$Q = \frac{k*A*(T_{interno} - T_{externo})}{\Delta X} \qquad (3)$$

Donde:

- ΔX : espesor del aislante (m),
- K: la conductividad térmica del material (W/m·K),
- A: área de la superficie del reactor (m²),
- $T_{interno}$; $T_{externo}$: temperaturas interna y externa (°C) y
- Q la tasa de pérdida de calor admisible (W).

2.2.11. Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos o más fluidos (líquidos, vapores, o gases) de diferentes temperaturas. En el contexto de un reactor de

pirólisis, los intercambiadores de calor son fundamentales para recuperar calor de los gases de pirólisis y mejorar la eficiencia térmica del proceso.

Principios Básicos:

- **Transferencia de Calor:** El calor se transfiere del fluido más caliente al más frío a través de una barrera física que impide la mezcla de los fluidos.
- **Métodos de Transferencia:** La transferencia de calor puede ocurrir por convección, conducción o radiación, aunque en intercambiadores de calor suele dominar la convección.

Tipos de Intercambiadores de Calor:

- **Intercambiadores de Tubo y Coraza:** Consisten en un conjunto de tubos dentro de una coraza exterior. Uno de los fluidos fluye por dentro de los tubos y el otro por el espacio entre los tubos y la coraza.

Cálculo del Diseño del Intercambiador de Calor: El diseño de un intercambiador de calor eficaz requiere un análisis detallado de las condiciones operativas y las propiedades de los fluidos. Los parámetros clave incluyen:

- **Área de Transferencia de Calor (A):** Necesaria para alcanzar la tasa de transferencia de calor deseada.
- **Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U):** Depende de las propiedades de los fluidos, la geometría del intercambiador y la naturaleza del flujo.
- **Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (ΔTm):** Utilizada para calcular la capacidad térmica requerida.

La ecuación fundamental para el diseño es:

$$Q = U \times A \times \Delta Tm$$

Donde:

- Q es la tasa de transferencia de calor (W)
- U el coeficiente global de transferencia de calor (W/m²·K)
- A el área de transferencia de calor (m²)
- ΔT_m la diferencia de temperatura media logarítmica entre los dos fluidos (K).

Consideraciones de Diseño:

- Selección del Material: Debe resistir la corrosión, soportar las temperaturas y presiones de operación y ser compatible con los fluidos de proceso.
- Configuración del Flujo: Puede ser flujo paralelo, contracorriente o flujo cruzado, dependiendo de la aplicación específica y de la eficiencia deseada.
- Mantenimiento y Limpieza: Facilidad de acceso para limpieza y mantenimiento para prevenir la reducción de eficacia debido a la acumulación de depósitos.

2.2.12. Separador vertical bifásico

Los separadores verticales bifásicos son equipos utilizados para la separación de mezclas gas–líquido, recomendados especialmente cuando el caudal de gas es bajo y existe una diferencia significativa de densidad entre las fases. Su diseño compacto y su facilidad para el control del nivel de líquido los hacen adecuados para procesos industriales de pequeña y mediana escala (Towler & Sinnott, 2008).

El principio de funcionamiento se basa en la acción de la gravedad: las gotas de líquido suspendidas en la fase gaseosa se desacoplan cuando la velocidad del gas es suficientemente baja, y la fase líquida sedimenta hacia el fondo mientras la fase gaseosa asciende a la salida superior (GPSA, 1998).

En procesos de pirólisis de neumáticos, el separador vertical bifásico cumple una función clave al permitir la separación de los vapores condensables, que posteriormente se transforman en aceites pirolíticos, de la fase gaseosa no condensable (Balseca et al., 2021). Una separación eficiente mejora la recuperación de productos líquidos y contribuye a la estabilidad operativa del sistema, tal como se ha reportado en estudios de diseño y evaluación de reactores de pirólisis (Camargo & Moreno, 2018).

La eficiencia de separación depende de la densidad del gas y del líquido, la viscosidad del líquido, la velocidad superficial del gas y las condiciones de presión y temperatura. Para el diseño se emplea la correlación de Saunders–Brown, ampliamente validada en el GPSA Engineering Data Book, para estimar la velocidad máxima admisible del gas y prevenir el arrastre de gotas (GPSA, 1998):

$$V_t = K_{correguido}\sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (4)$$

Donde,

- g = gravedad, m/s^2
- ρ_l= densidad de la fase líquido, kg/m^3
- ρ_g= densidad de la fase gas, kg/m^3
- $K_{correguido}$: factor de corrección para el diseño de separador bifásicos

2.2.13. Normas para el diseño de recipientes a presión

El reactor de pirólisis es un recipiente sometido a presión y temperatura elevadas, por lo que su diseño se rige por normas internacionales que garantizan la integridad estructural. La principal referencia es el código ASME BPVC, Sección VIII, División 1, "Reglas para la

construcción de recipientes a presion" (ASME, 2013). Las partes más relevantes para el presente diseño son:

- Parte UG: Requerimientos generales aplicables a todos los métodos de construcción y materiales.
- Parte UW: Recipientes a presión fabricados por soldadura.
- Parte UHA: Recipientes construidos con aceros inoxidables de alta aleación, aplicable al reactor en AISI 304 / 316.

2.2.14. Recipientes a presión

Los recipientes a presión son contenedores diseñados para almacenar gases o líquidos a una presión sustancialmente diferente de la presión ambiental. Estos recipientes son esenciales en numerosas aplicaciones industriales, incluyendo sistemas de refrigeración, plantas petroquímicas, y operaciones de pirólisis, entre otros. Los recipientes a presión se clasifican según su uso y su forma, cada uno adaptado a necesidades específicas que aseguran eficacia y seguridad en sus operaciones.

Figura 6

Tipos de recipientes

Nota. Elaboración propia. (Cortés, 2015)

2.2.14.1. Clasificación por Uso

Almacenamiento:

Estos recipientes están diseñados principalmente para almacenar fluidos bajo presión sin procesarlos o modificarlos. Son esenciales en industrias donde los fluidos como gases comprimidos o líquidos criogénicos necesitan ser almacenados de manera segura y eficaz.

Proceso:

Utilizados en procesos industriales que involucran cambios químicos o físicos en los fluidos que contienen. Estos recipientes están diseñados para resistir no solo la presión sino también las reacciones químicas, variaciones de temperatura y otros desafíos operativos.

2.2.14.2. Clasificación por Forma

Cilíndricos:

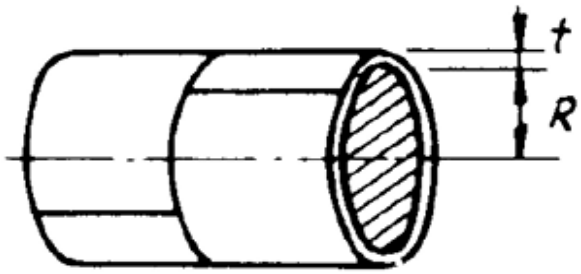
Son los más comunes en la industria debido a su simplicidad de construcción y su eficacia en el manejo de altas presiones. Se dividen en:

- **Horizontales:** Ideales para instalaciones con limitaciones de altura, facilitan el almacenamiento y el acceso para mantenimiento.
- **Verticales:** Aprovechan mejor la altura del espacio, siendo efectivos cuando el área de piso es limitada.

Para el cálculo de recipientes a operación, esta denotado por la siguiente formulas.

Figura 7

Cuerpo cilíndrico con costura longitudinal



Nota. Extraído de Megyesy (1992),

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (5)$$

$$P_{max} = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (6)$$

Si: $t \leq R/2$ o $P < 0.385\ SE$

donde:

- P: Presión de diseño [Pa].
- R: Radio interior de la tapa [m].
- E: Eficiencia de las uniones soldadas.
- S: Esfuerzo del material a la temperatura de diseño [MPa].
- t: Espesor del cuerpo cilíndrico [m].
- Pmax : Presion de trabajo máximo permisible [Pa].

2.2.15. Cabezales y tapas

Para cerrar los extremos de los recipientes cilíndricos sometidos a presión se emplean cabezales que se adecúan a las condiciones de diseño, presión y fabricación.

Los principales tipos son los cabezales planos, los semielípticos 2:1 y los toriesféricos (León Estrada, 2001). Para el presente reactor se selecciona un cabezal semielíptico, recomendado para presiones moderadas por su buena relación entre resistencia y facilidad de fabricación.

2.2.16. Esfuerzos en recipientes cilíndricos a presión

En los recipientes de paredes finas sometidas a presión interna, las fuerzas internas ejercidas en la pared son tangentes a la superficie del recipiente y se analizan como tensiones planas (Beer, Johnston, DeWolf & Mazurek, 2020).

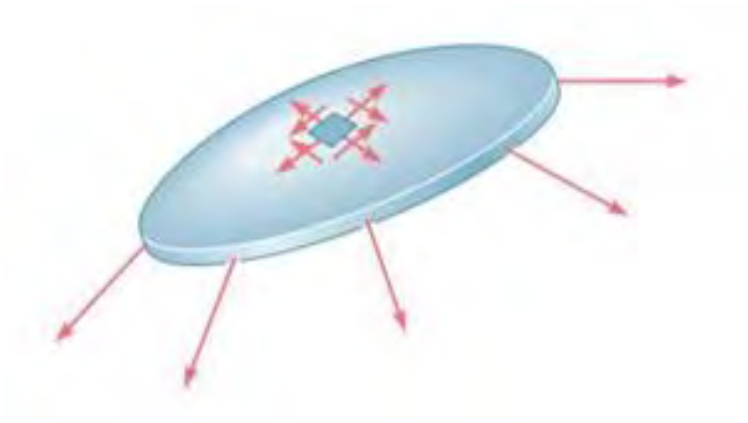
- **Evitar la Deformación Plástica:** Garantiza que el reactor no experimentará deformaciones que comprometan su funcionalidad o seguridad bajo condiciones operativas normales.
- **Prevenir el Fallo por Fatiga:** Esencial para minimizar el riesgo de fallo debido a las cargas cíclicas o fluctuantes que se producen durante los ciclos operativos del reactor.
- **Mantener la Integridad Estructural:** Crucial para asegurar que el reactor mantenga su integridad estructural a lo largo de su vida útil, incluso bajo condiciones operativas extremas o inusuales.

En los recipientes de paredes finas sometidas 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.

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 8

Distribución de esfuerzos en un elemento de pared delgada sometido a presión



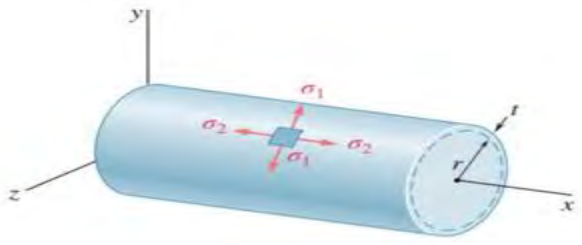
Nota. Extraído de Beer et al (2020).

2.2.16.1. Recipientes cilíndricos a presión

El la figura, se visualiza un recipiente cilíndrico con radio interior y espesor de pared que contiene un fluido a presión.

Figura 9

Distribución de esfuerzos circunferenciales y longitudinales en un recipiente cilíndrico de pared delgada sometido a presión



Nota. Extraído de Beer et al (2020).

La tensión $\sigma 1$ 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 et al., 2020).

$$\sum Fz = 0 \tag{7}$$

$$\sigma 1(2t\Delta x) - p(2r\Delta x) = 0 \tag{8}$$

Al despejar el esfuerzo circunferencial $\sigma 1$ se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{\mathrm{pr}}{\mathrm{t}} \tag{9}$$

- σ1: esfuerzo circunferencial [Pa].
- p: presión [Pa].
- r: radio interior [m].
- t: espesor de la pared [m].

La tensión σ2 se denomina tensión o esfuerzo longitudinal, también se realiza el análisis del diagrama de cuerpo libre y se plantea el equilibrio (Beer et al., 2020)

$$\sum Fx = 0 \tag{10}$$

$$\sigma 2(2\pi rt) - p(\pi r^2) = 0 \tag{11}$$

Al despejar el esfuerzo longitudinal $\sigma 2$ se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_2 = \frac{\mathrm{Pr}}{2\mathrm{t}} \tag{12}$$

- σ2: esfuerzo circunferencial [Pa].
- p: presión [Pa].
- r: radio interior [m].
- t: espesor de la pared [m].

De estas expresiones se deduce que $\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_2$, por lo que la tensión circunferencial controla el diseño del espesor cilíndrico.

2.2.17. Eficiencia de las uniones soldadas

La eficiencia de soldadura (E) representa "el grado de confiabilidad que se puede tener de las soldaduras" (León Estrada, 2001, p. 12) y es un factor crítico para el cálculo del espesor de paredes y cabezales. El valor de E se asigna según el tipo de unión y el grado de inspección radiográfica realizada.

Tabla 6

Valores típicos de eficiencia de soldadura E según ASME Sección VIII

Tipo de unión soldada	Inspección	E
Soldadura a tope, doble pasada o equivalente	Radiografía total	1,00
Soldadura a tope, doble pasada o equivalente	Radiografía por puntos	0,85
Soldadura a tope, doble pasada o equivalente	Sin radiografía	0,70
Soldadura a tope simple, con tira de respaldo	Radiografía total	0,90
Soldadura a tope simple, con tira de respaldo	Sin radiografía	0,65

Nota. Adaptado de ASME BPVC, Sección VIII, División 1 (ASME, 2013) y León Estrada (2001).

El espesor mínimo requerido del cuerpo cilíndrico se calcula con la fórmula del Código ASME:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \tag{13}$$

Donde

- t es el espesor (mm)
- P la presión de diseño (MPa)
- R el radio interno (mm)
- S el esfuerzo admisible del material a la temperatura de diseño (MPa)
- E la eficiencia de la unión soldada.

2.2.18. Factor de seguridad

El Código ASME establece valores específicos para el factor de seguridad según la aplicación y las condiciones de operación. Para recipientes a presión que contienen vapores o gases

inflamables, el factor de seguridad se aplica al esfuerzo admisible del material en función de su límite de fluencia y de la temperatura de servicio (ASME, 2013).

Tabla 7

Factor de Seguridad según el Código ASME

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

Nota. Extraído de Comité técnico de los gases licuados del petróleo (2014).

Importancia del Factor de Seguridad

La aplicación adecuada del factor de seguridad en el diseño de un reactor rotativo vertical es crucial para:

- **Prevenir Fallos Mecánicos:** Asegura que el diseño pueda soportar variaciones en la presión, golpes de ariete, o cambios bruscos de temperatura sin sufrir daños.
- **Aumentar la Durabilidad:** Ayuda a garantizar que el reactor pueda operar de manera segura durante su vida útil proyectada, evitando interrupciones por mantenimiento no programado o fallos.
- **Cumplir con Normativas de Seguridad:** Cumplimiento de las normas de seguridad es fundamental no solo para la operación segura sino también para la certificación y la aceptación regulatoria del reactor.

El factor de seguridad se establece mediante la ecuación:

$$FS = \frac{S}{\sigma_{máx}} \tag{14}$$

Donde:

- FS= Factor de seguridad
- S = Esfuerzo máximo permisible del material del cabezal a tensión y a la temperatura de diseño [MPa]
- $\sigma_{máx}$=Esfuerzo máximo calculado [MPa].

2.2.19. Diseño de pernos

Los pernos cumplen la función de unir la tapa con el cuerpo del reactor garantizando un sellado adecuado bajo presión. El área de esfuerzo a la tensión se define como:

$$A_T = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_p + d_r}{2}\right)^2 \tag{15}$$

Donde

- d_p : diámetro de paso
- d_r : diámetro menor de la rosca.

El esfuerzo de tensión en el perno se calcula como:

$$\sigma_t = \frac{F_i}{A_T} \tag{16}$$

Para evitar la separación de las uniones, los pernos deben tener una precarga adecuada. La precarga (F_i) se selecciona típicamente como un porcentaje de la resistencia de prueba del perno, considerando el factor de rigidez de la junta y las cargas externas aplicadas (Shigley et al., 2012).

2.2.20. Accionamiento y transmisión

El diseño del sistema de accionamiento y transmisión es crucial para garantizar la operación eficiente y segura del reactor rotativo. Este sistema transmite la potencia desde la fuente motriz (motor eléctrico) hasta el mecanismo rotativo del reactor, permitiendo el movimiento controlado y constante requerido por el proceso. La selección de componentes considera el tipo de carga, la velocidad requerida, la eficiencia energética y la confiabilidad del sistema.

Para el presente diseño se selecciona una transmisión por correas y poleas, debido a su facilidad de ajuste de la relación de transmisión, su flexibilidad de alineación, su menor costo y su capacidad de protección contra sobrecargas. El torque necesario para el giro del reactor se determina a partir del momento de inercia del sistema y de la aceleración angular requerida:

$$T = I \cdot \alpha \tag{17}$$

La potencia necesaria se calcula como:

$$P = T \cdot \omega \tag{18}$$

Donde:

- T es el torque (N·m),
- I el momento de inercia (kg·m²),
- α la aceleración angular (rad/s²),
- ω la velocidad angular (rad/s) ,
- P la potencia (W).

2.2.21. Ejes de transmisión

La norma ANSI/ASME B106.1M (1985), presenta el procedimiento de diseño sistemático para determinar el diámetro apropiado de ejes de acero rotativo, ya sen solidos o huecos, estas

cuando se someten a una combinación de flexión cíclica y carga torsional constante, con el objetivo de garantizar la vida útil del elemento

2.2.22. Rodamiento

Los cojinetes son componentes cruciales que desempeñan el rol de transmitir las cargas entre los diferentes elementos de máquina, a la vez que sostiene y guían partes rotativas, como ejes, ruedas. Los cojinetes alcanzan velocidad de rotación sin bajar su rendimiento. El correcto diseño facilita el correcto funcionamiento, reducción de ruido, evite vibraciones no deseadas, disminuir la generación de calor, estas a su vez ayudan a prolongar la vida útil de la máquina.

Los rodamientos se clasifican: según la carga que soportan: radiales, axiales y combinadas.

CAPÍTULO III: DISEÑO CONCEPTUAL

3.1. Estado de la tecnología

3.1.1. Estado de la tecnología del reactor

Para el diseño del reactor de pirólisis y sus sistemas auxiliares, se consideraron las condiciones ambientales propias de la región Cusco, debido a su influencia directa en el comportamiento térmico, la combustión y la transferencia de calor del sistema.

El diseño de reactor de pirólisis empleara las directrices de VDI 2221 y VDI 2225.

3.1.2. Reactor de pirólisis

En el análisis preliminar del diseño del reactor de pirólisis se consideraron distintas configuraciones tecnológicas con la finalidad de identificar alternativas funcionalmente viables para el procesamiento de neumáticos usados granulados. La evaluación se orientó a comparar el comportamiento general de cada alternativa en términos de transferencia de calor, desplazamiento del material, requerimiento de espacio y complejidad constructiva. Las principales alternativas analizadas fueron el reactor rotativo horizontal, el reactor rotativo vertical y el reactor rotativo inclinado. Estas configuraciones se consideraron adecuadas para ser integradas posteriormente en los conceptos de solución del sistema de pirólisis.

Tabla 8

Alternativas preliminares de diseño del reactor de pirólisis

Tipo de reactor	Ventajas	Desventajas	Adecuado para neumáticos granulados
Reactor rotativo horizontal	Favorece el desplazamiento del material y presenta una distribución térmica relativamente uniforme.	Requiere mayor espacio de instalación y una estructura de soporte más extensa.	Sí

Reactor rotativo vertical	Presenta una configuración compacta y mejor aprovechamiento del espacio disponible.	Puede requerir mayor precisión en el sellado y en la integración de sus componentes.	Sí
Reactor rotativo inclinado	Facilita el avance progresivo del material y combina características del reactor horizontal y vertical.	Exige mayor cuidado en el diseño del soporte, alineamiento y estabilidad mecánica.	Sí

Nota. Elaboración propia. (Colet, 2015)

3.1.3. Accionamiento y Transmisión

Para el sistema de accionamiento y transmisión se consideraron diferentes mecanismos capaces de proporcionar el movimiento requerido al reactor durante el proceso de pirólisis. La evaluación preliminar se orientó a comparar la eficiencia de transmisión, facilidad de mantenimiento, simplicidad de instalación y costo relativo de cada alternativa.

Las opciones consideradas fueron la transmisión por engranajes, el sistema de motor con faja y polea y el motorreductor. Estas alternativas permitieron plantear configuraciones viables para los conceptos de solución propuestos.

Tabla 9

Alternativas preliminares de accionamiento y transmisión

Opción	Ventajas	Desventajas
Motor con faja y polea	Bajo costo, facilidad de mantenimiento y posibilidad de ajuste de velocidad.	Mayor desgaste de la faja y necesidad de mantenimiento periódico.
Motorreductor, engranajes	Transmisión compacta, menor deslizamiento y suministro directo de torque.	Mayor costo inicial y menor flexibilidad de ajuste frente a otras alternativas.

Nota. Elaboración propia. (Colet, 2015)

3.1.4. Quemador

Para el sistema de calentamiento del reactor se evaluaron diferentes tipos de quemadores, considerando su capacidad de generación de calor, facilidad de control de temperatura,

disponibilidad y costo operativo. La comparación preliminar permitió identificar las alternativas más viables para su integración en el sistema de pirólisis.

Las opciones analizadas fueron, el quemador de gas y el quemador de Bioaceite. Cada una de estas alternativas presentó diferentes características técnicas y económicas, las cuales fueron posteriormente consideradas en la formulación de los conceptos de solución.

Tabla 10

Alternativas preliminares de diseño del quemador

Opción	Ventajas	Desventajas
Quemador de gas	Presenta menor costo operativo y genera calor directo de manera eficiente.	Requiere instalación específica y medidas de seguridad para el manejo del combustible.
Quemador Bioaceite	Ofrece buen rendimiento en aplicaciones de alta temperatura.	Mayor complejidad en el suministro y almacenamiento del combustible, además de mayor impacto ambiental.

Nota. Elaboración propia. (Colet, 2015)

3.1.5. Condensador

En el diseño del sistema de recuperación de productos condensables se analizaron distintas alternativas de condensador, con el objetivo de comparar su comportamiento en términos de transferencia de calor, facilidad de mantenimiento, espacio requerido y costo de implementación.

Las alternativas preliminares consideradas fueron el condensador de placas, el condensador por tubos y el condensador de serpentín. Estas opciones permitieron evaluar diferentes configuraciones de intercambio térmico aplicables al sistema de pirólisis.

Tabla 11

Alternativas preliminares de diseño del condensador

Opción	Ventajas	Desventajas

Condensador de placas	Diseño compacto y alta eficiencia de transferencia de calor.	Mayor dificultad de limpieza y mayor susceptibilidad a obstrucciones.
Condensador por tubos	Facilidad de mantenimiento y mejor comportamiento frente a fluidos con partículas.	Mayor tamaño físico y menor compacidad respecto al de placas.
Condensador de serpentín	Simplicidad de fabricación y menor complejidad constructiva.	Eficiencia moderada y posible requerimiento de mayor espacio.

Nota. Elaboración propia. (Colet, 2015)

3.1.6. Separador de Gas-Líquido y Almacenamiento

Para el sistema de separación de productos se evaluaron distintas alternativas con la finalidad de identificar configuraciones adecuadas para la separación de la fase líquida y gaseosa generadas durante el proceso de pirólisis. La comparación se realizó considerando la simplicidad operativa, eficiencia de separación, facilidad de mantenimiento y costo relativo. Las opciones analizadas fueron el separador centrífugo y el separador por gravedad. Estas alternativas constituyeron la base para la estructuración de los conceptos de solución evaluados en los apartados siguientes.

Tabla 12

Alternativas preliminares de diseño del sistema de separación gas-líquido

Opción	Ventajas	Desventajas
Separador centrífugo	Alta eficiencia de separación para mezclas gas-líquido.	Mayor complejidad operativa y mayor costo de implementación.
Separador por gravedad	Simplicidad operativa, bajo costo y facilidad de mantenimiento.	Menor eficiencia en mezclas con diferencias pequeñas de densidad.

Nota. Elaboración propia. (Colet, 2015)

Teniendo el conocimiento la tecnología del reactor de pirólisis, para el desarrollo de la presente investigación se utilizó la metodología VDI 2221, titulada “Métodos para el desarrollo y diseño de sistemas técnicos y productos” (Métodos de diseño en ingeniería mecánica Barriga, 2013).

Los métodos de diseño e ingeniería mecánica tienen 4 partes básicas:

- Comprensión de la solicitud
- Concepción de la solución
- Elaboración del proyecto
- Elaboración de detalles

3.2. Comprensión de la solicitud

La comprensión de la solicitud constituye una etapa fundamental dentro del proceso de diseño, debido a que permite identificar, ordenar y delimitar las necesidades técnicas que debe cumplir el sistema propuesto.

En esta fase se analiza el problema de diseño, se recopila información sobre el estado actual de la tecnología y se establecen los requisitos funcionales, constructivos, operativos y de seguridad del reactor de pirólisis.

En el presente estudio, la solicitud se orienta al diseño de un reactor rotativo de pirólisis para el procesamiento de neumáticos usados granulados, con una capacidad de 20 kg/h, considerando las condiciones técnicas de operación, disponibilidad de materiales, facilidad de fabricación, seguridad del proceso y posibilidad de implementación en la región del Cusco.

3.2.1. Lista de exigencias

Habiendo analizado el problema de diseño y el estado de la tecnología relacionada con la pirólisis de neumáticos usados, se establece la lista de exigencias del sistema. Esta lista permite diferenciar los requerimientos obligatorios del diseño y los requerimientos deseables, empleando la designación E para exigencia y D para deseo, conforme al enfoque metodológico de diseño técnico de la VDI 2221 (Barriga, 2013).

Tabla 13

Lista de exigencias del reactor de pirólisis rotativo

LISTA DE EXIGENCIAS			
UNSAAC	**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA**		REV.: E.C.A. ELAB.: L.A.H.T.
E P DE INGENIERÍA MECÁNICA	"DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS A PARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO"		
Proyecto:	REACTOR DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS 20 KG/H		
Cliente:	**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA – UNSAAC**		
Prioridad	**Deseo o Exigencia**	**Descripción**	**Responsable**
FUNCION PRINCIPAL DEL EQUIPO			
1	E	El reactor rotativo de pirolisis debe descomponer térmicamente, neumáticos usados granulados para la obtención de productos hidrocarburos	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
2	E	El reactor debe garantizar una capacidad de procesamiento de 20kg/h por lote de operación	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
3	E	El reactor rotativo de pirolisis, debe asegurar una agitación rotación, para asegurar la descomposición homogénea y uniformizar la transferencia de calor.	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
MATERIA PRIMA Y ALIMENTACION			
4	E	La materia prima a procesar debe ser gránulos de neumáticos usados con tamaño entre 1 mm a 5 mm	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
5	E	El sistema de alimentación debe contar con una capacidad apropiada al lote de operación	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
PARAMETROS TERMICOS			
6	E	El reactor de pirolisis debe operar de manera estable entre una temperatura de 400-600°C, para garantizar la descomposición térmica completa de los gránulos de neumáticos usados	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
7	E	El calentamiento del tambor rotativo se realizará mediante un quemador e GNV/GLP con control automático de llama	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
8	E	La cámara exterior del reactor debe incluir un aislamiento térmico eficiente, para mantener la temperatura externa < 50°C	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
CONDESANCION Y SEPARACION DE PRODUCTOS			
9	E	El traslado de gases pirolíticos del reactor hacia el enfriamiento de vapores debe ser mediante una tubería capaz de soportar la temperatura y presión	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
10	E	El enfriamiento de gases pirolíticos, debe contar con un sistema de flujo cruzado (gases/ refrigerante), la cual el líquido refrigerante debe operar mediante un circuito cerrado, impulsada por una bomba de impulsión	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
11	E	Se debe incorporar un sistema de recipiente de separador bifásico por gravedad, que separe eficientemente la fase liquida (aceites pirolíticos) y de la fase gaseosa (gas no condensable syngas)	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
GEOMETRIA Y ESTRUCTURA			

12	E	El reactor debe contar con dimensiones adecuadas que garanticen sufiente al operador y faciliten su operabilidad de 20 kg/h por lote	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
13	E	Los sistemas intervinientes del reactor, deberán ser lo más compacta y funcionales, compatibles a una instalación semiindustrial en la región Cusco	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
CINEMATICA Y ACCIONAMIENTO			
14	E	El sistema de rotación del tambor deberá accionarse mediante un motorreductor eléctrico con transmisión por faja, poleas	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
15	D	El sistema tendrá un variados de frecuencia que permitirá tener una rotación regulable entre 1 a 10 RPM, según tiempo de residencia requerida	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
RESISTENCIA MECANICAS			
16	E	El reactor de pirolisis debe fabricarse con material acero inoxidable, que soporte las cargas y capaz de resistir la corrosión química a altas temperaturas	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
17	E	La estructura soporte, deberá resistir la carga estática del reactor	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
18	E	Los materiales los sistemas intervinientes deberán ser de acero inoxidable, para resistir la presión, temperatura de operación capaz de asegurar su confiabilidad y seguridad en operación	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
SEÑALES, CONTROL Y SEGURIDAD			
19	E	El sistema contara con manómetros de presión, temperatura y sensores de flujo de refrigerante; asimismo contara con válvulas de seguridad	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
MONTAJE, MANTENIMIENTO Y ERGONOMIA			
20	E	El reactor deberá ser de accesible montaje e instalación, permitiendo el desmontaje para un mantenimiento preventivo y correctivos	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
21	E	El diseño del reactor deberá permitir al operador cargar, controlar y descargar el sistema con comodidad, minimizando el esfuerzo físico requerido.	Bach. Hinojosa Ttito, L. A.
FABRICACION Y RECICLAJE			
22	E	El reactor y sistemas intervinientes deberán de fabricarse en talleres de la región, cumpliendo con estándares de seguridad y calidad	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.
23	E	Cumplida la vida útil del reactor y sistemas, los componentes metálicos deberán ser reciclados o reutilizados en la medida posible	Bach. Hinojosa Ttito, L.A.

Nota. Adaptado de la norma VDI 2221 “Desarrollo del diseño técnico”. E = Exigencia; D = Deseo.

3.3. Estructura de funciones

La estructura de funciones permite representar el funcionamiento global del reactor de pirólisis mediante la identificación de las entradas, transformaciones y salidas del sistema. Esta etapa permite descomponer la función principal del equipo en funciones parciales, facilitando el desarrollo conceptual y la posterior selección de componentes.

3.3.1. Abstracción: Caja negra

La caja negra representa de manera general la función principal del sistema, sin detallar todavía los mecanismos internos mediante los cuales se realiza la transformación. Para el reactor de pirólisis rotativo, la función global consiste en transformar neumáticos usados granulados en productos valorizables mediante descomposición térmica en ausencia de oxígeno.

Tabla 14

Caja negra del reactor de pirólisis rotativo

CAJA NEGRA		
UNSAAC	**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA**	PAG: 1/1 FECHA: 07/06/2026 REV.: E.C.A. ELAB.: L.A.H.T.
E. P. INGENIERÍA MECÁNICA	"DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS A PARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO"	
PROYECTO:	REACTOR DE PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS 20 KG/H	
CLIENTE:	**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA – UNSAAC**	
ENTRADAS	**PROCESO TÉCNICO**	**SALIDAS**
MATERIA: Neumático usado granulado (1–5 mm, 20 kg/h) **ENERGÍA: Energía térmica del quemador a gas** Energía eléctrica del motor de accionamiento **SEÑALES: Señal de inicio de operación** Parámetros: temperatura (400–600 °C), velocidad de rotación del tambor	**REACTOR ROTATIVO DE PIRÓLISIS** Descomposición térmica del neumático granulado en atmósfera inerte a alta temperatura	**MATERIA:** Aceite pirolítico (fracción líquida) Gas no condensable (fracción gaseosa) Char – residuo sólido (fracción sólida) **ENERGÍA: Calor residual (pérdidas al ambiente)** **SEÑALES: Señal de fin de ciclo** Indicadores de temperatura, presión y flujo de gas

Nota. Elaboración propia con base en la norma VDI 2221 "Desarrollo del diseño técnico".

3.3.2. Funciones parciales

La función principal del sistema consiste en transformar neumáticos usados granulados en productos derivados de la pirólisis. Para lograr dicha transformación, el sistema se divide en

funciones parciales que describen las operaciones necesarias desde la alimentación del material hasta la recuperación de los productos finales.

Las funciones parciales identificadas son las siguientes:

1. Carga y dosificación del granulado: introducir el neumático usado granulado al interior del reactor de manera controlada, considerando la capacidad de diseño de 20 kg/h.
2. Soporte y configuración del reactor: el sistema de reactor para el procesamiento de material granulado
3. Sellado e inertización del reactor: cerrar herméticamente el sistema y garantizar una atmósfera libre de oxígeno para evitar combustión durante el proceso.
4. Rotación del tambor: generar el movimiento del reactor mediante el sistema de accionamiento, favoreciendo la mezcla del material y la distribución uniforme del calor.
5. Calentamiento del material: suministrar energía térmica mediante el quemador a gas hasta alcanzar el rango de temperatura requerido para la pirólisis.
6. Conducción de vapores: transportar los vapores pirolíticos generados desde el reactor hacia el sistema de condensación.
7. Condensación de vapores: enfriar los vapores pirolíticos para obtener aceite pirolítico como fracción líquida recuperable.
8. Separación gas-líquido: separar la fracción líquida condensada del gas no condensable mediante un separador bifásico.

9. Almacenamiento de productos: almacenar de manera diferenciada el aceite pirolítico, el gas no condensable y el char para su posterior aprovechamiento o disposición.

3.3.3. Estructura de funciones

La estructura de funciones integra las funciones parciales en una secuencia lógica de operación, permitiendo identificar el subsistema responsable y el tipo de flujo transformado en cada etapa. Esta organización facilita el desarrollo del concepto de solución y la posterior selección de materiales, equipos y componentes del sistema.

Tabla 15

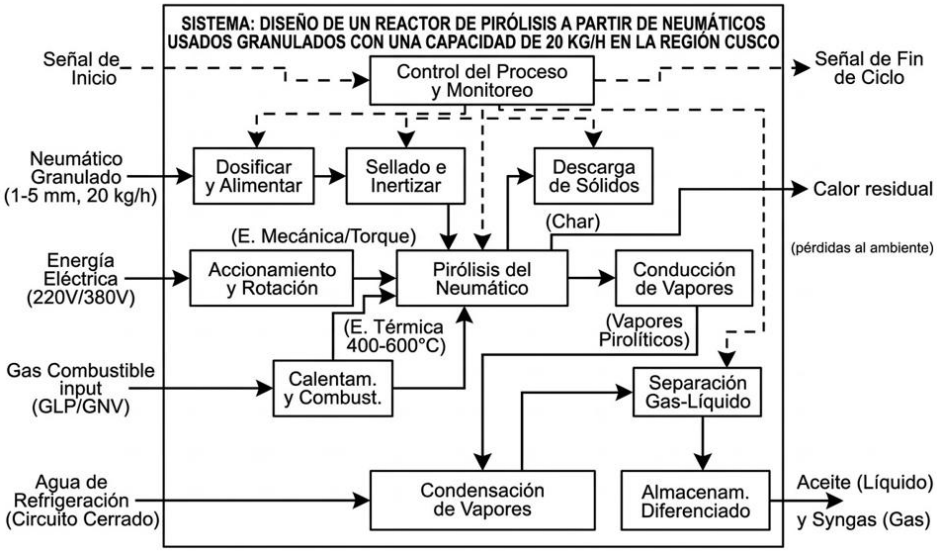
Estructura de funciones del reactor de pirólisis rotativo

N.°	Función parcial	Subsistema responsable	Flujo transformado
1	Carga y dosificación del granulado	Sistema de alimentación / boca de carga	Materia: neumático usado granulado
2	Soporte y configuración del reactor	Configuración del reactor y descomposición térmica de gránulos de neumáticos usados	Sistema: proceso termoquímico
3	Sellado e inertización del reactor	Tapa, sello mecánico y sistema de purga	Señal de control / atmósfera libre de oxígeno
4	Rotación del tambor rotatorio	Motor eléctrico, faja, poleas, eje y rodamientos	Energía eléctrica → energía mecánica
5	Suministro térmico, quemador	Quemador a gas y cámara de calentamiento	Energía térmica
6	Conducción de vapores	Tuberías y conexiones del sistema	Materia: vapores pirolíticos
7	Condensación de vapores	Condensador tubular	Vapores pirolíticos → aceite pirolítico
8	Separación gas-líquido	Separador vertical bifásico	Aceite pirolítico + gas no condensable
9	Almacenamiento de productos	Tanques o recipientes de almacenamiento	Aceite, gas y char separados

Nota. Elaboración propia con base en la norma VDI 2221 “Desarrollo del diseño técnico”.

Figura 10

Estructura de funciones del reactor de pirolisis rotativo



Nota. Elaboración propia con base en la norma VDI 2221 “Desarrollo del diseño técnico”.

3.4. Matriz morfológica de las alternativas de diseño del sistema de pirólisis

Tabla 16

Matriz morfológica

Funciones Parciales	Alternativas de Diseño		
Carga y Dosificación del granulado	Dosificación por tolva	Dosificación Manual	
Soporte y Configuración del reactor	Reactor rotativo horizontal	Reactor rotativo vertical	Reactor rotativo inclinado

Sellado	Sellado de grafito puro expandido	Sellado a altas temperaturas durlon	
Accionamiento y Transmisión	Motor con faja y polea	Motorreductor, engranajes	
Suministro Térmico (Quemador)	Quemador de bioaceites	Quemador de gas	
Conducción y Transporte de Vapores		Tuberías de acero inoxidable AISI 304 Y AISI 310S	
Condensación de Vapores	Condensador de placas	Condensador por tubos	Condensador de serpentín
Separación de Gas-Liquido	Separador Bifásico Vertical Centrifugo	Separador Bifásico Vertical por Gravedad	
Descarga y Almacenamiento		Recipiente de almacenamiento	

Nota. Elaboración propia con base en la metodología VDI 2221. (Suárez, 2018)

3.5. Concepto de solución

A partir de la matriz morfológica se formularon tres conceptos de solución, los cuales representaron combinaciones técnicamente viables de los principales subsistemas del sistema de pirólisis. La finalidad de estos conceptos fue comparar distintas configuraciones del equipo, considerando no solo el desempeño técnico esperado, sino también aspectos vinculados con la operación, el mantenimiento, la facilidad de fabricación y la conveniencia económica.

Cada concepto se estructuró como una propuesta integral del sistema, incluyendo el tipo de reactor, el sistema de accionamiento y transmisión, el sistema de calentamiento, el sistema de condensación y el sistema de separación de productos. Posteriormente, estos conceptos fueron sometidos a una evaluación técnica y económica con el propósito de seleccionar la alternativa más adecuada para el desarrollo detallado del diseño.

3.5.1. Concepto de solución 1-azul

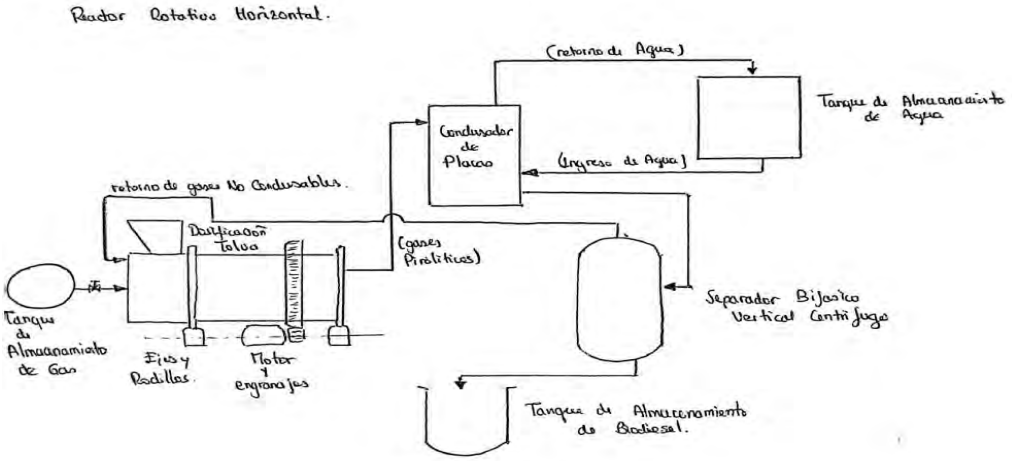
El concepto de solución 1 estuvo conformado por un reactor rotativo horizontal, sistema de dosificación por tolva, sellado por grafito puro expandido, accionado por un sistema mediante motorreductor y engranajes, un quemador de bioaceite como sistema de calentamiento, una conducción de gases pirolíticos por tubería, un sistema de enfriamiento por condensador por placas, un separador bifásico vertical centrifugo para la separación de la fase liquida y gaseosa y un tanque de almacenamiento de productos aceites pirolíticos.

Esta alternativa se planteó como una configuración funcionalmente robusta, capaz de proporcionar una adecuada mezcla del material y una distribución térmica relativamente uniforme dentro del reactor.

Desde el punto de vista operativo, esta alternativa presentó como ventaja principal la disposición horizontal del reactor, la cual favorece el desplazamiento del material y el contacto térmico durante el proceso. Sin embargo, requiere un mayor espacio de instalación y una estructura de soporte más extensa, lo que incrementa su complejidad constructiva en comparación con otras configuraciones.

Figura 11

Concepto de solución 1 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo horizontal



Nota. Elaboración propia.

3.5.2. Concepto de solución 2-amarillo

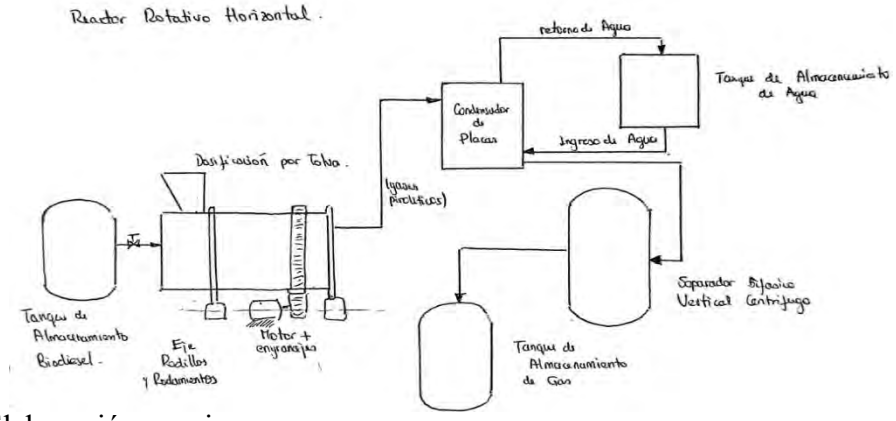
El concepto de solución 2 estuvo conformado por un reactor rotativo horizontal, sistema de dosificación por tolva, sellado por grafito puro expandido, accionado por un sistema mediante motorreductor y engranajes, un quemador de gas como sistema de calentamiento, una conducción de gases pirolíticos por tubería, un sistema de enfriamiento por condensador por placas, un separador bifásico vertical centrifugo para la separación de la fase liquida y gaseosa y un tanque de almacenamiento de productos aceites pirolíticos.

Esta alternativa se planteó como una configuración funcionalmente robusta, capaz de proporcionar una adecuada mezcla del material y una distribución térmica relativamente uniforme dentro del reactor.

Desde el punto de vista operativo, esta alternativa presentó como ventaja principal la disposición horizontal del reactor, la cual favorece el desplazamiento del material y el contacto térmico durante el proceso. Sin embargo, requiere un mayor espacio de instalación y una estructura de soporte más extensa, lo que incrementa su complejidad constructiva en comparación con otras configuraciones.

Figura 12

Concepto de solución 2 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo vertical



Nota. Elaboración propia.

3.5.3. Concepto de solución 3-rojo

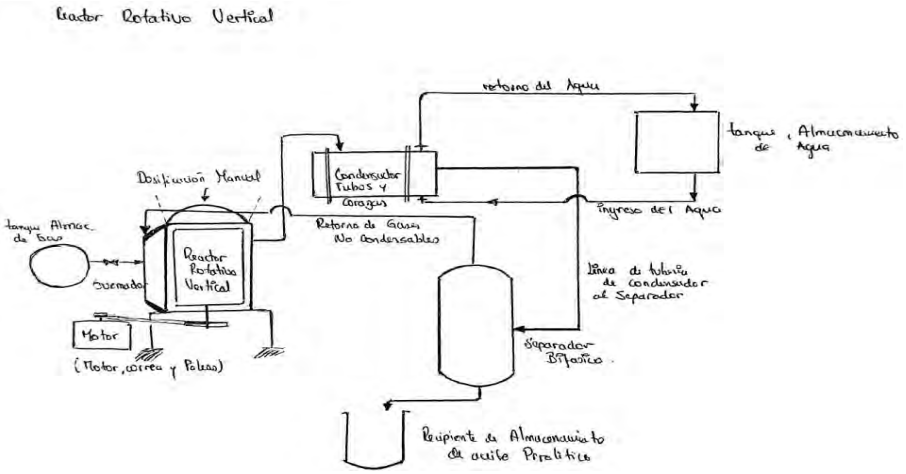
El concepto de solución 3 está conformado por un reactor rotativo vertical, sistema de dosificación manual y directa al tambor rotativo, sellado por grafito puro expandido, accionado por un motor, faja y poleas, un quemador de gas como sistema de calentamiento, una conducción de gases pirolíticos por tubería, un sistema de enfriamiento por condensador de tubo y corazas, un separador bifásico vertical por gravedad para la separación de la fase liquida y gaseosa y un tanque de almacenamiento de productos de aceites pirolíticos. Esta alternativa se orientó a una

configuración más compacta del sistema, con un mejor aprovechamiento del espacio y una integración más directa entre el reactor y los subsistemas auxiliares.

La disposición vertical del reactor permitió reducir el área ocupada por el sistema y facilitó la integración estructural del conjunto. Asimismo, esta configuración resultó adecuada para el procesamiento de neumáticos usados granulados, ya que combinó una transferencia térmica eficiente con una operación técnicamente viable para la capacidad de diseño de 20 kg/h. Debido a ello, esta alternativa se consideró como una de las opciones más favorables del estudio.

Figura 13

Concepto de solución 3 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo vertical



Nota. Elaboración propia.

3.5.4. Concepto de solución 4-verde

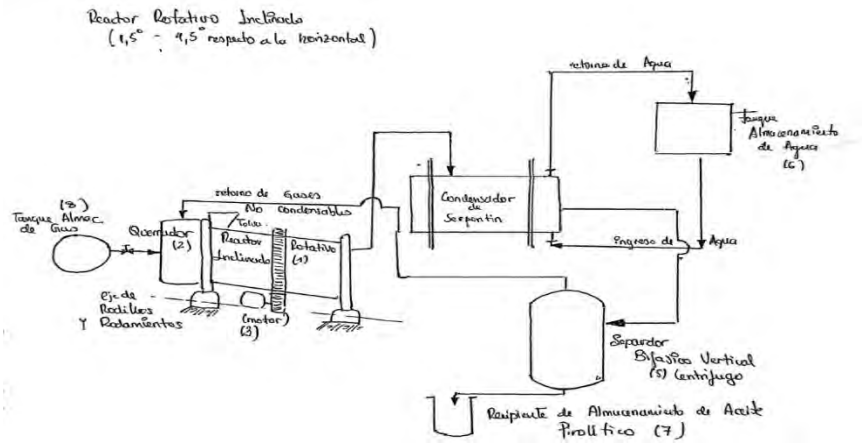
El concepto de solución 4 está conformado por un reactor rotativo inclinado, dispuesto con una inclinación aproximada entre 1.5° y 4.5° respecto a la horizontal, sistema de dosificación por tolva, sellado a altas temperaturas durlon, accionado por un motorreductor y engranajes, un quemador de gas como sistema de calentamiento, una conducción de gases pirolíticos por tubería, un sistema de enfriamiento por condensador por serpentín, un separador bifásico vertical

centrifugo para la separación de la fase liquida y gaseosa y un tanque de almacenamiento de productos de aceites pirolíticos. Desde el punto de vista funcional, esta configuración combinó características del reactor horizontal y del vertical, buscando un equilibrio entre transferencia de calor, movilidad del material y disposición espacial del sistema.

No obstante, su implementación implicó una mayor exigencia en el diseño del soporte, alineamiento y estabilidad mecánica del conjunto, por lo que su evaluación se justificó como una alternativa intermedia frente a las demás configuraciones propuestas.

Figura 14

Concepto de solución 4 del sistema de pirólisis opción reactor rotativo inclinado



Nota. Elaboración propia.

3.6. Valoración técnica y económica de los conceptos de solución

Con la finalidad de sustentar de manera objetiva la selección del concepto de solución más adecuado para el sistema de pirólisis, se realizó una valoración técnica y económica de las tres propuestas formuladas a partir de la matriz morfológica. Esta evaluación se desarrolló tomando como referencia los lineamientos metodológicos de la VDI 2221 para la generación de conceptos de solución y de la VDI 2225 para la comparación técnico-económica de alternativas.

La valoración permitió complementar el análisis cualitativo previamente desarrollado, incorporando un procedimiento comparativo basado en criterios técnicos y económicos. Para ello, se consideraron aspectos relacionados con la eficiencia operativa, facilidad de operación y control, facilidad de mantenimiento, seguridad operativa, fabricación e instalación, costo de implementación y costo de operación. Cada criterio fue ponderado de acuerdo con su nivel de importancia dentro del sistema de pirólisis propuesto.

Posteriormente, cada concepto de solución fue calificado en una escala de 1 a 5, donde 1 representó la condición menos favorable y 4 la más favorable.

A partir de esta calificación se obtuvo el puntaje total de cada concepto, así como los valores ponderados normalizados correspondientes al desempeño técnico (Xi) y económico (Yi), los cuales sirvieron de base para el análisis técnico-económico final.

Tabla 17

Valoración técnica de los conceptos de solución

DISEÑO MECANICO – EVALUACION DEL PROYECTO
Valor Técnico (Xi)

PROYECTO: DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS A PARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO

p: Puntaje de 0 a 4 (valores según VDI 2225) | 0 = No aceptable, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy Bien (Ideal)

g: Es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de Evaluación

Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos

Nº	Criterios de Valoración	g	Solución 1 S1		Solución 2 S2		Solución 3 S3		Solución 4 S4		Solución Ideal	
			p	g×p	p	g×p	p	g×p	p	g×p	p	g×p
1	Función principal	0.25	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	4	1.00
2	Geometría	0.15	3	0.45	3	0.45	3	0.45	2	0.30	4	0.60
3	Energía	0.15	2	0.30	3	0.45	3	0.45	3	0.45	4	0.60
4	Seguridad	0.08	2	0.16	2	0.16	2	0.16	2	0.16	4	0.32
5	Estabilidad	0.10	2	0.20	2	0.20	3	0.30	3	0.30	4	0.40
6	Ergonomía	0.04	2	0.08	2	0.08	3	0.12	3	0.12	4	0.16
7	Montaje	0.04	2	0.08	2	0.08	3	0.12	3	0.12	4	0.16

8	Facilidad de manejo	0.06	3	0.18	3	0.18	3	0.18	3	0.18	4	0.24
9	Transportabilidad	0.03	2	0.06	2	0.06	3	0.09	3	0.09	4	0.12
10	Fabricación	0.07	2	0.14	2	0.14	3	0.21	3	0.21	4	0.28
11	Mantenimiento	0.03	2	0.06	2	0.06	3	0.09	3	0.09	4	0.12
Puntaje máximo Σg, Σp, Σp×g		**1.00**	**25**	**2.46**	**26**	**2.61**	**32**	**2.92**	**31**	**2.77**	**44**	**4.00**
Valor técnico (xi) (X_i)			**0.62**		**0.65**		**0.73**		**0.69**		**1.00**	

Nota. Criterios, ponderaciones y calificaciones utilizados para la valoración técnica de los conceptos de solución del sistema de pirólisis.

Tabla 18

Valoración económica de los conceptos de solución

DISEÑO MECANICO – EVALUACION DEL PROYECTO
Valor Económico (Yi)

PROYECTO: DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS A PARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO

p: Puntaje de 0 a 4 (valores según VDI 2225) | 0 = No aceptable, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy Bien (Ideal)

g: Es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de Evaluación

Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos

Nº	Criterios de Valoración	g	Solución 1 S1		Solución 2 S2		Solución 3 S3		Solución 4 S4		Solución Ideal	
			p	g×p	p	g×p	p	g×p	p	g×p	p	g×p
1	Costo de materiales	0.15	3	0.45	2	0.30	3	0.45	2	0.30	4	0.60
2	Costo de fabricación	0.18	2	0.36	2	0.36	3	0.54	2	0.36	4	0.72
3	Costo de ingeniería	0.15	2	0.30	2	0.30	3	0.45	3	0.45	4	0.60
4	Facilidad de montaje	0.25	2	0.50	1	0.25	2	0.50	3	0.75	4	1.00
5	Fácil mantenimiento	0.15	2	0.30	3	0.45	3	0.45	2	0.30	4	0.60
6	Costos de operación	0.12	2	0.24	2	0.24	3	0.36	2	0.24	4	0.48
Puntaje máximo Σg, Σp, Σp×g		**1.00**	**13**	**2.15**	**12**	**1.90**	**17**	**2.75**	**14**	**2.40**	**24**	**4.00**
Valor económico (yi) (Y_i)			**0.54**		**0.48**		**0.69**		**0.60**		**1.00**	

Nota. Criterios, ponderaciones y calificaciones utilizados para la valoración económica de los conceptos de solución del sistema de pirólisis.

A partir de las calificaciones asignadas y de las ponderaciones establecidas, se procedió al cálculo del puntaje total de cada concepto de solución, así como de los valores ponderados normalizados del componente técnico (Xi) y del componente económico (Yi). Estos resultados permitieron comparar de manera integral el desempeño de las tres propuestas formuladas.

Tabla 19

Resultado de la valoración técnico-económica de los conceptos de solución

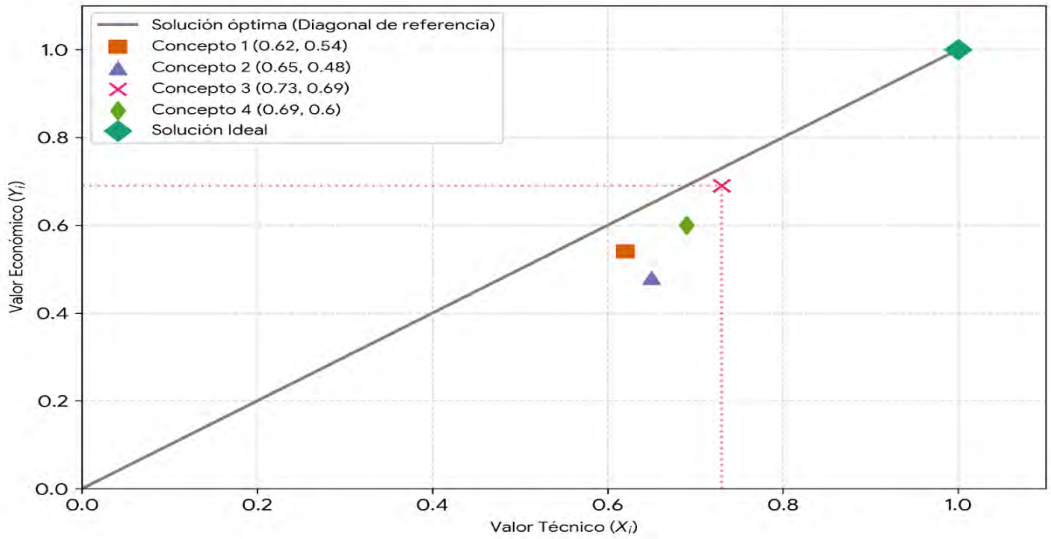
Solución	Técnica (Xi)	Económica (Yi)
Concepto 1	0.62	0.54
Concepto 2	0.65	0.48
Concepto 3	0.73	0.69
Concepto 4	0.69	0.60

Nota. Valores ponderados normalizados de la evaluación técnica (Xi) y económica (Yi), así como puntaje total de cada concepto de solución.

Con los resultados presentados en la Tabla, se ubicaron los puntos correspondientes a cada concepto de solución en un plano cartesiano, donde el eje horizontal representa la valoración técnica (Xi)(Xi)(Xi) y el eje vertical la valoración económica (Yi)(Yi)(Yi). Esta representación gráfica permitió identificar la alternativa que presenta el mejor equilibrio entre ambos componentes.

Figura 15

Análisis técnico-económico de los conceptos de solución



Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la valoración técnica y económica realizada, se seleccionó el concepto de solución 3 como alternativa base para el desarrollo del diseño del sistema de pirólisis. Esta

propuesta, conformada por un reactor rotativo vertical, sistema de dosificación manual y directa al tambor rotativo, sellado por grafito puro expandido, accionado por un motor, faja y poleas, un quemador de gas como sistema de calentamiento, una conducción de gases pirolíticos por tubería, un sistema de enfriamiento por condensador de tubo y corazas, un separador bifásico vertical por gravedad para la separación de la fase liquida y gaseosa y un tanque de almacenamiento de productos de aceites pirolíticos.

La selección de este concepto se sustentó en su adecuada eficiencia operativa, su configuración compacta, la integración funcional de sus subsistemas y su compatibilidad con el procesamiento de neumáticos usados granulados a una capacidad de 20 kg/h. En consecuencia, esta configuración fue adoptada como base para el desarrollo del diseño térmico y mecánico presentado en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO IV: DISEÑO TÉRMICO DEL REACTOR

4.1. Procesos para calculo térmico del reactor

El diseño efectivo de un sistema de pirólisis para el tratamiento de neumáticos usados granulados, exige un análisis térmico meticuloso, asegurando que el sistema no solo sea eficiente, sino también seguro en su operación. Este análisis involucra varios aspectos críticos:

- **Calculo térmico en el Reactor:** El reactor, como núcleo del proceso de pirólisis, requiere una atención particular en cuanto a la gestión de la transferencia de calor, generado por el quemador se distribuye a través del reactor para garantizar una descomposición térmica uniforme y completa a los de neumáticos fuera de uso.
- **Evaluación Energética del Quemador:** Se determina la cantidad de energía necesaria para alcanzar y mantener la temperatura requerida para el pirólisis en el quemador, para la descomposición termoquímica de los gránulos de NFU se inicie y se mantenga eficientemente.
- **Gestión Térmica en el Intercambiador de Calor:** Tras el pirólisis, los gases calientes producidos deben ser enfriados eficazmente. Se diseña un intercambiador de calor adecuado para recuperar la energía térmica de los gases de pirólisis.
- **Separador Bifásico:** Los separadores verticales bifásicos son equipos utilizados para la separación de mezclas gas–líquido, lo que los hace adecuados para procesos industriales de pequeña y mediana escala (Towler & Sinnott, 2008).

4.1.1. Parámetros de diseño

4.1.1.1. Volumen

Para determinar el volumen total del reactor de pirólisis, es fundamental considerar tanto el volumen operativo como un volumen adicional de seguridad para acomodar variaciones de presión y temperatura durante el proceso. La norma ASME VIII – División 1 proporciona una metodología para el cálculo del volumen total del reactor. La fórmula para calcular este volumen total (V_{tc}) la cual se establece la ecuación:

$$V_{tc} = V_c + V_{seg} \tag{19}$$

Donde:

- V_{tc}= Volumen total del reactor.
- V_c = Volumen del cilindro
- V_{seg}= Volumen de seguridad

De acuerdo con el código ASME, el volumen de seguridad recomendado equivale al 20% del volumen del cilindro. Por lo tanto, se puede expresar la siguiente ecuación para calcular el volumen de seguridad:

$$V_{seg} = 0.3 * V_c \tag{20}$$

Esta adición del 30% al volumen del cilindro ayuda a garantizar que el reactor pueda manejar fluctuaciones inesperadas en la presión sin comprometer la seguridad ni la integridad estructural del sistema. Esta precaución es crucial, especialmente en procesos que involucran altas temperaturas y presiones, como es el caso de la pirólisis de materiales. Este margen de seguridad asegura que el reactor opere dentro de límites seguros, evitando riesgos de sobre-presión que podrían llevar a fallos mecánicos o accidentes.

Parámetros iniciales de cálculo de volumen de reactor

- Capacidad 20 kg/h

- Densidad 800 kg/m³

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{21}$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{20Kg}{800\text{kg/m3}} = 0.025\text{m}^3$$

Se procederá el dimensionamiento del reactor de pirólisis, partiendo del volumen requerido, sin embargo, ese volumen representa los 20 kg de llantas, para hacerse más holgado se aplicará un 30% más de volumen quedando como:

$$v = 0.025\text{m}^3 + 0.025\text{m}^3 * \frac{30\%}{100\%}$$

$$v = 0.0325\text{m}^3$$

El reactor será un cilindro vertical, giratorio optimizado para maximizar la eficiencia del proceso de pirólisis. Este diseño permitirá una distribución uniforme del calor y una conversión eficiente de los residuos de caucho en productos valiosos como aceites, gases y carbón.

Volumen de un cilindro:

$$v = \left(\frac{\pi * \emptyset^2}{4}\right) * h \tag{22}$$

Donde h es Altura

$$0.0325\text{m}^3 = \left(\frac{\pi * (0.300m)^2}{4}\right) * h$$

$$\boldsymbol{h = 0.45m}$$

$\emptyset = 340mm \quad e = 5mm$

$h = 0.45m$

4.1.1.2. Presión

La presión de diseño constituyó un parámetro relevante en el dimensionamiento térmico del reactor y de la línea de conducción de vapores pirolíticos, debido a su influencia en la densidad de los gases, el cálculo del caudal volumétrico y las pérdidas de presión en el sistema. Para el presente estudio se consideró que el proceso de pirólisis operó cercano a presión atmosférica, condición que resulta adecuada para sistemas piloto de pirólisis térmica de neumáticos. En el diseño de pirólisis, la configuración más eficaz y de balance económico, se realiza con la presión operación similar a la presión atmosférica (1 atm = 101325 Pa). Es el estándar para pirólisis rápida de biomasa (Bridgwater, 2012)

En el caso del reactor, la presión de referencia se adoptó de acuerdo con las condiciones atmosféricas de la ciudad del Cusco, donde la presión ambiente es menor que a nivel del mar debido a la altitud. Asimismo, para el cálculo de la densidad del flujo gaseoso en la línea de vapores se utilizó una presión absoluta de 101 275 Pa, con una condición manométrica cercana a –50 Pa, lo cual permitió estimar el comportamiento del gas a la temperatura de operación del sistema.

4.1.1.3. Temperatura

La temperatura de operación representó uno de los parámetros fundamentales en el diseño térmico del reactor de pirólisis, ya que de ella depende la descomposición termoquímica del caucho granulado y la obtención de productos gaseosos, líquidos y sólidos. En el presente estudio se consideró un rango de trabajo de 500 °C a 520 °C, debido a que dicho intervalo es adecuado para

el pirólisis de neumáticos usados y permite asegurar una degradación térmica eficiente del material alimentado. Para fines de diseño y cálculo se adoptó una temperatura de 500 °C, equivalente a 773 K.

4.2. Diseño térmico del reactor de pirólisis

4.2.1. Balance energético

El cálculo térmico del reactor se realizó mediante un balance de energía, con el propósito de determinar la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura del material alimentado y de los componentes metálicos involucrados hasta la temperatura de pirólisis. Este procedimiento permitió estimar la carga térmica del sistema y, a partir de ello, definir la capacidad mínima requerida del quemador.

$$E_{entrada} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

- $E_{entrada}$ = energía de entrada del sistema
- E_{sale} = energía que sale del sistema
- $\Delta E_{sistema}$= cambio neto de energía

Figura 16

Balance de energía personalizado al reactor

Nota. Elaboración propia.

4.2.2. Parámetros de calculo

- Masa de gránulos de neumáticos usados: 20 kg/h
- Capacidad calorífica específica de gránulos de neumáticos usados: 1.5 kJ/kg·K
- Capacidad calorífica especifica del acero inoxidable AISI 304: 0.5 kJ/kg·K
- Temperatura inicial 25 °C (298 K)
- Temperatura de pirólisis 500 °C (773 K)

4.2.3. Energía absorbida

$$Q_{total} = Q_{material\ granulado} + Q_{acero}$$

$$Q_{caucho\ granulado} = m_{caucho\ granulado} * C_P * \Delta\mathrm{T}$$

$$Q_{caucho\ granulado} = 20\frac{Kg}{h} * 1.5\frac{kJ}{kg.K} * (773\mathrm{k} - 298\mathrm{k})$$

$$Q_{caucho\ granulado} = 14250\frac{KJ}{h}$$

$$Q_{acero} = m_{acero} * C_P * \Delta\mathrm{T}$$

$$Q = 16\frac{Kg}{h} * 0.5\frac{kJ}{kg.K} * (773\mathrm{k} - 298\mathrm{k})$$

$$Q_{acero} = 3800\frac{KJ}{h}$$

$$Q_{total} = 18050\frac{KJ}{h}$$

$$Q_{total} = 5.01\ KW$$

En consecuencia, se estableció que el reactor requirió una potencia térmica aproximada de 5.01 kW, valor que constituyó la base para el dimensionamiento del quemador

4.2.4. Aislante del reactor

Para determinar el aislamiento adecuado de un reactor de pirólisis con un diámetro de 350 mm y una temperatura interna de 500ºC, Es necesario elegir el material.

Material Seleccionado: Basado en la investigación, se propone el uso de **fibra de vidrio** como material aislante (.035-0.040 W/m·K.).

Datos:

- $\mathrm{Q} = 18050\frac{\mathrm{Kj}}{\mathrm{h}} = 5000.1\mathrm{W}$
- $\mathrm{K} = 0.045\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m*k}}$ conductividad termica de la fibra de vidrio a temperatura de diseño
- $\mathrm{K} = 50\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m*k}}$ conductividad termica de ASTM A36
- $\mathrm{T_i} = 500°\mathrm{C}$
- $\mathrm{T_o} = 25°\mathrm{C}$
- $\mathrm{L} = 0.450\mathrm{m}$

Aplicación de ecuación de Fourier para determinar el espesor necesario del aislamiento:

$$Q = \frac{2\pi L(T_i - T_0)}{\left[\frac{1}{k_{acero}} ln\frac{D_O}{D_I} + \frac{1}{k_{Fibra}} ln\frac{D_{ext}}{D_0}\right]} \tag{23}$$

Coeficiente del Acero:

$$\frac{1}{k_{acero}} ln\frac{D_O}{D_I} = \frac{1}{50} * ln\frac{0.206}{0.200} = 0.00057$$

Desarrollo de la parte superior de la ecuacion:

$$\frac{2\pi L(T_i - T_0)}{Q} \tag{24}$$

$$\frac{2\pi 0.450 * (500 - 25)}{5000W} = 0.357$$

Resolviendo para D_{ext}

$$\frac{1}{k_{Fibra}} ln \frac{D_{ext}}{D_0} = 0.357 - 0.00057$$

$$ln \frac{D_{ext}}{D_0} = 0.014257$$

$$D_{ext} = 0.355m$$

$$e = 15mm$$

La fibra de vidrio se selecciona como el material aislante más adecuado para el reactor de pirólisis debido a su baja conductividad térmica y alta resistencia térmica. Este material no solo cumple con los requisitos térmicos, sino que también ofrece durabilidad y facilidad de instalación, asegurando la eficiencia operativa del reactor.

4.2.5. Energía perdida

4.2.6. Pérdidas de calor por conducción

Datos iniciales del volumen del reactor

- Radio interior: r_2=0.2 m
- Radio exterior: $r_2 =$ 0.206 m
- Longitud: 0.45m
- K: Conductividad térmica ($\frac{W}{m.K}$)

Resistencias térmicas de fibra y acero:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_{2/}r_1)}{k}$$

$$R_{acero} = \frac{\ln\,(0.206/0.20)}{16} = 0.0018\,\frac{m.K}{W}$$

$$R_{fibra} = \frac{\ln\,(0.211/0.206)}{0.045} = 1.563\,\frac{m.K}{W}$$

Perdida de calor por conducción:

$$Q_{cond} = \frac{2 * \pi * L * (T_i - T_\infty)}{R_{total}}$$

$$Q_{cond} = \frac{2 * \pi * 0.45 * (500 - 25)}{1.5648}$$

$$Q_{cond} = 858W$$

4.2.7. Pérdidas de calor por convección

$$A_{lat=} 2\pi r_2 L = 2\pi(0.256)(0.45) = 0.724m^2$$

$$A_{tapas} = 2\pi r_2^2 = 2\pi(0.256)^2 = 0.412m^2$$

$$Q_{cond} = hA_{total}(T_s - T_\infty)$$

$$A_{total} = A_{tapas} + A_{lat}$$

$$A_{total} = 1.136m^2$$

Calcularemos la temperatura superficial externa, por balance

$$Q'_{cond} = 858W = h * A_{total} * (T_S - T_\infty)$$

Donde:

- h: convección de la fibra de vidrio = 17 $W/m^2.K$

$$858W = \frac{17\ W.K}{m^2} * 1.136m^2 * (T_S - 298K)$$

$$T_S = 45.5\ °C = 318.5\ K$$

4.2.8. Pérdidas de calor por radiación desde la superficie externa

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A_{total}(T_s^4 - T_\infty^4)$$

- ε: fibra de vidrio pintado (0.9)

- σ: Constante de Stefan-Boltzmann (5.67x$\mathbf{10^{-8}}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}.\mathrm{K^4}$)

$\boldsymbol{Q_{rad}} = \mathbf{0.9} * \mathbf{5.67} *\mathbf{10^{-8}}*1.136\ \boldsymbol{m^2}\ *(\mathbf{348.35^4} - \mathbf{318^4})$

$$Q_{rad} = 393\ W$$

4.2.9. Energía de entrada

$$E_{entrada} = E_{sale} + E_{absorvida}$$

- $E_{entrada}$: Calor total necesario (kW)
- $E_{absorvida}$: Calor necesario para calentar el acero y material de gránulos de caucho (kW)
- E_{sale} : Perdidas de calor (kW)

$$E_{entrada} = 5.01\ KW + 0.858KW + 0.393KW$$

$$E_{entrada} = 6.261KW$$

4.3. Cálculo del Quemador

4.3.1. Teoría de quemador

La selección y diseño del quemador para un sistema de pirólisis son críticos, ya que estos dispositivos son responsables de proporcionar la energía térmica necesaria para iniciar y mantener la reacción de pirólisis. Un quemador adecuado debe ser capaz de alcanzar y controlar las temperaturas altas necesarias para descomponer eficazmente las llantas usadas en productos útiles como gases, aceites y carbono.

4.3.1.1. Parámetros de calculo

- Potencia Térmica Útil: 6.26 kW
- Longitud de quemador lineal: 0.4 m
- Gas natural
- 20mbar y poder calorífico: 39900 kJ/m^3

- Carga máxima estable (potencia termina total) industrial: 200 kW/m^2

4.3.2. Potencia real de entrada al quemador

$$Q_{entrada} = \frac{Q_{util}}{\eta}$$

Tabla 20

Eficiencia de quemadores según altura sobre el nivel del mar

Altura sobre el Nivel del Mar (msnm)	Presión Atmosférica Promedio (kPa)	Factor de Corrección Comercial	Capacidad Térmica Disponible (%)
0 (Nivel del Mar)	101.3	1	100%
500	95.4	0.98	98%
1,000	89.8	0.96	96%
1,500	84.5	0.93	93%
2,000	79.4	0.91	91%
2,500	74.6	0.88	88%
3,000	70.1	0.85	85%
3,500	65.7	0.82	82%
4,000	61.6	0.78	78%

Nota. La tabla presenta valores recomendados según directrices de ASME PTC (códigos de prueba de rendimiento) Y NFPA Código Nacional del Gas, Combustible,

Se utilizo la eficiencia de un quemador respecto a altura, ya que hay menos oxigeno disponible. Las cuales afectan a combustión incompleta, exceso de aire mal ajustado y velocidad de llama y está la tenemos que compensarla para nuestro diseño

$$Q_{entrada} = \frac{6.26\ KW}{0.85}$$

$$Q_{entrada} = 7.42\ KW$$

4.3.3. Área requerida de puertos para carga segura

$$A_{puertos} = \frac{Q_{entrada}}{Q'_{carga\ estable}}$$

$$A_{puertos} = \frac{7.42\ KW}{200KW/m^2}$$

$$A_{puertos} = 0.0341m^2$$

$$A_{puertos} = 34100mm^2$$

Según la altura de diseño es 0.4m (400 mm)

$$ancho = \frac{34100mm^2}{400mm}$$

$$ancho = 85.25\ mm$$

4.3.4. Cálculo de puertos del quemador

Diámetros de puertos estándar: 2.2 mm

$$A_{puerto\ unitario} = \frac{\pi \times 2.2^2}{4}$$

$$A_{puerto\ unitario} = 3.80\ mm^2$$

$$N_{puertoS} = \frac{A_{puertos}}{A_{puerto\ unitario}}$$

$$N_{puertoS} = \frac{34100mm^2}{3.80mm^2}$$

$$N_{puertoS} = 8973.68$$

4.3.5. Sistema de gas – aire

El combustible seleccionado para el quemador es gas natural, debido a su alta eficiencia y disponibilidad. El poder calorífico del gas natural se ha asumido en 39900 kJ/m^3.

4.3.5.1. Cálculo del flujo de combustible:

$$V'_{gas\ natural} = \frac{6.82KW}{39900\frac{Kj}{m^3}} \quad (25)$$

$$V'_{gas\,natural} = \frac{26712\frac{Kj}{h}}{39900\frac{Kj}{m^3}}$$

$$V'_{gas\,natural} = 0.67\frac{m^3}{h}$$

Densidad del gas natural : 0.737 kg/m^3

Flujo masico de gas natural consumido en cada hora :0.494 kg/h

4.3.5.2. Relación estequiométrica:

En condiciones ideales , la relacion de aire y combustible en volumen (molar) , para el gas natural es el siguiente (NFPA54, NFPA85)

9.5 m^3 aire: 1 m^3 gas natural

4.3.5.3. Cálculo del aire estequiométrico:

$$V'_{aire} = 9.5 * 0.67\frac{m^3}{h}$$

$$V'_{aire} = 6.36\frac{m^3}{h}$$

4.3.6. Exceso de aire:

Para el quemador lineal , sin premezcla forzada , necesitas un exceso para evitar CO y asegurar que todos los puertos enciendan.

La optimizacion de eficiencia , se recomienda con un exceso de aire, ya que se desperdiciaria energia y gases inquemados.(ASME PTC4.4)

Según ASME PTC 4.4, Recomienda apuntar

- Menos de 5 %- riesgo que CO>200 ppm, llama amarilla
- Mas de 20% - enfriamiento de la llama, sube el NOx, baja eficiencia

El aire total requerido = aire teorico * (1+% de exceso de aire)

$$\lambda = 10\ \%$$

$$V'_{aire\ real} = 6.36\frac{m^3}{h} * (1 + 0.10)$$

$$V'_{aire\ real} = 6.99\ \frac{m^3}{h}$$

4.3.6.1. Relación real de aire- gas

El rango de operación típico con exceso de aire, queda resultada por la siguiente expresión:

$$\frac{V'_{aire\ real}}{V'_{gas\ natural}}$$

$$\frac{6.99}{0.67} = 10.44{:}\ 1$$

4.3.7. Cálculo de velocidad de llama:

Caudal de mezcla real : $0.67\frac{m^3}{h}$ +$6.99\frac{m^3}{h}$ = $7.66\frac{m^3}{h}$ =$0.0021\frac{m^3}{s}$

$$V_{puertos} = \frac{Q_{caudal\ mezcla\ real}}{A_{puertos}}$$

$$V_{puertos} = \frac{0.0021\frac{m^3}{s}}{0.0341m^2}$$

$$V_{puertos} = 0.061\ m/s$$

- <0.04 m/s Flashback (retroceso de llama),
- >0.12 m/s Lift-off (desprendimiento de llama),
- 0.04-0.12 m/s Zona segura

La velocidad de llama en los puertos se encuentra dentro del rango estable según la norma (NFPA86)

4.4. Cálculo de tubería

4.4.1. Teoría de tubería

El diseño de la tubería de conducción de vapores pirolíticos tuvo como finalidad garantizar el transporte adecuado del flujo gaseoso desde el reactor hacia las unidades posteriores del sistema, evitando velocidades excesivas que pudieran generar erosión o velocidades demasiado bajas que favorecieran la condensación prematura de los vapores. Para ello, se consideraron criterios hidráulicos y de flujo compatibles con líneas de transporte de gases calientes.

4.4.1.1. Parámetros de calculo

- Temperatura inicial:25 °C (298 K)
- Temperatura de pirólisis:500 °C (773 K)
- Flujo masico: 0.05 kg/s
- Viscosidad: 0. 00002 Pa.s

$$\rho_{(500°C)} = \frac{P * PM_{promedio}}{R * T}$$

Donde:

- R: Constante Universa de Gases Ideales 8.314 $\frac{KJ}{Kmol*K}$
- P: Presión absoluta, Pa
- T: Temperatura en grados kelvin
- $PM_{Promedio}$: composición de volumen aproximado de gas
- Vapores pirolíticos: 50% (contiene 140 promedio C10)
- Gases no condesados: 40% (16 promedio de CH4)

Char: 10%

$$PM_{promedio} = 0.5 * 140 + 0.4 * 16$$

$$PM_{promedio} = 76.4\ \frac{kg}{Kmol}$$

P=101275 Pa =-50 Pa manométrica

$$\rho_{(500°C)} = \frac{101275\ Pa * 76.4\ \frac{kg}{Kmol}}{8.314\ \frac{KJ}{Kmol * K} * 773}$$

$$\rho_{(500°C)} = 1.2039\frac{kg}{m^3}$$

Ahora se realiza el cálculo de caudal real, a cierta temperatura

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Donde:

- ṁ: flujo masico (kg/s)
- ρ: densidad (kg/m3)

$$Q = \frac{0.05 * 0.85\ \frac{kg}{s}}{1.2039\frac{kg}{m^3}}$$

$$Q = 0.035\ \frac{m^3}{s}$$

Desarrollamos el diámetro optimo, para el diseño de tuberías

$$di_{optimo} = 0{,}550 * (G)^{0{,}49}\ * (\rho)^{-0{,}35}$$

Donde:

- G= flujo másico, kg/s
- ρ= densidad, kg/m^3
- d_i= diámetro interno, m

$$di_{optimo} = 0{,}550 * (G)^{0{,}49} \ * (\rho)^{-0{,}35}$$

$$di_{optimo} = 0.550 * (0.85 * 0.05)^{0{,}49} \ * (1.2039)^{-0{,}35}$$

$$di_{optimo} = 0.011m$$

De acuerdo al cálculo, el diámetro optimo y comercial es de 1”; por lo tanto, hacemos cálculo de la velocidad.

Diámetro comercial 1” cedula 40 (di=1.049in)

$$v = \frac{0.035 \ \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} * (\frac{2.54 * 1.049}{100} m)^2}$$

$$v = 17.5 \ m/s$$

Calculo velocidad de erosión

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}}$$

Donde:

- C = constante empírica
- ρ_m = densidad de la mezcla liquido-gas, lb/ft^3

$$\rho_m = 1.2039 \frac{kg}{m^3} = 0.075 \frac{lb}{ft^3}$$

Tabla 21

Velocidades recomendadas y caída de presión admisible en tuberías según el tipo de servicio

Descripción	Velocidad recomendada (m/s)	Servicio
Gases pirolíticos limpio sin solidos	20 – 30	Balance de caída de presión y sección de tubería
Gases pirolíticos, con partículas	10 – 20	Evitar erosión, Limite ASME para servicio erosivo es 20 m/s
Succión de compresor	15 - 25	Minimizar la caída de presión en succión
Descarga de compresor	25 – 35	Balance económico

Nota. La tabla presenta valores recomendados de velocidad de flujo y caída de presión admisible en tuberías, según el tipo de servicio y el diámetro nominal de la línea.

Velocidades recomendadas de fluido dentro de tuberías (API RP 14E) (ASME B31.3)

$$V_e = \frac{5}{\sqrt{0.075}}$$

$$V_e = 18.26 m/s$$

- V<10 m/s vapores se condensan
- V>20 m/s vapores erosionan y dañan sistema

Las velocidades que establecen en norma API 14E, establece velocidades recomendadas para prevenir daños por corrosión y erosión. Exceder estos valores acelera el adelgazamiento de pared interior, particularmente en codos, accesorios, donde hay separación de flujo

4.4.2. Cálculo de presión en la tubería

La estimación de la caída de presión en la tubería de conducción de vapores pirolíticos resultó necesaria para verificar que el transporte del flujo gaseoso desde el reactor hacia los equipos posteriores se realice sin pérdidas excesivas de presión que afecten el funcionamiento del sistema. Para ello, primero se determinó el régimen de flujo mediante el cálculo del número de Reynolds, ya que este parámetro permite establecer si el comportamiento del fluido es laminar, transicional o turbulento. El factor de fricción correspondiente mediante la ecuación de Colebrook, y hallar la pérdida de presión en la línea.

El número de Reynolds se calculó mediante la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{\rho * di * V}{\mu}$$

$$R_e = \frac{1.2039\ \frac{kg}{m^3} * 0.02664m * 17.5\frac{m}{s}}{0.00002Pa.s}$$

$$R_e = 28062.9$$

Rugosidad relativa (ε/D):

- ε: rugosidad absoluta del acero AISI 304 (0.015mm)

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.015}{0.02664} = 0.00056$$

Usaremos ecuación de Swamme- Jain (implícita a Colebrook-White)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\ log_{10}\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{{R_e}^{0.9}}\right)$$

Factor de fricción de Darcy

$$f = 0.025$$

$$\Delta P = \frac{12{,}5 * S_g * Z * Q_g^2 * f * L}{d_i^5 * P}$$

Donde:

- ΔP=caída de presión, psi/100ft
- Sg=gravedad especifica del gas
- Z = factor de comprensibilidad, adimensional
- F = factor de fricción
- L = longitud de la línea, ft

Según norma API EP E14

$$\Delta P = \frac{12{,}5 * S_g * Z * Q_g^2 * f * L}{d_i^5 * P}$$

$$\Delta P = \frac{12{,}5 * 0.995 * 0.103 * 0.1067^2 * 0.025 * 1.69}{1^5 * 10}$$

$$\Delta P = 4.13 \text{ Pa}$$

El valor calculado de caída de presión fue reducido, por lo que se concluyó que la línea de conducción seleccionada resultó adecuada para el transporte de vapores pirolíticos, sin comprometer la continuidad del flujo ni generar pérdidas significativas en el sistema.

4.5. Diseño del intercambiador de calor

4.5.1. Teoría de intercambiador

En un sistema de pirólisis, el intercambiador permite enfriar los vapores generados en el reactor para favorecer la condensación del aceite pirolítico. Para esta aplicación se selecciona un intercambiador de tipo tubo y coraza, donde el fluido caliente (vapores de pirólisis) fluye por los tubos y el fluido frío (agua de enfriamiento) por la coraza.

La selección del material debe considerar resistencia a la corrosión y a las temperaturas de operación, mientras que la configuración del flujo puede ser en paralelo, contracorriente o flujo cruzado según el rendimiento térmico requerido.

4.5.1.1. Parámetros de calculo

- Fluido caliente (gas): Entrada a 500 °C, salida a 200 °C.
- Fluido frío (agua): Entrada a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C).
- Flujo masico $60\%_{20kg/h} = 12\frac{kg}{h} = 0.003\frac{kg}{s}$

- Capacidad calorifica especifica de gases piroliticos(Cp:1.8-2.5 kJ/kg.K)

Según Suarez (2018), se puede observar que en un reactor operando a 400 °C, la composición de los productos incluye un % 60de gases,30

% de sólidos.

4.5.2. Cálculo de Intercambiador de Calor

4.5.3.1. **Calculo de energia requerida para enfrian el gas**

$$Q = m * C_P * \Delta T$$

$$Q = 12 * 1.8 * (773 - 473)$$

$$Q = 6480 \frac{KJ}{h}$$

4.5.3. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección Interna.

$$h_i = 0.023 \left(\frac{K_w}{Di}\right) * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

Donde:

- Conductividad termica (Kw)
- Diametro interno (Di)
- Reynolds (Re)
- Prand (Pr)

Propiedades del agua:

- Conductividad termica (Kw) $= 0.6 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mk}}$
- Viscocidad dinamica $(\mathrm{u_w}) = 0.001\ \mathrm{Pa.s}$
- Densidad $(\rho_\mathrm{w}) = 995 \frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{m}^3}$
- Capacidad Calorica $\mathrm{C_P} = 4.18 \frac{\mathrm{Kj}}{\mathrm{Kg*k}}$

Se tomara un diametro interno de 20 mm (0.020m), es el diametro estandar de un tubo interno de ¾”

Espesor es de 1.65 mm; por ende el diamtro diametro interno es 15.75 mm real

Se tomara una velocidad de fluido de agua de 1 m/s

4.5.4.1. **Calculo de n de reynolds:**

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho * \mathrm{v} * \mathrm{D}}{\mathrm{u}} \tag{26}$$

$$Re = \frac{995 * 1 * 0.01575}{0.001}$$

$$Re = 15671.25$$

4.5.4.2. **Calculo de n de Prands:**

$$Pr = \frac{C_P * u}{K_g} \tag{27}$$

$$Pr = \frac{4.18 * 0.001}{0.6}$$

$$Pr = 0.007$$

$$h_i = 0.023\left(\frac{k_W}{Di}\right) * Re^{0.8} * Pr^{0.4} \tag{28}$$

$$h_i = 0.023\left(\frac{0.6}{0.01575}\right) * 15671.25^{0.8} * 0.007^{0.4}$$

$$h_i = 273.35\frac{W}{m^2.K}$$

4.5.5. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección Externa.

$$h_i = 0.023\left(\frac{K_g}{De}\right) * Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

Propiedades de gases Pirólisis:

- Conductividad termica $(\mathrm{K_g}) = 0.070\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$
- Viscocidad dinamica $(\mathrm{u_6}) = 0.00028\ \mathrm{Pa.s}$
- Densidad $(\rho_\mathrm{w}) = 1.2039\ \frac{\mathrm{Kg}}{\mathrm{m^3}}$

- Capacidad Calorica $C_P = 1.8\ \frac{Kj}{Kg*k}$

Se tomara un diametro Externo de 20 mm (0.020m) , espesor 1.65 mm

Velocidad real del gases de pirólisis es de 17.5 m/s

4.5.5.1. **Calculo de n de reynolds:**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{u}$$

$$Re = \frac{1.2039 * 17.5 * 0.02}{0.00033}$$

$$Re = 1504.875$$

4.5.5.2. **Calculo de n de Prands:**

$$Pr = \frac{C_P * u}{K_g}$$

$$Pr = \frac{1.8 * 0.000028}{0.070}$$

$$Pr = 0.0084$$

$$h_e = 0.023\left(\frac{k_g}{De}\right) * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

$$h_e = 0.023\left(\frac{0.070}{0.020}\right) * 13543.875^{0.8} * 0.0084^{0.3}$$

$$h_e = 38.76\frac{W}{m^2.K}$$

4.5.6. Factor de incrustación interno $(\boldsymbol{R''_{fi}})$ ***y externo*** $(\boldsymbol{R''_{fo}})$***:***

$$\boldsymbol{R''_f}\ (\frac{\boldsymbol{m^2.K}}{\boldsymbol{W}})$$

Tabla 22

Valores de factores de incrustación

Tipo de Fluido	Factor de Incrustación Rf″	Condiciones Operativas / Calidad
Gases de Proceso / Pirolíticos	0,0004	Gases de refinería con hidrocarburos pesados, vapores propensos a polimerización u orgánicos con arrastre de partículas (tars y char).
Agua de Torre de Enfriamiento	0,0002	Agua de circuito semicerrado tratada químicamente, velocidad > 1 m/s, temperatura del fluido < 50 °C.
Agua Destilada o Condensado	0,0001	Agua pura desmineralizada de circuito cerrado.
Agua de Mar / Agua de Río	0,0003 - 0,0005	Agua sin tratar o con tratamiento básico de filtrado.
Gases Limpios / Aire	0,0001 - 0,0002	Aire atmosférico libre de aceites o gases licuados limpios.

*Not*a La tabla de diseño industrial basado en las normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Assocuation) Mendia Urquiola 1994

Los valores que adquieren un valor de:

- $0.0002\ \frac{m^2.K}{W}$, incrustacion interna – fluido refrigerante
- $0{,}0004\frac{m^2.K}{W}$, incrustacion externa – gases piroliticos

4.5.7 Conductividad térmica del material K'

Ese necesario determinar la conductividad termica del material , para calcular la resistencia a la conductividad , teniendo en cuenta que el material es AISI 304 , según datos recogidos de 3ra edicion Alan J Chapman , titulado 'transmision de calor'

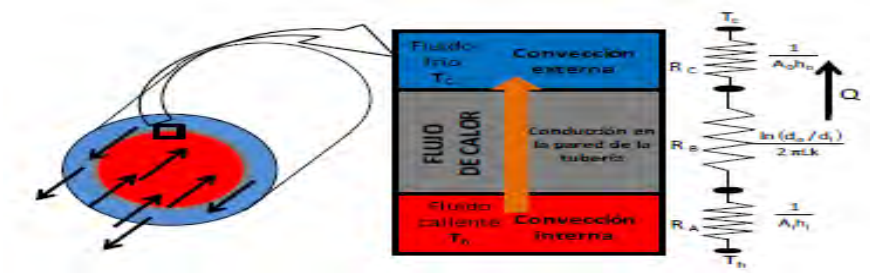
Donde K es conductividad termica del acero $20\frac{W}{mK}$

4.5.8. Cálculo de coeficiente global de transferencia de calor U

Una vez determinada todos los terminos estamos en condiciones de realizar el calculo , según la siguiente ecuacion:

Figura 17

Etapas de transferencia de calor en un intercambiador tubulares



Nota. Departamento Energética – Pedro Vargas

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \boldsymbol{R''_{fi}} * \frac{D_o}{D_i} + \frac{D_o}{D_i} * \frac{1}{h_0} + \frac{D_i * \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2K'} + \boldsymbol{R''_{fo}} \quad (27)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{273.35} + 0.0002 * \frac{19.05}{15.75} + \frac{19.05}{15.75} * \frac{1}{38.76} + \frac{0.01905 * \ln\left(\frac{0.025}{0.020}\right)}{2 * 20} + 0{,}0004$$

$$\frac{1}{U} = 0.03561$$

$$U = 28.08 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2.K}} = 28.08 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s.m^2.K}}$$

Figura 18

Coeficiente típicos de transferencia global de calor en intercambiador tubulares

Fluido caliente	Fluido frío	U (W/m^2 K)
Agua	Agua	1300 –2500
Amoníaco	Agua	1000–2500
Gas	Agua	10 – 250
Gas	Gas	10 - 60
Gas	Orgánico liviano	20 – 100
Gas	Orgánico pesado	20 – 60
Orgánico liviano (< 0,5 cP)	Gas	20 – 100
Orgánico pesado (> 1 cP)	Gas	20 - 60
Agua	Aire comprimido	50 – 70
Agua	Aceite lubricante	110 – 340
Orgánico liviano	Agua	370 – 750
Orgánico mediano (0,5–1 cP)	Agua	240 – 650

Nota. Departamento Energética – Pedro Vargas

4.5.9. Cálculo de temperatura de salida del agua:

Se tomara 45 kg/h

$$Q = m * C_P * \Delta T$$

$$6480\,\frac{KJ}{h} = 45\,\frac{Kg}{h} * 4.18\,\frac{Kj}{Kg * k} * (ts - 298.15)$$

$$t_{s\,agua} = \frac{6480}{45 * 4.18} + 298.18$$

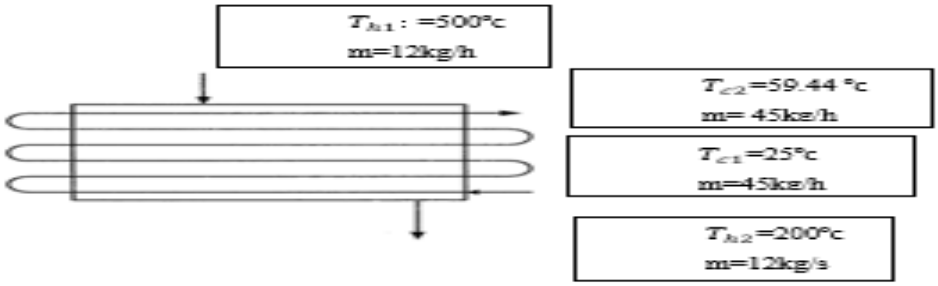
$$t_{s\,agua} = 332K = 59.44ºc$$

4.5.9.1. **Cálculo de la diferencia de temperatura medio logarítmica**

La temperatura media logaritmica (LMTD) viene dada por la siguiente expresion , refiriendose a las corrientes de gases de pirólisis y fluido de agua .

Figura 19

Esquema de temperaturas de intercambiador de calor



Nota. Elaboración propia.

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}}\right)} \qquad (29)$$

Donde:

- T_{h1}: temperatura de entrada del gas de pirólisis (500 °C)
- T_{h2}: temperatura de salida del gas de pirólisis (200 °C)
- T_{c1}: temperatura de entrada del agua (25 °C)
- T_{c2}: temperatura de salida del agua (59.44 °C)

$$LMTD = \frac{(500 - 59.44) - (200 - 25)}{\ln\left(\frac{500 - 59.44}{200 - 25}\right)}$$

$$LMTD = 288°C$$

$$\Delta T_m = F * LMTD$$

$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}}$$

$$P = \frac{59.44 - 25}{500 - 25}$$

$$P = 0.0725$$

$$R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}}$$

$$R = \frac{500 - 200}{59.44 - 25}$$

$$R = 8.7108$$

Una vez calculada estas dos razones utilizando el grafico que se muestra a continuacion calculamos el factor de correccion F , obteniendose que :

Figura 20

Factor de corrección de LMTD, para intercambiadores 4-8

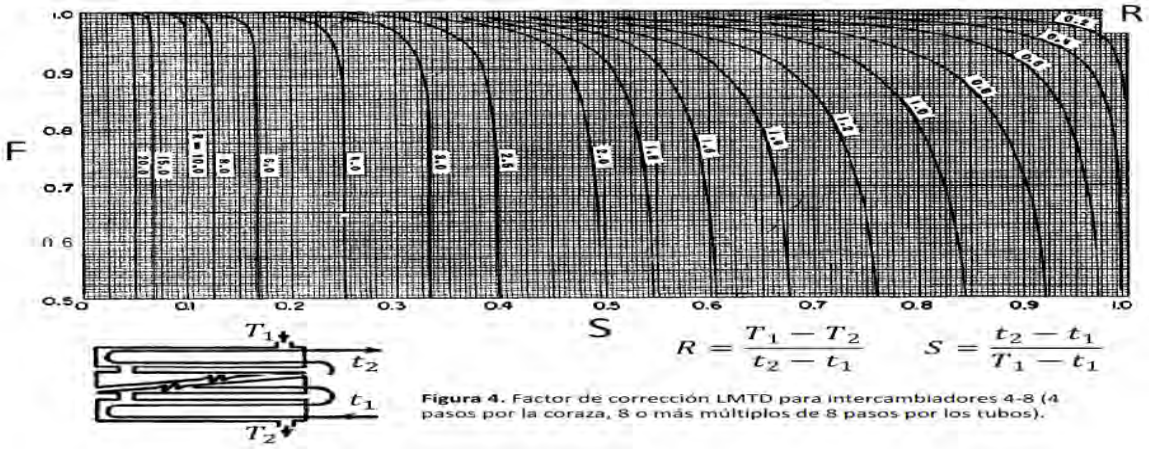


Figura 4. Factor de corrección LMTD para intercambiadores 4-8 (4 pasos por la coraza, 8 o más múltiplos de 8 pasos por los tubos).

Nota. Intercambiador tubo y carcasa – Análisis Térmico Pedro Vargas

$$\Delta T_m = 1 * 288°C$$

$$\Delta T_m = 288°C$$

Como se aprecia en la imagen F:1 , lo que es admisible y que significa que el intercambiador es termicamente eficiente en su configuracion actual.

Asimismo detallar los intercambiador de calor de carcasa y tubos con 1 paso por carcasa y un multiplo de 2 pasos por los tubos (arreglo 1-4,1-8) , se utiliza la misma grafica estandirizada en el factor de correccion F.

4.5.9.2. **Calculo de area de tranferencia de calor:**

Se obtiene que el valor del area de intercambio necesaria es:

$$A = \frac{Q}{U(\Delta T_m)}$$

Donde:

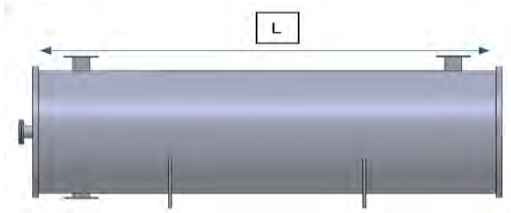
- Q: Calor intercambiado entre los fluidos en KJ/s
- U: Coeficiente global de intercambio de calor en $\frac{J}{s.m^2.K}$
- ΔT_m : Diferencia de temperatura media logaritmica expresada en K

Por lo tanto tenemos:

$$A = \frac{6480}{28.08 * (288)}$$

$$A = 0.80m^2$$

4.5.9.3. **Dimensionamiento del intercambiador**



Longitud total del intercambiador es de 1700 mm ; detallar que los tubos comerciales son 6,12,16,20 y 32 ft.

Area de un cilindro:

$$A_c = \frac{\pi * \theta^2}{4} \quad (30)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{A_c * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.80 * 4}{\pi}}$$

$$\theta = 1.01m$$

4.5.9.4. **Cálculo de numero de tubos:**

Elegidas las dimensiones y sabiendo el area de intercambio , se realiza el calculo de numero de tubos:

$$N = \frac{A_{area\ de\ intercambio}}{A_{area\ de\ tubo\ lateral}}$$

$$N = \frac{A}{\pi * D_I * l} \qquad (31)$$

Determinada que la longitud de los tubos es de 1700 mm , tenemos que el numero de tubos es de :

$$N = \frac{0.80m^2}{\pi * 0.01905m * 1.7m}$$

$$N = 7.86 = 8$$

4.6. Calculo para el diseño de bomba de impulsión

4.6.1. Cálculo de perdida en tubos de intercambiador

Se realizara las perdidas en los tubos interiores del intercambiador

¾” BWG 18 , AISI 304

$d_o = 19.05\ mm$; $d_i = 16.56\ mm$; e = 1.245 mm

$$A_t = 8 * \frac{\pi * (16.56)^2}{4}$$

$$A_t = 0.00172\ m^2$$

Realizando el caudal dentro de los tubos interiores del intercambiador es

$$Q = A_t * v$$

$$Q = 0.00172 * 1$$

$$Q = 0.00172\ \frac{m^3}{s}$$

Realizamos el calculo de numero de reynolds

$$Re = \frac{995 * 1 * 0.01656}{0.001}$$

$$Re = 16477.2$$

Factor de friccion y tubos lisos de acero inoxidable , usamos la ecuacion de Blasius por el flujo turbulento

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{16477.2^{0.25}}$$

$$f = 0.028$$

Perdidas de carga por metro de la longitud, mediante ecuacion de Darcy-Weisbach :

$$h_l = f * \frac{L * v^2}{D * 2 * g}$$

Donde:

- h_l: perdida de carga por longitud
- L: Longitud de la tubería
- v : velocidad del agua

Por lo tanto tenemos:

$$h_l = 0.028 * \frac{13.6m * (1\frac{m}{s})^2}{0.01656m * 2 * 9.81m/s^2}$$

$$h_l = 1.172\text{m. c. a}$$

4.6.2 Calculo de perdida de tubo de la bomba hacia condensador

Se realizara las perdidas en los tubos de la bomba hacia el condensador , son tubos de 1” cedula 40, AISI 304

$$\mathrm{d_i} = 26.64\ mm$$

$$\mathrm{A}_t = \frac{\pi * (26.64)^2}{4}$$

$$\mathrm{A}_t = 0.00055\ m^2$$

$$\mathrm{Q} = \mathrm{A}_t * v$$

$$\mathrm{v} = \frac{0.00172\frac{m^3}{s}}{0.00055m^2}$$

$$\mathrm{v} = 3.12\frac{m}{s}$$

Realizamos el calculo de numero de reynolds

$$Re = \frac{995 * 3.12 * 0.02656}{0.001}$$

$$Re = 82452.86$$

Factor de friccion y tubos lisos de acero inoxidable , usamos la ecuacion de Blasius por el flujo turbulento

$$f = \frac{0.316}{82452.86^{0.25}}$$

$$f = 0.019$$

Perdidas de carga por metro de la longitud:

$$\mathrm{h}_l = 0.019 * \frac{5m * (3.12\frac{m}{s})^2}{0.02664m * 2 * 9.81\frac{m}{s^2}}$$

$$\mathrm{h}_l = 1.81m.c.a.$$

4.6.3. Cálculo de perdida de accesorios

$$h_l = K * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde

- K: Coeficiente de resistencia del accesorio
- Ft: factor de fricción, para acero comercial de 1”:

$$K_{individual} = 0.75$$

Por la cantidad de codos, nos resulta

$$K_{accesorios(codos)} = K_{individual} * N_{accesorios(codos)}$$

$$K_{accesorios(codos)} = 0.75 * 2$$

$$K_{accesorios(codos)} = 1.5$$

Por el ingreso al condensador , perdida por contraccion brusca de 1” a 3/4”

$$K_{ingreso} = 1$$

Por salida del condensador

$$K_{salida} = 0.5$$

La perdida de carga por accesorios , se denota por lo siguiente

$$h_l = 2 * \frac{(3.12\frac{m}{s})^2}{2 * 9.81\frac{m}{s^2}}$$

$$h_l = 0.99 m.c.a.$$

La carga total , en perdidas por tuberias , tubos internos del condensador y accesorios

$$H_{TOTAL} = \Delta h_{tubos} + \Delta h_{tuberia\ de\ condensador} + \Delta h_{accesorios} + \Delta z_{altura}$$

$$H_{TOTAL} = 1.172 + 1.81 + 0.99 + 1$$

$$H_{TOTAL} = 4.97 m.c.a.$$

4.6.4. Cálculo de la bomba de impulsión

$$P_{HIDRAULICA} = \rho * \ g * Q * H$$

Donde

- ρ : Densidad del agua: 995 $\frac{kg}{m^3}$
- g : gravedad ($9.81\frac{m}{s^2}$)
- Q : caudal volumetrico $\frac{m^3}{s}$
- H : altura manometrica m.c.a

$$P_{HIDRAULICA} = \rho * \ g * Q * H$$

$$P_{HIDRAULICA} = 995\frac{kg}{m^3} * 9.81\frac{m}{s^2} * 0.00172\frac{m^3}{s} * 4.97m$$

$$P_{HIDRAULICA} = 83.44\ W$$

Potencia real del motor de la bomba

η : rendimiento de bombas centrifugas pequeñas < 1hp (0.5-0.7)

$$P_{motor} = \frac{P_{HIDRAULICA}}{\eta}$$

$$P_{motor} = \frac{83.44\ W}{0.5}$$

$$P_{motor} = 166\ W$$

$$P_{motor} = 0.22\ HP$$

Selección comercial bomba centrifuga de 1/3 hp , AISI 304 Q= 6-7 $\frac{m^3}{h}$ H =5.5-6.5 m.c.a.(ANEXO 4)

4.6.5. Cálculo de recipiente de agua

Para el desarrollo tenemos que el sistema es cerrado – recirculación

$$Q = 0.00172\ \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 6.192\ \frac{m^3}{h}$$

Para 10 minutos

$$V = 6.192\ \frac{m^3}{h} * 10min * \frac{1h}{60min}$$

$$V = 1.032\ m^3$$

El volumen del cilindro es de $1.032m^3$

$$V = \pi * (r')^2 * h$$

Para el desarrollo le asumiremos de h: 0.9 m, el radio del recipiente del agua será según la ecuación.

$$r' = \sqrt{\frac{1.032m^3}{\pi * 0.9m}}$$

$$r' = 0.6\ m$$

4.7. Diseño y cálculo de Separador vertical bifásico

4.7.1. Teoría del Separador Vertical

Para el diseño de separadores verticales bifásicos, la literatura técnica recomienda el uso de correlaciones empíricas ampliamente validadas, como las propuestas en el GPSA Engineering Data Book, las cuales permiten estimar la velocidad máxima admisible del gas mediante la correlación de Saunders–Brown. Esta metodología es utilizada para prevenir el arrastre de gotas líquidas y constituye uno de los criterios fundamentales en el dimensionamiento del separador (GPSA, 1998).

Para el presente estudio, se ha seleccionado una presión de operación de aproximadamente 151,95 kPa y una temperatura de operación de 317 K, valores compatibles con las condiciones del proceso de pirólisis. Asimismo, se adopta un factor de corrección K = 0.9, con el fin de ajustar las correlaciones de diseño a las condiciones reales de operación del sistema y asegurar un desempeño seguro y eficiente del separador vertical.

4.7.1.1. Parámetros de calculo

Tabla 23

Parámetros iniciales de diseño del separador vertical bifásico

Variable	Valor	Unidad
Temperatura de Operación	317	K
Presión de Operación	150	kPa
Corrección de K	0.9	-
Caudal del vapor	0.0045	m3/s
Viscosidad del liquido	0.0017	Pa.s
Densidad del liquido	822.5	kg/m3
Densidad del vapor	1.345	kg/m3

Nota. Elaboración propia

4.7.2. Constante de Corrección de Souders-Brown.

La correlación de Saunders–Brown es utilizada para estimar la velocidad máxima admisible del gas en separadores bifásicos, con el fin de evitar el arrastre de gotas líquidas (GPSA, 1998).

El valor de K seleccionado es 0,35 ft/s o 0,11 m/s. Con base en la tabla, el factor de corrección es de 0,9 acorde a la presión de operación.

- Tipo de interno para la separación terciaria (caja de chicana o malla de alambres)
- Presión operación
- Geometría del separador

Tabla 24

Valores típicos de K y Factor de corrección (GPSA, 1998)

Criterio	Tipo / Condición	Valor
Tipo de separador	Horizontal	0.40 – 0.50 ft/s
	Vertical	0.18 – 0.35 ft/s
	Esférico	0.20 – 0.35 ft/s
Ajuste del factor K por presión	Atmosférica	100 %
	150 psi	90 %
	300 psi	85 %
	600 psi	80 %

Nota. Los valores del factor K se emplean en el dimensionamiento de separadores gas-líquido, considerando tanto el tipo de equipo como la influencia de la presión sobre la eficiencia del proceso de separación.

Por lo que K será de 0,18 ft/s o 0,11 m/s para el diseño del separador vertical

$$K_{correguido} = \mathrm{k} * \mathrm{V} \tag{32}$$

$$K_{correguido} = 0.9 * 0.11\mathrm{m/s}$$

$$K_{correguido} = 0.099\mathrm{m/s}$$

4.7.3. Velocidad terminal de partícula.

La velocidad terminal de sedimentación de las gotas líquidas es un parámetro fundamental para el diseño de separadores verticales, ya que permite verificar la eficiencia de la separación gravitacional (Towler & Sinnott, 2022).

Durante la separación secundaria por gravedad, la velocidad admisible que el gas puede tomar debe estar basada en la velocidad terminal a la cual la partícula líquida cae (GPSA, 1998).

La ecuación, indica la velocidad máxima de caída que alcanza una gota de líquido en un medio gaseoso estático bajo la fuerza de la gravedad.

$$V_t = K_{correguido}\sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (33)$$

- g = gravedad, m/s2
- ρ_l= densidad de la fase líquido, kg/m^3
- ρ_g= densidad de la fase gas, kg/m^3

$$V_t = 0.099\frac{m}{s}\sqrt{\frac{(822.5\frac{kg}{m^3} - 1.345\frac{kg}{m^3})}{1.345\frac{kg}{m^3}}}$$

$$V_t = 2.45\frac{m}{s}$$

Tabla 25

Porcentaje corrección de velocidad terminal diseño de separadores bifásicos (GPSA, 1998)

Condición	%V_t usado	V_{real}(Típico)
Caso General GPSA	75 %	$V_{real} \leq 0.75 * V_t$
Depurador de succión del compresor	70-80 %	$V_{real} \leq (0.7 - 0.8) * V_t$
Servicio sucio (Conservador)	60%	$V_{real} = 0.6 * V_t$

Nota. Los valores de los porcentajes usados del $\boldsymbol{V_t}$; rangos de GPSA Sec 7-3

- Evitar la saturación, garantiza el separador no trabaje al límite de su capacidad
- Compensar el slugging, absorbe los tapones de líquido(slugs) típicos en flujos bifásicos

$$V_{real} = 0.6 * 2.45\ \frac{m}{s}$$

$$V_{real} = 1.47\frac{m}{s}$$

- V<1.47 m/s; conservador, está en el límite estable, GPSA estándar ok
- V<1 m/s; la separación de productos es excelente, pero el dimensionamiento del separador es excesivo.

- V>1.47 m/s; si opero a mayores el arrastre de líquido, las gotas no alcanzan a caer, baja la eficiencia, corrosión y erosión en el demister

4.7.4. Diámetro del Separador.

El diámetro del separador se determina a partir del caudal de gas y la velocidad terminal admisible, siguiendo la metodología recomendada por el GPSA Engineering Data Book (GPSA, 1998).

Para el cálculo se hace uso de la siguiente formula (GPSA, 1998):

$$\mathrm{D} = \sqrt{\frac{4*Q_v}{\pi*V_t}} \tag{34}$$

Donde:

- Qv = caudal de gas, m3/s
- V_t = velocidad terminal, m/s

$$\mathrm{D} = \sqrt{\frac{4*0.045}{\pi*2.45}}$$

$$\mathrm{D} = 0.15\mathrm{m}$$

4.7.5. Coeficiente de arrastre (Cd/Re).

El coeficiente de arrastre permite identificar el régimen de flujo de las gotas líquidas y validar la correlación utilizada para la estimación de la velocidad terminal (GPSA, 1998).

$$\frac{Cd}{Re} = \frac{4*g*(\rho_l-\rho_g)*\mu}{3*\rho_g^2*V_t^3} \tag{35}$$

$$\frac{C_d}{R_e} = \frac{4*9.81\frac{m}{s}*\left(822.5\frac{kg}{m^3}-1.345\frac{kg}{m^3}\right)*0.0017Pa*s}{3*(1.345\frac{kg}{m^3})^2*(0.11\frac{m}{s})^3}$$

$$\frac{C_d}{R_e} = 0.50$$

$$C_d = \frac{18.5}{{R_e}^{0.6}} \tag{36}$$

$${R_e}^{1.6} = \frac{18.5}{0.50}$$

$$R_e = 9.55$$

$$C_d = 18.5 * {R_e}^{-0.6}$$

$$C_d = 18.5 * 9.55^{-0.6}$$

$$C_d = 4.77$$

Tabla 26

Leyes de coeficiente de arrastre (GPSA, 1998)

Ley	Rango	Límites	Ecuación de cálculo
Ley de Newton	$(2 * 10^{-6} - 8 * 10^{-4})$	$500 \leq Re \leq 200000$ $Dp \geq 1000\mu m$	0.44
Ley Intermedia	$8 * 10^{-4} - 6 * 10$	$2 \leq Re \leq 500$ $100 \leq Dp \leq 1000\mu m$	$18.5 \left(\frac{Cd}{Re}\right)^{\frac{3}{8}}$
Ley de Stokes	$> 6 \times 10^{0}$	$Re > 2$ $3 \leq Dp \leq 100\mu m$	$\left(\frac{24 * Cd}{Re}\right)^{\frac{1}{2}}$

Nota. La tabla presenta las leyes de arrastre aplicables en el análisis de partículas en función del número de Reynolds y el diámetro de partícula, utilizadas en el diseño y dimensionamiento del sistema de separación.

4.7.6. Diámetro de la partícula

$$V_t = \frac{3.54 * g^{0.71} * (\rho_l - \rho_g)^{0.71} * {D_p}^{1.14}}{\rho_g * g^{0.29} * \mu^{0.43}} \tag{37}$$

$$2.45\frac{m}{s} = \frac{3.54 * (9.81)^{0.71} * \left(822.5\frac{kg}{m^3} - 1.345\frac{kg}{m^3}\right)^{0.71} * {D_p}^{1.14}}{(1.345\frac{kg}{m^3})^{0.29} * (0.0017\text{Pa.s})^{0.43}}$$

$$D_p = 262\ \mu m$$

4.7.7. Tiempo de residencia.

El tiempo de residencia del líquido en el separador se determina según los criterios establecidos por la norma API SPECIFICATION 12J, en función de la gravedad API del fluido (API, 2008).

$$API = \frac{141.5}{\rho_r} - 131.5$$

Donde:

ρ_r = densidad relativa del fluido, adimensional

$$\rho_r = \frac{822.5\frac{kg}{m^3}}{997\frac{kg}{m^3}}$$

$$\rho_r = 0.824$$

$$API = \frac{141.5}{0.824} - 131.5$$

$$API = 40.22$$

Tabla 27

Tiempo de residencia en separadores bifásicos en función del API (API SPECIFICATION 12J)

Densidad API	Tiempo (min)
API ≥ 35	1
30 ≤ API < 35	1 – 2

API < 30	2 – 4

Nota. La tabla muestra el tiempo de residencia requerido en función de la densidad API del fluido, siendo necesario mayor tiempo de separación para fluidos más pesados.

De acuerdo a los criterios de API, El tiempo de residencia será de 1 minuto según adjunto la tabla.

4.7.8. Volumen de Residencia.

El volumen de residencia se calcula a partir del tiempo de permanencia del fluido y el caudal de líquido que ingresa al separador (GPSA, 1998).

$$Q_l = \frac{Vr}{Tr} \tag{36}$$

Donde:

- Q_l = caudal de líquido que ingresa, m3/s
- V_r = volumen de residencia, m3
- T_r = tiempo de residencia, s

$$Vr = 60\ \text{s} * 0.0045 \frac{m^3}{s}$$

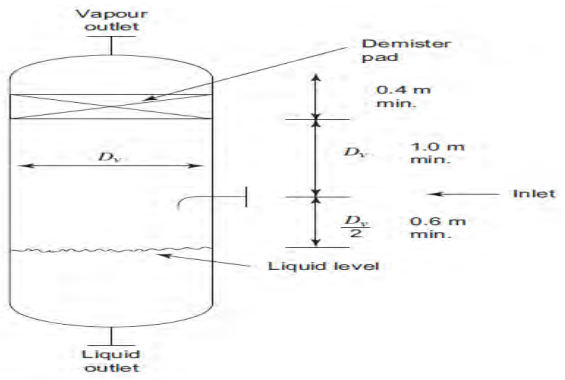
$$Vr = 0.27 m^3$$

4.7.9. Alturas del separador.

Las alturas internas del separador se establecen de acuerdo con las recomendaciones de la norma API SPECIFICATION 12J y manuales de diseño industrial, con el fin de garantizar una adecuada separación y control del nivel de líquido (API, 2008; GPSA, 1998).

Figura 21

Esquema de separador vertical gas–líquido y criterios de diseño geométrico



Nota. Altura recomendada de demister, 6 in (GPSA, 1998).

La altura mínima del eliminador de niebla (demister) se establece en **1/2 pulgada (12-15 mm)**, de acuerdo con las recomendaciones del GPSA (1998).

Adicionalmente, de acuerdo con los criterios de diseño establecidos por el American Petroleum Institute y la Gas Processors Suppliers Association (API, 2008; GPSA, 1998), se consideran las siguientes recomendaciones para el dimensionamiento del separador:

- Línea de tangencia – nivel de líquido más bajo (LLLL): Se recomienda una distancia mínima de 150 mm cuando la descarga es inferior, y 300 mm cuando la salida es lateral.
- LLLL – LLL (nivel bajo de operación): Para separadores verticales se recomienda un mínimo de 150 mm (o un tiempo de residencia de 1 a 2 minutos); en separadores horizontales, 100 mm.
- LLL – NLL – HLL (niveles de operación): Se recomienda una distancia total mínima de 300 mm, distribuida como 150 mm entre LLL y NLL, y 150 mm entre NLL y HLL.

- HLL – HHLL (nivel alto y alto-alto): Para separadores verticales se recomienda un mínimo de 200 mm, mientras que en horizontales se recomienda 100 mm (o un tiempo de residencia de 1 a 2 minutos).
- Distancia hacia la salida de gas (en separadores horizontales sin demister): Se recomienda una separación mínima de 300 mm entre el nivel HHLL y la boquilla de salida de gas.

4.7.10. Eficiencia de Separación

Según el desarrollo del cálculo del separador bifásico, la eficiencia es óptima. La velocidad terminal al 60 % de la V_t= 1.47 m/s; el demister de malla SS316L, atrapa por inercia toda partícula mayor de 150 μm.

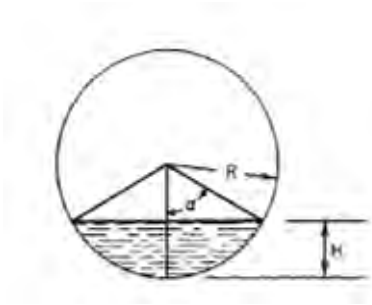
Según el GPSA-Seccion7-3, la eficiencia optima es 150 μm, la cual conlleva a una separación completa. (ANEXO 4)

4.7.11. Recipiente de Almacenamiento

Un tanque es un elemento geométrico, como es un cilindro. Para determinar el volumen, se debe calcularse por separado (Perry & Green, 1997).

Figura 22

Esquema geométrico del cilindro horizontal parcialmente lleno



Nota. La figura representa el tanque cilíndrico horizontal parcialmente lleno, donde R es el radio del cilindro y H corresponde a la profundidad del líquido almacenado.

$$V = \mathrm{L} * \mathrm{R}^2 \left(\frac{\alpha}{57.30} - sen\alpha * cos\alpha\right)$$

Donde:

- R: radio, 0.3 m
- L: longitud, 0.5 m
- H: profundidad del líquido, 0.12 m
- α : la mitad del ángulo incluido, grados

$$cos\alpha = \frac{\mathrm{R} - \mathrm{H}}{R} = \frac{0.3 - 0.12}{0.3}$$

$$\alpha = 53.13°$$

$$V = 0.5 * 0.3^2 \left(\frac{53.13}{57.30} - sen(53.13) * \cos(53.13)\right)$$

$$V = 0.5433 m^3$$

CAPÍTULO V: DISEÑO MECÁNICO DEL REACTOR

5.1. Diseño Mecánico del Reactor de Pirólisis

El diseño efectivo de un sistema de pirólisis para el tratamiento de llantas usadas exige un análisis térmico meticuloso, asegurando que el sistema no solo sea eficiente, sino también seguro en su operación. Este análisis involucra varios aspectos críticos:

5.1.1. Presión de Reactor

Los recipientes que cumplen los requerimientos para el correcto diseño de recipientes que operación con presión y temperatura.

Temperatura: Con respecto a la temperatura se debe colocar los máximos y mínimos no se debe exceder los límites establecidos en la tabla del material a utilizar

Presión de Operación ($P_{O)}$: Es identificada como la presión de trabajo y es la presiona manométrica a la cual estará sometido el sistema en operaciones normales

Presión de Diseño (P): Es el valor utilizado en ecuaciones para el cálculo de recipientes sometidos a presión.

Presión Hidrostática (Ph): La presión hidrostática del fluido es generada por la altura del producto, para determinar la presión de cualquier otro fluido diferente al agua se debe multiplicar a los valores de las tablas de densidad específica del fluido y su el peso específico del producto es menor a comparación del agua se debe utilizar el peso específico del agua para la presión hidrostática del producto.

Cálculo de presión para el diseño de reactor de pirólisis

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

Si: $P_o \leq 2068427.184\ [Pa]$ $\qquad P = P_O + P_H + 206842.77\ [Pa]$

Donde:

- P: Presión de diseño $[Pa]$.
- P_O: Presión de operación $[Pa]$.
- P_H: Presión hidrostática $[Pa]$.

Presión atmosférica en la ciudad del Cusco (3250 msnm). Se sugiere utilizar el siguiente valor practico representativo de la presión atmosférica en la ciudad del Cusco expresado en distintas unidades equivalentes

Po = 069 Bar =0.7 atm = 69 kPa

La presión atmosférica en la ciudad del Cusco, equivale al 70% de la presión a nivel del mar

Utilizaremos la 2da ecuación

$P = P_O + P_H + 206842.77\ [Pa]$

$$\mathrm{P} = 69000 + \frac{800\ kg}{m3} * \frac{9.81\ \ m}{s2} * 0.45m + 206842.77 \quad [\mathrm{Pa}]$$

$$\mathrm{P} = 279374.37[\mathrm{Pa}]$$

5.1.2. diseño cilíndrico del reactor

$$\mathrm{t} = \frac{\mathrm{PR}}{\mathrm{SE}-0.6\mathrm{P}} \tag{37}$$

$$P_{max} = \frac{\mathrm{SEt}}{\mathrm{R}+\ 0.6\mathrm{t}} \tag{38}$$

Si: $t \leq R/2$ o $P < 0.385$ SE

Donde:

- P: Presión de diseño [Pa].
- R: Radio interior de la tapa [m].
- E: Eficiencia de las uniones soldadas.
- S: Esfuerzo del material a la temperatura de diseño [MPa].
- t: Espesor del cuerpo cilíndrico [m].
- Pmax : Presion de trabajo máximo permisible [Pa].

Se realizo el cálculo: con las constantes de diseño

$$t = \frac{0.279\text{MPa} * 200\text{mm}}{110\ \text{MPa} * 1 - 0.6 * 0.279\text{MPa}}$$

$$t = 0.50mm$$

Consideraremos espesor comercial (1/4”), para la fabricación del reactor de pirólisis

Si: $t \leq R/2$ o $P < 0.385\ SE$

$$t_{real} = 6.35mm$$

$$\text{Pmax} = \frac{\text{SEt}}{\text{R} + \ 0.6\text{t}}$$

$$\text{Pmax} = \frac{110\text{MPa} * 1 * 6.35\text{mm}}{200\text{mm} + \ 0.6 * 6.35\text{mm}}$$

$$\text{Pmax} = 1920.83KPa$$

$$\text{Pmax} = 1.92\ MPa$$

5.1.3. Diseño de tapa de reactor

Para cerrar los extremos de los recipientes cilíndricos sometidos a presión, se emplean diversos tipos de cabezales que se adecuan a diferentes necesidades de diseño, presión y fabricación. Estas tapas se clasifican de acuerdo a su forma y funcionalidad, y cada tipo presenta

características particulares que influyen en la integridad estructural y la capacidad de soportar presiones internas o externas. Según León Estrada (2001)

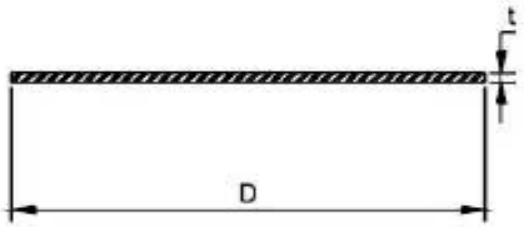
Entre estos, la **tapa plana** ha sido identificada como la mejor opción para el diseño del cabezal superior del reactor térmico principal debido a su capacidad para soportar mayores presiones.

Cálculos para Tapa Plana

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

Figura 23

Representación geométrica de la tapa plana circular sometida a presión interna



Nota. Se muestran los parámetros principales empleados para el dimensionamiento de la tapa plana: diámetro (D) y espesor (t).

Donde:

- D: Diámetro. [mm]
- C: Factor para el tipo de unión de la tapa (soldada u empernada). Para placas empernadas el factor
- C es de 0,162.
- P: Presión de diseño. [MPa]

- S: Esfuerzo máximo del material a la temperatura deseada. [MPa]
- E: Eficiencia de la Junta. Si no existen soldaduras longitudinales el valor es de 1
- t: espesor de la tapa. [mm]

Entonces remplazando:

$$t = D\sqrt{\frac{C*P}{S*E}} \tag{39}$$

$$t = 340\sqrt{\frac{0.162 * 0.279}{110 * 1}}$$

$$t = 5.9 \text{ mm}$$

Se realizará el sobre diseño de equipo, con un espesor estándar comercial ¼’’

Un recalculo de la presión máxima de trabajo con el espesor comercial

$$\text{Pmax} = 0.414\text{MPa}$$

5.1.4. **Cálculo de los Esfuerzos Permisibles**

Para un reactor rotativo vertical, los esfuerzos permisibles se calculan considerando varios factores críticos:

- **Material del Reactor:** Se seleccionan materiales con propiedades mecánicas adecuadas que puedan soportar las presiones y temperaturas involucradas en el proceso de pirólisis.
- **Condición de Operación:** Las condiciones específicas como la presión operativa máxima y la temperatura afectan directamente las propiedades del material y, por ende, los esfuerzos permisibles.

- **Factor de Seguridad:** Este es un componente crucial en el diseño para mitigar cualquier incertidumbre asociada con las condiciones de operación o las propiedades del material. El factor de seguridad depende de la criticidad de la función del reactor y de las normativas que deben cumplirse.

Normativas y Códigos

El Código ASME, en particular, ofrece guías detalladas sobre cómo determinar los esfuerzos permisibles para diferentes materiales y condiciones de operación. Estos valores están diseñados para asegurar que el reactor opere de manera segura durante su vida útil esperada, sin riesgo de falla bajo condiciones normales y extremas.

Según el código ASME, si el material seleccionado para el reactor tiene un límite elástico de 250 MPa a temperatura ambiente, el esfuerzo permisible podría establecerse en 110 MPa, considerando un factor de seguridad adecuado y la influencia de la temperatura de operación.

La tensión $\sigma 1$ 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 et al., 2020).

$$\sum Fz = 0 \tag{40}$$

$$\sigma 1(2t\Delta x) - p(2r\Delta x) = 0 \tag{41}$$

Al despejar el esfuerzo circunferencial $\sigma 1$ se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{t}} \tag{42}$$

- σ_1: esfuerzo circunferencial [Pa].
- p: presión de diseño [Pa].

- r: radio interior [m].
- t: espesor de la pared [m].

Para resolver los esfuerzos circunferenciales del reactor de pirólisis se calcula:

$$\sigma_1 = \frac{192000 * 0.20}{0.00635}$$

$$\sigma_1 = 60.47\ MPa$$

La tensión σ2 se denomina tensión o esfuerzo longitudinal, también se realiza el análisis del diagrama de cuerpo libre y se plantea el equilibrio (Beer et al., 2020)

$$\sum Fx = 0 \tag{43}$$

$$\sigma_2(2\pi rt) - p(\pi r^2) = 0 \tag{44}$$

Al despejar el esfuerzo longitudinal $\sigma 2$ se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_2 = \frac{\mathrm{Pr}}{2\mathrm{t}} \tag{45}$$

- σ2: esfuerzo circunferencial [Pa].
- p: presión de diseño [Pa].
- r: radio interior [m].
- t: espesor de la pared [m].

Para resolver los esfuerzos longitudinales del reactor de pirólisis se calcula:

$$\sigma_2 = \frac{1920000 * 0.20}{2 * 0.00635}$$

$$\sigma_2 = 30.24 MPa$$

5.1.5. Factor de seguridad

El factor de seguridad es un componente esencial en el diseño de recipientes a presión, como los reactores rotativos verticales. Este factor es un indicador de cuán "seguro" es un diseño contra el fallo, y se calcula para asegurar que el recipiente pueda soportar condiciones imprevistas o extremas sin fallar.

El factor de seguridad se establece mediante la ecuación:

$$FS = \frac{S}{\sigma_{máx}} \tag{46}$$

Donde:

- FS= Factor de seguridad
- S = Esfuerzo máximo permisible del material del cabezal a tensión y a la temperatura de diseño [MPa]
- $\sigma_{máx}$=Esfuerzo máximo calculado [MPa].

De acuerdo a los esfuerzos cálculos se tendrá lo siguiente:

$$FS = \frac{110\text{MPa}}{60.47\text{MPa}}$$

$$FS = 1.81$$

Esta ecuación asegura que el esfuerzo máximo permisible (la tensión máxima que el material puede soportar sin fallo) sea siempre mayor que el esfuerzo máximo calculado (la tensión esperada bajo condiciones normales de operación). El factor de seguridad, por tanto, proporciona un margen para manejar incertidumbres en las condiciones operativas o en las propiedades del material.

5.1.6. Cálculo de desplazamientos

Los desplazamientos representan al cambio geométrico (la deformación física en mm) que sufre el recipiente a presión debido a los esfuerzos internos causados por el fluido.

Propiedades del Acero Inoxidable 316L

- $E =$ Modulo de Elasticidad (193 GPa)
- $\nu =$ Coeficiente de Poisson (0.28-0.30)

El desplazamiento radial se establece mediante la ecuación:

$$\delta_r = \frac{P * R^2}{E * t}\left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

Donde:

- R: Radio. [0.2 m]
- P: Presión de diseño. [1.92MPa]
- t: espesor de la tapa. [6.35mm]
- L: longitud. [0.540m]

$$\delta_r = \frac{1.92 * (0.20)^2}{193000 * 0.00635}\left(1 - \frac{0.30}{2}\right)$$

$$\delta_r = 53.27\ \mu m$$

El desplazamiento longitudinal se establece mediante la ecuación:

$$\delta_L = \frac{P * R * L}{2 * E * t}(1 - 2\nu)$$

$$\delta_L = \frac{1.92 * 0.20 * 0.54}{2 * 193000 * 0.00635}(1 - 2 * 0.30)$$

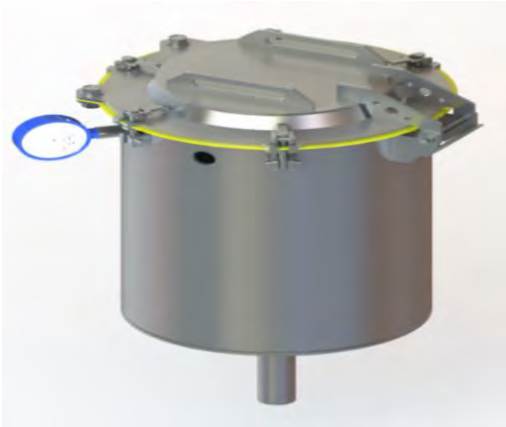
$$\delta_L = 13.54\ \mu m$$

5.1.7. Imagen del reactor y tapa

5.1.7.1. Ilustración Grafica del reactor y Tapa

Figura 24

Modelo tridimensional del reactor de pirólisis diseñado en SolidWorks

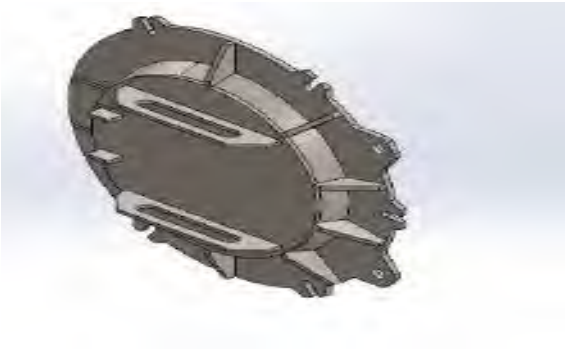


Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks

En la figura se presenta el modelo tridimensional del reactor de pirólisis, desarrollado mediante el software SolidWorks, el cual permite visualizar la geometría general, el sistema de cierre superior y los principales componentes estructurales del reactor.

Figura 25

Modelo tridimensional de la tapa del reactor de pirólisis



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks

En la figura se muestra el modelo tridimensional de la tapa del reactor de pirólisis, donde se aprecia el sistema de cierre perimetral y los elementos estructurales que garantizan la estanqueidad del reactor durante la operación.

5.1.8. Cálculo de Soldadura del Reactor

La soldabilidad en juntas disimiles entre aceros inoxidables austeníticos (AISI 304 y 316), utilizando el proceso del arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Los aceros inoxidables austeníticos contienen por lo menos el 18% de cromo y otros elementos de aleación, como níquel, molibdeno, titanio, para mejorar la resistencia a la corrosión y oxidación y para que a la alta temperatura mantengan sus propiedades mecánicas. La clasificación técnica AWS A5.4: E316L-16, emitida por American Welding Society (AWS), la cual es un electrodo de acero inoxidable Cr18Ni12Mo2 con revestimiento de tipo titanio-calcio. (Marulanda Arévalo, 2013)

Para la unión de la lámina de acero inoxidable AISI 316, se realizará un proceso de rolado de la misma y posterior soldadura electrodo E316L, la cual es el indicado para prevenir la sensibilización (precipitación de carburos de cromo), resistencia al calor, grietas y evitar la corrosión intergranular gracias a su bajo contenido de (C<0.04%) y elevada resistencia a la picadura en medios ácidos.

Tabla 28

Propiedades mecánicas de soldadura E316L

Propiedad Mecánica	Valor
Resistencia a la tracción (F_{EXX})	520MPa (75 Ksi)
Limite Elástico	420MPa (60.9 Ksi)
Elongación en 2” / 50 mm (A)	30%

Nota. La tabla muestra las especificaciones AWS A5.4/A5.4M (Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding), la sección de requisitos mecánicos de la ASME Section II Part C

El esfuerzo cortante admisible de la soldadura se establece mediante la ecuación:

$$\tau_{adm} = 0.30 * F_{EXX} \tag{46}$$

- F_{EXX}: resistencia a la tracción mínima

$$\tau_{adm} = 0.30 * 520\ MPa$$
$$\tau_{adm} = 156\ MPa$$

5.1.8.1. Parámetros iniciales

- Presión interna del Recipiente(P): 1.92 MPa
- Radio del reactor(R): 0.205 m
- Longitud del reactor(L): 0.540m

La fuerza total de tracción/separación se establece mediante la ecuación:

$$F_L = P * D * L$$
$$F_L = 1.92\ MPa * 0.410\ m * 0.540\ m$$
$$F_L = 425\ KN$$

El área efectiva de garganta a penetración completa 100% del espesor se establece mediante la ecuación:

$$A_w = 2 * L * t$$
$$A_w = 2 * 540\ mm * 6.35\ mm$$
$$A_w = 6858\ mm^2$$

El esfuerzo actuante en la soldadura se establece mediante la ecuación:

$$\sigma_w = \frac{F_L}{A_w}$$
$$\sigma_w = \frac{425\ KN}{6858\ mm^2}$$
$$\sigma_w = 61.97\ MPa$$

Tabla 29

Tabla de factor de seguridad (FS) según el código de diseño

Código/ Tipo de aplicación de soldadura	aplicación	Factor de Seguridad
ASME Sección VIII Div.	Recipientes a Presión	3.5-4.0
AWS D1.6 / AISC 360	Estructura de acero inoxidable	2.0- 3.0
ASME B31.3	Tubería de Proceso industrial	3.0 -3.5
Cargas dinámicas / Fatiga	Puentes, Estructuras con vibración	4.0 – 5.0

Nota. La tabla muestra especificaciones de ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII División 1 – Appendix 1 & UG-23

La verificación contra la capacidad del electrodo E316L, asimismo el esfuerzo admisible con factor de seguridad de (FS= 3.5)

$$\sigma_{adm} = \frac{F_{EXX}}{FS}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{520\ MPa}{3.5}$$

$$\sigma_{adm} = 148.5\ MPa$$

La corroboración de esfuerzo actuante y esfuerzo admisible

$$\sigma_w \leq \sigma_{adm}$$

$$61.97\ MPa \leq 148.5\ MPa$$

La geometría técnica de doble bisel en lamina de acero inoxidable AISI 316L de ¼” (6.35mm). Para dicho espesor la preparación de la junta en X (Doble V simétrica) reduce la distorsión angular y requiere menos material depositado

Tabla 30

Geometría técnica de doble bisel en ¼”

Parámetro de la Junta	Valor
Angulo de bisel por cara (exterior e interior)	30° a 35 °
Profundidad del bisel exterior	2.5mm
Profundidad del bisel interior	2.5mm
Talón de raíz central (Root Face)	1mm - 1.5 mm
Separación/ Luz de raíz (Root Gap)	1.5mm - 2.0 mm

Nota. La tabla muestra las especificaciones AWS A5.4/A5.4M, para láminas de acero de ¼”

Control metalúrgico del proceso SMAW para evitar la corrosión intergranular utilizar electrodo AWS A5.4 E316L-16/ E316L-15 (C≤0.04 %). Trabajar con amperaje bajo y velocidad constante. El control de temperatura interfase, debe mantener la junta por debajo de 150°C.

5.1.9. Cálculo de Soldadura de la Tapa del Reactor

La soldadura circunferencial que une el cuerpo cilíndrico de la tapa soporta la fuerza axial de empuje que intenta separar la tapa.

La fuerza de empuje axial se establece mediante la ecuación:

$$F_{axial} = P * \pi * R^2$$
$$F_{axial} = 1.92\ MPa * \pi * (0.205m)^2$$

$$F_{axial} = 253.48\ KN$$

El perímetro de la soldadura se establece mediante la ecuación:

$$P_{er} = \pi * D$$
$$P_{er} = 1288.05\ mm$$

La carga lineal sobre la soldadura se establece mediante la ecuación

$$q = \frac{F_{axial}}{P_{er}}$$
$$q = \frac{253.48\ KN}{1288.05\ mm}$$
$$q = 196.79\ \frac{N}{mm}$$

La capacidad de carga del cordón SMAW E316L (t= 6.35mm) se establece mediante la ecuación:

$$\sigma_{adm} = \frac{F_{EXX}}{FS}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{520\ MPa}{3.5}$$

$$\sigma_{adm} = 148.5\ MPa$$

$$q_{adm} = t * \sigma_{adm}$$

$$q_{adm} = 6.35\ mm * 148.5\ MPa$$

$$q_{adm} = 942.98\ \frac{N}{mm}$$

La corroboración de esfuerzo actuante y esfuerzo admisible:

$$q \leq q_{adm}$$

$$196.79\ \frac{N}{mm} \leq 942.98\ \frac{N}{mm}$$

5.2. Diseño de pernos de reactor de pirólisis

Un perno tiene como función principal unir dos piezas, en este caso unirá la tapa con el reactor. En esta parte se analizarán las deformaciones, cargas y ecuaciones para el diseño de pernos de sujeción.

5.2.1. Parámetros iniciales

- Presión interna del Recipiente: 1.92 MPa
- Diámetro del recipiente: 0.5 m
- Numero de pernos: 6 unidades M16*50 Clase10.9

$$F = P * A$$

$$F = \frac{\pi}{4}\ (0.5m)^2 * 192\ \text{MPa}$$

$$F = 377MN$$

$$P = \frac{377MN}{6}$$

$$P = 62.83\ KN$$

5.2.2. Área de esfuerzo a la tensión

Si un perno está sometido a cargas de tensión pura como se muestra en la figura, la resistencia estará limitada por el promedio de los diámetros menor dr y de paso dp. Entonces el área de esfuerzo por tensión está definida como:

$$A_t = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_p - d_r}{2}\right)$$

Donde:

$$d_p = d - 0.649519p$$

$$d_r = d - 1.226869p$$

d: diámetro exterior y p: paso en mm. El esfuerzo en el perno debido a una fuera de torsión axial se denota por lo siguiente:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t}$$

Características del perno M16*50

Tabla 31

Características dimensionales del perno M16×50

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Diámetro nominal	d	16	mm
longitud	l	50	mm
Paso de rosca	p	2	mm
Área de tensión	A_t	157	mm2
Diámetro de raíz	d_r	13.55	mm
Esfuerzo de prueba	S_P	830	MPa

*Nota***.** La tabla presenta las dimensiones principales del perno M16×50 consideradas para el cálculo del esfuerzo axial, donde d corresponde al diámetro nominal, l a la longitud, p al paso de rosca y At al área de tensión.

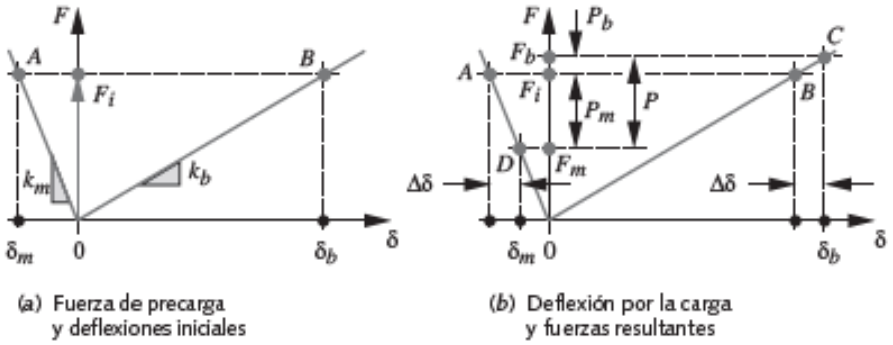
5.2.3. Cálculo de la precarga

Un perno tiene como función principal unir dos piezas, en este caso unirá la tapa con el reactor. En esta parte se analizarán las deformaciones, cargas y ecuaciones para el diseño de pernos de sujeción.

Para evitar la separación de las uniones, los pernos deben tener un apriete adecuado, la fuerza aplicada para dicho apriete es denomina precarga del perno. Cuando se somete a esta fuerza, su tracción y deformación aumenta. La fuerza sobre el perno al terminar el apriete se denomina fuerza inicial F_i. La deflexión δ_b del perno y δ_m del material están controladas por sus respectivas constantes de resorte y alcanzan los puntos A y B en sus respectivas curvas de carga-deflexión, como se muestra en la figura19. Considerando los supuestos de las magnitudes relativas k_b y k_m, el perno se estira más de lo que se comprime el material.

Figura 26

Fuerza de precarga y deflexiones iniciales



Nota. Extraído de Norton, 4ta Edición Diseño de maquinas

Comúnmente los pernos tienen una gran precarga, el esfuerzo de tracción es muy cercano a la resistencia límite del material Sp. Se espera que efectuar una gran precarga del perno, la fuerza

externa no aumente mucho el esfuerzo del perno, Norton recomienda para pernos con cargas estáticas:

$$S_i = 0.9\, S_p$$

Para la fuerza de la precarga del perno la ecuación será:

$$F_i = 0.9\, S_p\, A_t$$
$$F_i = 0.9 * 830MPa * \ 157mm^2$$
$$F_i = 107.27\, KN$$

5.2.4. Longitud de cuerda

La longitud de a cuerda esta estandarizada en el sistema ISO y se aprecia por la siguiente ecuación:

$$l_{cuerda} = 2d \ + 6$$
$$l_s = l_{perno} - l_{cuerda}$$
$$l_t = l - \ l_s$$

Según el perno, tenemos la siguiente:

Tabla 32

Longitudes características del perno M16×50

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Longitud de cuerda	l_{cuerda}	38	mm
Longitud de vástago	l_s	12	mm
Longitud de la cuerda	l_t	33	mm

Nota. Se presentan las longitudes geométricas del perno utilizadas para determinar la zona roscada y la zona de vástago en el cálculo de la tapa plana del reactor.

5.2.5. Rigidez en el perno

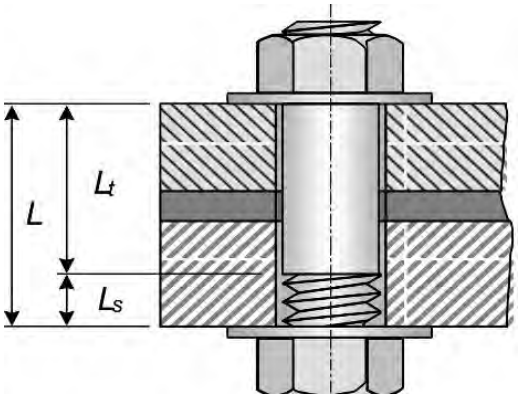
Comúnmente los pernos tienen una gran precarga, el esfuerzo de tracción es muy cercano a la resistencia límite del material Sp. Se espera que efectuar una gran precarga del perno, la fuerza

externa no aumente mucho el esfuerzo del perno, Norton recomienda para pernos con cargas estáticas

Para el cálculo de la constate de elasticidad del perno, se tomará en consideración que el perno esta roscado como se aprecia en la figura

Figura 27

Conjunto roscado con empaquetadura



Nota. Extraído de Norton, 4ta Edición Diseño de maquinas

Área de sección transversal del perno es:

$$A_g = \frac{\pi}{4}\,(d^2) = \frac{\pi}{4}\,(16^2)$$

$$A_b = 201mm^2$$

Tomando en cuenta los efectos de deflexión de la cabeza del perno, el cual podría ser mucho mayor que la rigidez teórica que esta dado por:

$$\frac{1}{K_b} = \frac{1}{A_t\,E} + \frac{1}{A_b E}$$

Por consiguiente, la constante elástica del perno se calculará por lo siguiente:

$$K^{\cdot\cdot}{}_b = \frac{A_t\, A_b}{A_b l_t + A_t l_s}\, E_b$$

Donde:

- A_b: área total de la sección transversal
- E: módulo de elasticidad del material del perno

$$K^{\cdot\cdot}{}_b = \frac{157mm^2 * 201mm^2}{201mm^2 * 33mm + 157mm^2 * 12mm}\, 200GPa$$

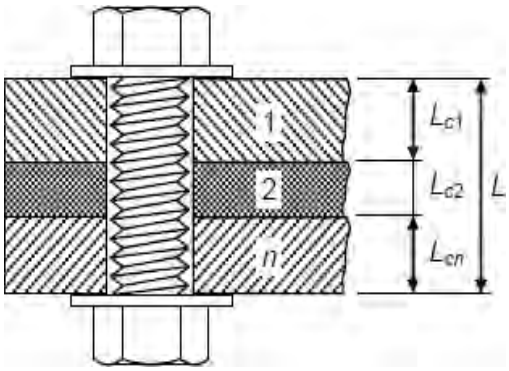
$$K^{\cdot\cdot}{}_b = 741\frac{MN}{m}$$

5.2.6. Cálculo de la rigidez de la junta Kc

La constante elástica de la junta se visualiza en la siguiente figura

Figura 28

Sistema de sujeción con múltiples juntas



Nota. Extraído de Norton, 4ta Edición Diseño de maquinas

Asimismo, las juntas compuestas por n materiales, se definen mediante la ecuación:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_{c1}} + \frac{1}{K_{c2}} + \cdots + \frac{1}{K_{cn}}$$

También se tiene lo siguiente:

$$k_{ci} = \frac{k_c * E_{ci}}{L_{ci}}$$

Donde:

- E_{ci} : módulo de elasticidad; L_{ci} : longitud

La rigidez de la junta se calcula por lo siguiente:

$$k_{m1} = \pi \left(\frac{(0.5m)^2 - (0.46m)^2}{4} \right) * \frac{200GPa}{6.35mm}$$

$$k_{m1} = 949.90 \frac{MN}{m}$$

Particularmente se utilizan empaquetaduras para sistemas de unión por bridas, existen confinadas y sin confinar. Si cuenta con empaquetadura sin confinar la ecuación se define por lo siguiente:

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_f^2 - D_p^2}{N_{perros}} \right)$$

$$k_g = \frac{A_g * E_g}{t}$$

Donde:

- A_g : área real de la empaquetadura;
- E_g : módulo de elasticidad de la empaquetadura(1380MPa)
- t: espesor 1/8”: 0.003175m

La rigidez de la empaquetadura – grafito puro expandido:

$$A_g = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0.5^2 - 0.46^2}{6} \right)$$

$$A_g = 0.005m^2$$

$$k_g = \frac{0.005m^2 * 1380MPa}{0.003175m}$$

$$k_g = 2173.23\frac{MN}{m}$$

$$k_g = k_{m2} = 2173.23\frac{MN}{m}$$

Aplicando la fórmula de juntas compuestas, se desarrolla:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_{c1}} + \frac{1}{K_{c2}}$$

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{949.90} + \frac{1}{2173.23}$$

$$K_m = 660.98\frac{MN}{m}$$

5.2.7. Factor de rigidez de la junta

La constante de rigidez de la junta, debe ser menos a 1. Si K_b; es pequeño comparado a K_m , será una fricción mínima.

$$C = \frac{K_b}{K_m + K_b}$$

$$C = \frac{741}{660.98 + 741}$$

$$C = 0.53$$

5.2.8. Carga compresión en el material y tensión en el perno

La carga aplicada P, está dividida en dos componentes, una P_m tomada por el material y otra P_b tomada por el perno

$$P = P_m + P_b$$

La carga de compresión en el material después de aplicar una carga externa es:

$$F_m = F_i - P_m$$

La carga de tensión sobre el perno se denota por lo siguiente:

$$F_b = F_i + P_b$$

Para hallar la fuerza total sobre el perno y la junta, en la figura; se obtiene el cambio común en la deflexión $\Delta\delta$ debido a la carga aplicada P:

$$P_b = K_b \, \Delta\delta$$

$$P_m = K_m \, \Delta\delta$$

$$P_b = \frac{K_b}{K_m} P_m$$

De la expresión se la sustituye y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$P_b = \frac{K_b}{K_m + K_b} P = CP$$

$$P_m = \frac{K_m}{K_m + K_b} P = (1 - C)P$$

Reemplazando la carga de compresión del material y tensión en el perno, se obtiene:

$$F_b = F_i + P_b = F_i + CP$$

$$F_b = F_i + (1 - C)P$$

Finalmente se calculará el esfuerzo de tensión máxima, para calcular el factor de seguridad.

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b}$$

La carga requerida para separar juntas:

$$P_0 = \frac{F_i}{1 - C}$$

Factor de seguridad de separación

$$N_{separacion} = \frac{P_0}{P}$$

Tabla 33

Resumen de parámetros de carga de compresión en el material y tensión en el perno

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Carga aplicada en el perno	P_b	33.30	KN
Carga aplicada en el material	P_m	29.53	KN
Fuerza de tensión sobre el perno	F_b	150.57	KN
Fuerza de tensión sobre el material	F_m	87.84	KN
Esfuerzo ejercido sobre el perno	σ_b	876.24	MPa
Carga requerida para separar las juntas	P_o	228.23	KN
Factor de seguridad contra la fluencia	N_y	1.17	-
Factor de seguridad de separación	$N_{separacion}$	3.63	-

Nota. Elaboración propia

El factor de seguridad calculado contra la separación de las placas es el adecuado, con respecto al factor de seguridad contra la fluencia es baja, ya que el perno se lo precargo a una carga cercana a la resistencia de fluencia.

5.3. Diseño mecánico del Condensador

Para el presente estudio, se ha seleccionado una presión de operación de aproximadamente 1.6 MPa

Tabla 34

Parámetros iniciales de diseño mecánico del condensador

Variable	Valor	Unidad
Presión de Operación	1.6	MPa
Temperatura de Operación	773	K
Esfuerzo del material a la temperatura de diseño (AISI 304)	93	MPa
Radio del recipiente	0.13	m
Eficiencia de las uniones soldadas	1	-

Nota. Elaboración propia

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

- C : sobre espesor por la corrosión (mm)

$$t = \frac{1.6\text{MPa} * 130\text{mm}}{93\text{MPa} * 1 - 0.6 * 1.6\text{MPa}} + 2\ mm$$

$$t = 4.31mm$$

El seleccionamiento de la placa comercial de acero ¼" (6.35 mm); para procesos industriales, tanques y condensadores tubulares

5.4. Diseño mecánico del Separador Bifásico

Los separadores verticales están recomendados para una mezcla que consta de dos fases y bajo caudal, la presión de 250 kPa (Towler y Sinnot, 2008).

Para el diseño para separadores verticales típicas de operación, comunes por separación por gravedad es de 250 kPa (GPSA, 1998)

Tabla 35

Parámetros de diseño mecánico del separador bifásico

Variable	Valor	Unidad

Presión de Operación	250	kPa
Temperatura de Operación	473	K
Esfuerzo del material a la temperatura de diseño (AISI 304, T:200 °C)	138	MPa
Diámetro del recipiente	0.15	m
Eficiencia de las uniones soldadas	1	-

Nota. Elaboración propia

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C \tag{47}$$

Donde:

- C : sobre espesor por la corrosión (mm)

$$t = \frac{0.25\text{MPa} * 75\text{mm}}{138\text{MPa} * 1 - 0.6 * 0.15\text{MPa}} + 2\ mm$$

$$t = 2.14\ mm$$

El seleccionamiento de la placa comercial de acero ¼", por temas del proceso de hidrocarburos, corrosión, estándar y ampliamente seguro.

5.5. Diseño y cálculo de accionamiento y transmisión

El diseño de sistemas de accionamiento y transmisión en un reactor rotativo vertical es crucial para garantizar la operación eficiente y segura del equipo. Este sistema es responsable de transmitir potencia desde la fuente motriz (como un motor eléctrico) hasta el mecanismo rotativo del reactor, permitiendo el movimiento controlado y constante necesario para el proceso de pirólisis.

5.5.1. Condiciones iniciales (velocidad de rotación)

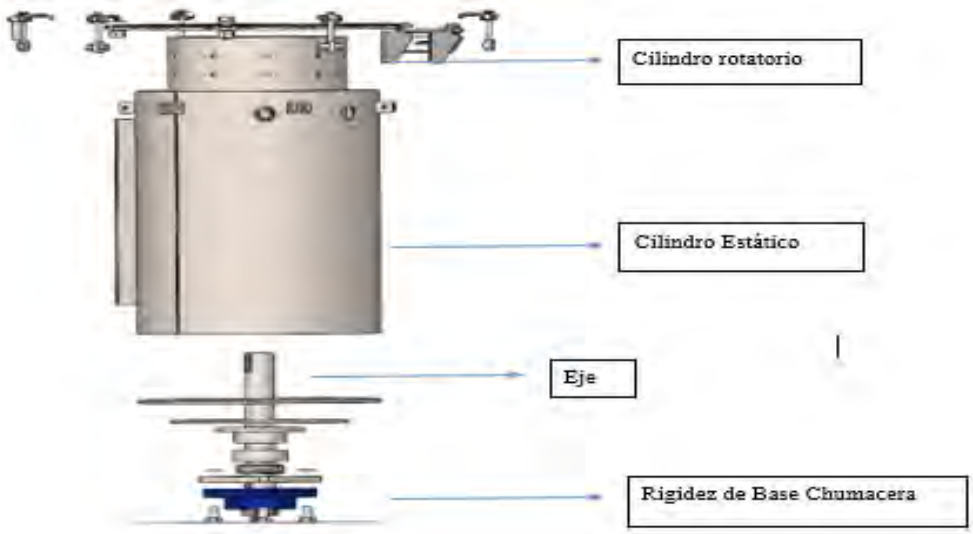
En el diseño y configuración del reactor rotativo vertical para pirólisis, la selección de la velocidad de rotación es un factor crítico que influye directamente en la eficiencia del proceso.

Selección de Velocidad: Dado que no se dispone de un valor específico de velocidad para esta aplicación particular, se propone una velocidad inicial de 10 rpm. Esta decisión se basa en las prácticas estándar observadas en la industria para procesos similares, donde se manejan velocidades bajas para asegurar una adecuada agitación del material sin comprometer la integridad estructural del reactor ni la calidad del proceso de pirólisis. Si el sistema, tendría velocidades excesivamente altas podrían resultar en una menor eficiencia térmica y una distribución desigual del calor

5.5.2. Cálculo de momento de inercia, torque y potencia

Figura 29

Componentes del sistema de rotación del reactor de pirólisis para el análisis de momento de inercia, torque y potencia



Elaboración propia.

5.5.2.1. Cálculo de torque necesario para el giro

$$T = I * \omega \tag{48}$$

- $T = Torque\ (Nm)$
- $I = Inercia\ (Kg * m^2)$

- $\omega = Velocidad\ angular\ \left(\frac{rad}{s}\right)$

La inercia se puede determinar de la siguiente manera

$$I = WK^2 \tag{49}$$

- W= peso del rotor Kg)
- K = Radio de giro (m)

Tabla 36

Peso de componentes y radio de giro

Pieza	Radio de giro	Peso
	$K = \sqrt{\frac{0.017^2 + 0.014^2}{2}} = 0.0145$	**15.53 kg**
	Plancha y eje	**8.59 kg**
Masa de material	Granulos de caucho	**20 kg**

Nota. Parámetros utilizados para el cálculo del momento de inercia del sistema rotatorio. Elaboración propia.

$$I = WK^2$$

$$I = (15.53kg + 20kg + 15.53kg) * 0.0145^2$$

$$I = (50kg) * 0.0145^2$$

$$\boldsymbol{I = 1.051kg * m^2}$$

Sutituyendo en la ecuacion:

$$T = 1.051kg * m^2 * \frac{10rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60seg}$$

$$T = 1.1Nm$$

Para conocer la fuerza:

$$T = Fxr \tag{50}$$

$$F = \frac{1.1Nm}{0.15m} = \mathbf{7.3N}$$

La potencia pude determinarse de la siguiente manera:

$$Pot = T * \omega \tag{51}$$

$$Pot = 1.1Nm * 1.04\frac{rad}{s} = 1.15watt$$

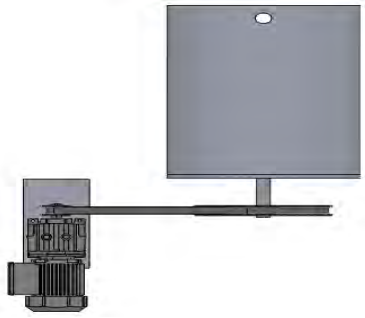
Del catalogo Sew euro drive se selecciona el siguiente motor: ANEXO 5

5.5.3. Calculo y selección de correa y poleas

5.5.3.1. Selección de transmision de correa

Figura 30

Sistema de transmisión por correa y poleas del reactor de pirólisis



Nota. Elaboración propia.

Como la velocidad del motor reductor es de 50 rpm se aplicara un sitema de reduccion de correa para reducir de 50 rpm a 10 rpm.

Transmisión de correas

Se tomará una potencia de (0.12Hp - 89 Watts)

Corrección de potencia transmitida.

De la tabla siguiente se puede apreciar los distintos valores para corregir la potencia real estos valores se adecuan a diferentes aplicaciones.

$$P_c = P * K \tag{52}$$

Donde:

- $P_c = Potencia\ corregida$
- $P = Potencia\ del\ generada\ por\ el\ rotor$
- $K = Factor\ de\ Servicio$ (1.2) …… ANEXO TABLA 5

Nota. Valores utilizados para ajustar la potencia de diseño según el tipo de máquina y condiciones de operación. Adaptado de catálogo técnico.

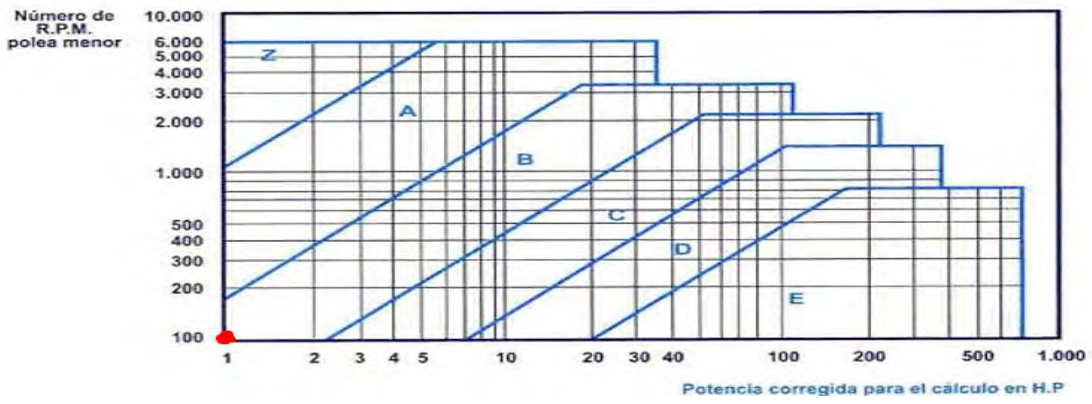
$$P_c = 0.12\ \text{HP} * 1.2$$

$$P_c = 0.104Kw = 0.14Hp$$

Con esta potencia de diseño ($0.14\ hp$) y las revoluciones con lo que es impulsado la polea motriz (50 RPM) se elige el tipo de banda, Lo cual se muestra en la siguiente imagen, correspondiente a correas métricas europeas.

Figura 31

Potencia corregida para el cálculo en H.P



Nota. Diagrama utilizado para la selección de la potencia corregida en función de la velocidad de la polea menor. Adaptado de catálogo técnico.

5.2.3.2. Selección de tipo de correa

Partiendo de la potencia y velocidad del motor se selecciona el tipo de correa para este caso será una correa **tipo B.**

5.2.3.3. Diámetro de poleas

Cálculo de relación de transmisión:

$$R = \frac{n_p}{N_P} \tag{53}$$

$$R = \frac{50Rpm}{10Rpm} = 5$$

Partiendo de la relación de transmisión se determinará el diámetro mayor de la polea partiendo de un diámetro menor.

$$d_m = 50mm$$

$$R = \frac{D_m}{d_m}$$

$$5 = \frac{D_M}{50mm}$$

$$D_m = 250\ mm$$

5.2.3.4. Distancia mínima entre ejes

De acuerdo a la experiencia de las empresas fabricantes, y con el objetivo de optimizar el rendimiento de la transmisión, la distancia entre ejes de poleas (E) mínima se puede obtener a partir de las siguientes expresiones:

$$E \geq \frac{(R+1)*d}{2} + D \tag{54}$$

Sustituyendo:

$$E \geq \frac{(5+1) * 50mm}{2} + 250mm$$

$$E = 400mm$$

Por lo tanto, la distancia mínima es de 400 mm.

5.2.3.5. **Longitud de la correa:**

La longitud primitiva de la correa (L_P) de una transmisión se calcula directamente a partir de la siguiente expresión:

$$L_P = 2E + \frac{\pi}{2}(d + D) + \left(\frac{(d-D)^2}{4E}\right) \quad (55)$$

Donde:

- E *es la distancia entre ejes de poleas*;
- d *es el diámetro de la polea menor*;
- D *es el diámetro de la polea mayor*;

$$L_P = 2(400) + \frac{\pi}{2}(50mm + 250mm) + \left(\frac{(50mm - 250mm)^2}{4 * 400mm}\right)$$

$$L_P = 1296.239mm$$

Con el resultado de $1296.239mm$ se procede a escoger una correa comercial del catálogo Dunlop.

5.5.3.2. Selección de correa comercial

Para una sección B la longitud primitiva mínima existente o comercial es de 1318 mm por lo tanto se escogerá este valor quedando de la siguiente forma. ANEXO TABLA 6

Correa trapezoidal Nº50 Sección B L=1318 mm

Con la nueva longitud se determina la nueva distancia entre centro de la siguiente ecuación:

$$1318\text{mm} = 2(Dc) + \frac{\pi}{2}(50mm + 250mm) + \left(\frac{(50mm - 250mm)^2}{4 * Dc}\right)$$

$$Dc = 411\text{mm}$$

5.5.3.3. Cálculo de velocidad de correa

Este procedimiento se aplicará para comprobar que la correa no supere el límite permisible para el perfil utilizado el cual es 30m/s para correas en V clásicas.

$$v = \frac{n_1 * \pi * d_1}{60000} \tag{56}$$

Donde:

- $n_1 = Rpm\ de\ polea$
- $d_1 = Diametro\ de\ polea$

Sustituyendo:

$$v = \frac{50Rpm * \pi * 50mm}{60000}$$

$$v = 0.13\frac{m}{s}$$

Correa trapezoidal Nº51 Sección B L=1318 mm

- Polea menor: $50mm$
- Polea mayor: $250mm$

5.5.4. Cálculo de eje de movimiento

5.5.4.1. Calculo de Momento flector y Torque

Conociendo el momento máximo Se procederá a determinar el diámetro mínimo requerido aplicando la teoría de falla sabiendo los siguientes parámetros:

- W: peso del rotor (Kg) (50 kg)
- R: Radio de cilindro rotatorio (m) (0.17m)
- N: velocidad de giro 10 RPM (1.047 rad/s)

La fuerza axial generado por el peso propio es lo siguiente

$$F = W * g$$

$$F = 50\ kg * 9.81\ m/s$$

$$F = 490.5\ N$$

El momento flector es lo siguiente:

$$M = F * R$$

$$M_a = 490.5\ N * 0.17m$$

$$M_a = 83.39\ N.m$$

El torque máximo es lo siguiente:

$$T = 1.1\ N.m$$

Para vencer la inercia y fricción del rodamiento, añadir el 30 %

$$T_m = 1.1\ N.m * 1.3$$

$$T_m = 1.43\ N.m$$

Para el eje, se escogerá un material SAE 1045 con las siguientes especificaciones:

Tabla 37

Propiedades físicas del SAE 1045

Propiedades generales	Simbología ASME	Valores
Limite elástico/fluencia	S_y	310 MPa
Esfuerzo ultimo	S_{ut}	570 MPa

Nota. Sumitec (2010). Soluciones sólidas y duraderas

5.5.4.2. Cálculo de límite de fatiga y esfuerzo admisible

Límite de fatiga:

$$S'_e = 0.5 * S_{ut}$$

$$S'_e = 0.5 * 570MPa = 285MPa$$

Límite de fatiga real usaremos la ecuación de Marin:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e$$

- k_a: factor de superficie (0.8) (eje maquinado)
- k_b: factor de tamaño (0.9) (diámetros menores < 50 mm)
- k_c: factor de carga (1) (flexión)
- k_d: factor de temperatura (1) (temperatura ambiente)
- k_e: factor confiabilidad (0.9) (90% diseño industrial estándar)
- k_f: factor de efectos diversos (1) (consideración de corrosión y esfuerzos residuales)

$$S_e = 0.8 * 0.9 * 1 * 1 * 0.9 * 1 * 285MPa$$

$$S_e = 184.7\ MPa$$

$$S_{adm} = \frac{S_e}{N}$$

Tabla 38

Factor de Seguridad recomendadas para construcción de maquinaria

Descripción	Factor de seguridad	Aplicación
Materiales bien conocidos. Cargas y esfuerzos bien conocidos	1.25-1.5	Estructuras estáticas
Materiales bien conocidos. Cargas y esfuerzos determinable condición promedio	1.5-2.0	Maquinas general
Material promedio. Carga y esfuerzos determinados con poca precisión	2.0-2.5	Componentes de maquinaria
Materiales subestándares. Carga y esfuerzos no determinados con precisión	2.5-3.0	Ejes rotatorios, fatiga
Materiales subestándares. Carga y esfuerzos no determinados, consecuencia de fallas criticas	3.0-4.0	Grúas, izajes y recipientes de presión

Nota. Joseph Vidosic, Machine Design Project

$$S_{adm} = \frac{184.7MPa}{3}$$

$$S_{adm} = 61.6MPa$$

5.5.4.3. Cálculo de diámetro mediante ASME-Elíptico

El cálculo de eje se realizará mediante ASME fatiga de ejes – Elíptico (Shigley et al., 2012)

$$\frac{1}{N} = \frac{16}{\pi \cdot d^3}\sqrt{4\left(\frac{k_f . M_a}{S_e}\right)^2 + 3(\frac{K_{fs} . T_m}{S_y})^2}$$

Despejando el diámetro obtenemos lo siguiente:

$$d = \left\{\frac{16. N}{\pi}\left[4\left(\frac{k_f . M_a}{S_e}\right)^2 + 3\left(\frac{K_{fs} . T_m}{S_y}\right)\right]^{1/2}\right\}^{1/3}$$

Donde

- M_a : Momento flector alternante (83.39 N.m)
- T_m: Torque medio de diseño (1.43N.m)
- S_{adm} : Esfuerzo de admisible a fatiga (61.6 MPa)
- d : Diámetro del eje (m)
- K_{fs} : Factor concentración torsión (1.3-1.6) (1.6) (ASME B106.1M)
- k_f : Factor concentración flexión (2.0-2.5) (2.3) (ASME B106.1M)
- S_e : limite de fatiga real (184.7 MPa)
- N : Factor de Seguridad (3)
- S_y: limite elástico de fluencia (310 MPa)

Sustituyendo en la ecuación de ASME ELIPTICO - estándar para ejes:

$$d^3 = \frac{16 * 3}{\pi}\sqrt{4\left(\frac{2.3 * 83.39 N.m}{184.7\ MPa}\right)^2 + 3(\frac{1.6. * 1.43 * N.m}{310\ \text{MPa}})^2}$$

$$d = \sqrt[3]{1.25 * 10^{-5} m^3}$$

$$d = 0.025m$$

$$d_{real} = 2.54cm \ = 1\, pulg$$

Figura 32

Geometría y dimensiones del eje seleccionadas para el sistema de accionamiento del reactor

Nota. Representación del eje utilizado en el sistema de transmisión, indicando sus dimensiones principales consideradas para el diseño mecánico. Elaboración propia.

5.5.5. Cálculo de rodamiento

5.5.5.1. Selección de rodamientos

Carga aplicada: 7.3N

A continuación, se presenta el Cálculo de carga equivalente: (Procedimiento extraído del catálogo SKF)

$$f \ = V(0.5)F_{rx} + (1.4)F_{Ay} \tag{58}$$

Donde:

- F=Carga equivalente
- V= Factor de rotación (V=1, si anillo interior gira)
- Fr= Carga radial.
- Fa=Carga axial

Para determinar la carga axial producida por la carga radial, se utilizará la siguiente expresión:

$$F_{Axial} = \frac{0.47(F_{Radial})}{K} \quad (59)$$

Donde: K es el coeficiente de carga entre las capacidades de carga radial y axial K= 1 Para cojinetes radiales.

$$F_{Axial} = \frac{0.47(7.3\text{N})}{1}$$

$$F_{Axial} = 3.43N$$

$$f = VXF_{rx} + YF_{Ay}$$

$$f = 0.50 * 1 * 7.3\text{N} + 1.4 * 3.43N$$

$$f = 8.33N$$

5.5.5.2. Cálculo de carga Base

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^P \quad (60)$$

Donde:

- L= Duración nominal expresada en millones de revolución
- C=Capacidad de carga base
- F= carga equivalente
- P= Factor de rodamiento se selecciona 3 para rodamientos radial

Para determinar L entramos a la siguiente tabla y elegimos “para un funcionamiento corto o discontinuo, arrojando las siguientes horas de servicio:

H = 300-3000

Tabla 39

Valores orientativos sobre la vida especificada de diferentes tipos de máquinas

Tabla

Valores orientativos de la vida especificada de los diferentes tipos de máquinas

Tipo de máquina	Vida especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad de funcionamiento: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadoras, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Maquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	100 000 ... 200 000

Nota. Valores referenciales utilizados para la estimación de la vida útil de equipos mecánicos. Adaptado de fuente técnica.

Para determinar la duración nominal se aplica la siguiente referencia:

$$L = 3000Hrs\,(\frac{50rev}{min})(\frac{60min}{hrs})$$

$$L = 9000000rev = 9 * 10^6$$

Despejando la capacidad de carga

$$C = \sqrt[p]{L} * F \qquad (61)$$

$$C = \sqrt[3]{9} * 8.33N.$$

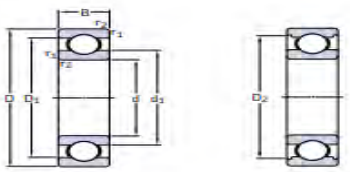
$$C = 24.98N$$

Ahora para la selección de rodamiento, utilizamos el manual interactivo de SKF, y al elegir el tipo adecuado debemos verificar que su capacidad de carga dinámica (C0) no sea menor que el anterior valor encontrado en el diseño para un eje de 25 mm.

Figura 33

Selección de rodamiento SKF 61805 a partir de catálogo técnico

Rodamientos rígidos de una hilera de bolas
d **25 – 35** mm



Dimensiones principales d	D	B	Capacidad de carga básica dinámica C	estática C_0	Carga límite de fatiga P_u	Velocidades Velocidad de referencia	Velocidad límite	Masa	Designación
mm			kN		kN	rpm		kg	–
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	**61805**
	42	9	7,02	4,5	0,193	30 000	22 000	0,043	**61905**
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,060	***16005**
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,080	***6005**
	52	9	10,6	6,55	0,28	28 000	18 000	0,078	**98205**
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	***6205**
	52	15	17,8	9,8	0,40	28 000	18 000	0,12	**6205 ETN9**
	62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	***6305**
	62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,21	**6305 ETN9**
	80	21	35,8	19,3	0,82	20 000	13 000	0,53	**6405**
28	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,18	**62/28**
	68	18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,29	**63/28**

Nota. Selección de rodamiento en función del diámetro del eje y capacidad de carga requerida. Adaptado de catálogo SKF.

Figura 34

Soporte con rodamiento autoalineable y base de cuatro pernos para eje de 1 pulgada

Nota. Soporte tipo chumacera con rodamiento autoalineable utilizado para el montaje del eje. Elaboración propia

5.6. Modelamiento del Reactor a Pirólisis

5.6.1. Análisis estático estructural e interpretación de reactor de pirólisis

Se realizó la simulación estructural del reactor de pirólisis mediante un análisis estático, considerando la presión de diseño establecida y las propiedades mecánicas del material AISI 316. Los resultados obtenidos permiten evaluar el comportamiento mecánico del reactor bajo condiciones de operación

5.6.1.1. Esfuerzos de von Mises

Figura 35

Análisis Von Mises del reactor térmico para presión de diseño

Nota. Elaboración propia con base en la simulación estructural del reactor en SolidWorks Simulation.

La figura presenta la distribución de las tensiones equivalentes de von Mises en el reactor térmico sometido a la presión de diseño. Se observa que las mayores concentraciones de esfuerzo se localizan principalmente en la zona superior del reactor, específicamente en la unión entre el cuerpo cilíndrico y la tapa, así como en las áreas cercanas a los elementos de sujeción. Estas

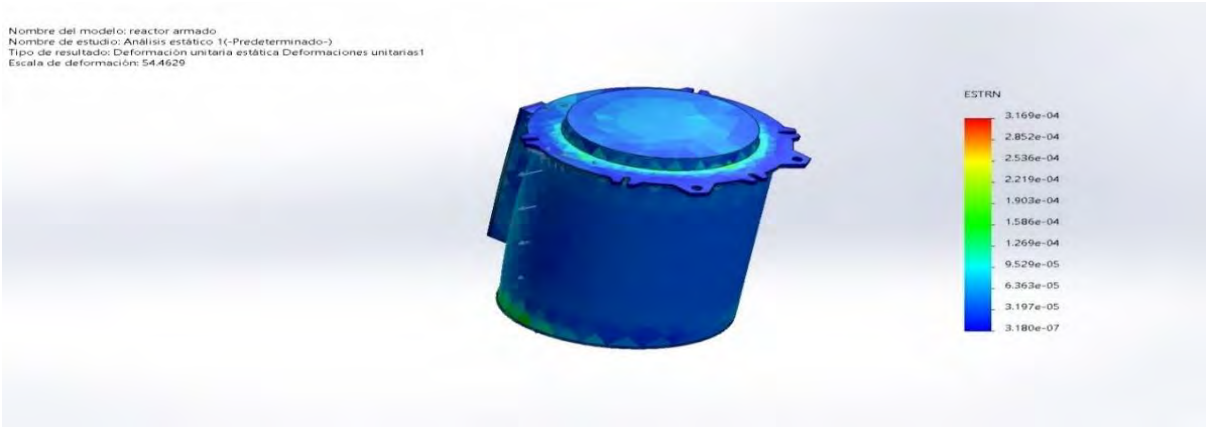
concentraciones son típicas en regiónes donde existen cambios geométricos y condiciones de restricción estructural.

El valor máximo de tensión obtenido se mantiene por debajo del límite elástico del material estructural empleado (acero inoxidable AISI 316), lo que indica que el reactor opera dentro del régimen elástico bajo las condiciones de carga evaluadas. En consecuencia, el diseño del reactor térmico no presenta indicios de falla por fluencia ni deformación plástica, confirmando que la estructura es mecánicamente segura para la presión de operación considerada.

5.6.1.2. Deformaciones Unitarias

Figura 36

Análisis de deformación del reactor térmico para presión de diseño



Nota. Elaboración propia con base en la simulación estructural del reactor en SolidWorks Simulation.

La figura muestra la distribución de la deformación unitaria equivalente (ESTRN) en el reactor térmico sometido a la presión de diseño. Se observa que los valores máximos de deformación se concentran principalmente en la zona superior del reactor, especialmente en la

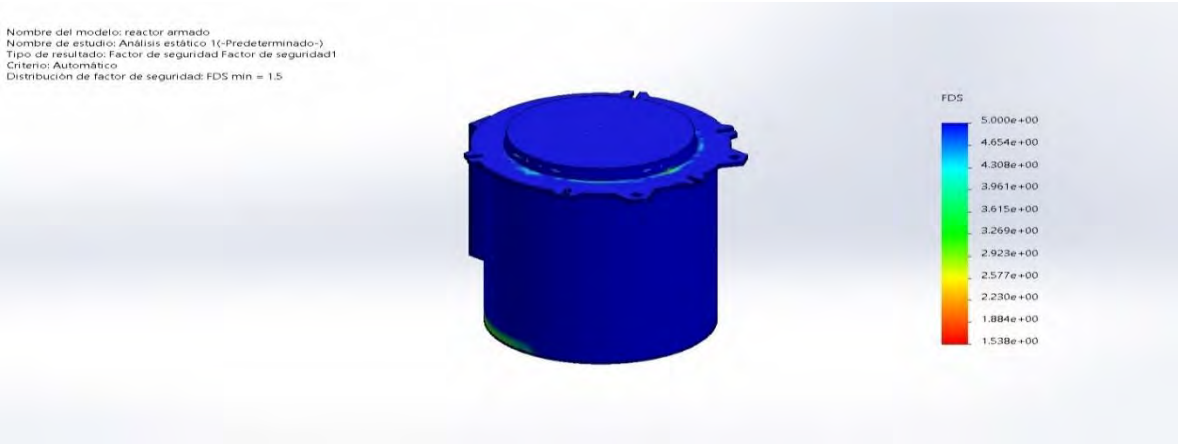
unión entre el cuerpo cilíndrico y la tapa, donde se producen mayores gradientes de esfuerzo debido a la geometría y a las condiciones de restricción estructural.

El valor máximo de deformación unitaria obtenido es del orden de 3.17×10^{-4}, lo cual se mantiene dentro de los límites admisibles para el material estructural empleado (acero inoxidable AISI 316), indicando que el reactor no experimenta deformaciones excesivas ni comportamiento plástico. En consecuencia, el diseño estructural del reactor térmico presenta un comportamiento mecánico adecuado y estable bajo las condiciones de presión de operación consideradas.

5.6.1.3. Factor de Seguridad

Figura 37

Análisis y evaluación del factor de seguridad del reactor térmico bajo presión de diseño



Nota. Elaboración propia con base en la simulación estructural del reactor en SolidWorks Simulation.

La figura presenta la distribución del factor de seguridad (FDS) del reactor térmico sometido a la presión de diseño. Se observa que la mayor parte de la estructura presenta valores elevados de factor de seguridad, evidenciados por la predominancia de tonalidades azules, lo que indica un comportamiento estructural seguro bajo las condiciones de carga evaluadas.

El valor mínimo del factor de seguridad obtenido es del orden de 1.53, localizado principalmente en las zonas de transición geométrica y cercanas a los puntos de restricción. Este valor cumple con el criterio mínimo de seguridad establecido para recipientes sometidos a presión, confirmando que el reactor térmico cuenta con un margen adecuado frente a la falla estructural. En consecuencia, el diseño del reactor resulta mecánicamente seguro y apto para operar bajo las condiciones de presión de diseño consideradas.

5.6.1.4. Analisis de Resultados del reactor

En la simulación, análisis de elementos finitos (FEA), realizada en SolidWorks para el reactor de espesor 1/4”, fabricada con material acero inoxidable 316, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. **Análisis de von Mises**:
    - El valor máximo de tensión obtenido es aproximadamente 121 MPa, el cual se mantiene por debajo del límite elástico del acero inoxidable AISI 316 (≈172 MPa).
2. **Análisis de Desplazamiento Unitario**:
    - El desplazamiento máximo observado fue de 3.17×10^{-4}, el cual es menor a lo permisible para la distancia más larga de la estructura.
3. **Factor de Seguridad Mínimo**:
    - El factor de seguridad mínimo calculado fue de 1.53. Este valor indica que la viga tiene un margen de seguridad adecuado bajo las condiciones de carga simuladas.

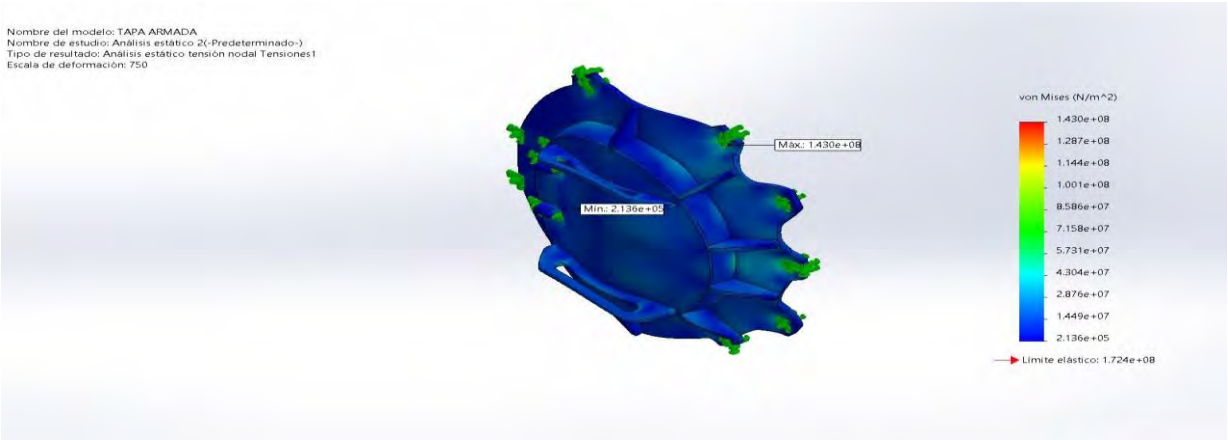
5.6.2. Análisis estático estructural e interpretación de la tapa del reactor

Con el objetivo de verificar el comportamiento estructural de la tapa del reactor de pirólisis bajo las condiciones de presión de diseño, se realizó un análisis estático mediante el software **SolidWorks Simulation**, considerando las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316 y las cargas aplicadas durante la operación.

5.6.2.1. Esfuerzos de von Mises

Figura 38

Análisis von Mises de la tapa del reactor para presión de diseño



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

La figura presenta la distribución de las tensiones equivalentes de von Mises en la tapa del reactor sometida a la presión de diseño. Se observa que las mayores concentraciones de esfuerzo se localizan principalmente en las zonas de curvatura y en los puntos de sujeción perimetral, donde existen cambios geométricos y restricciones estructurales.

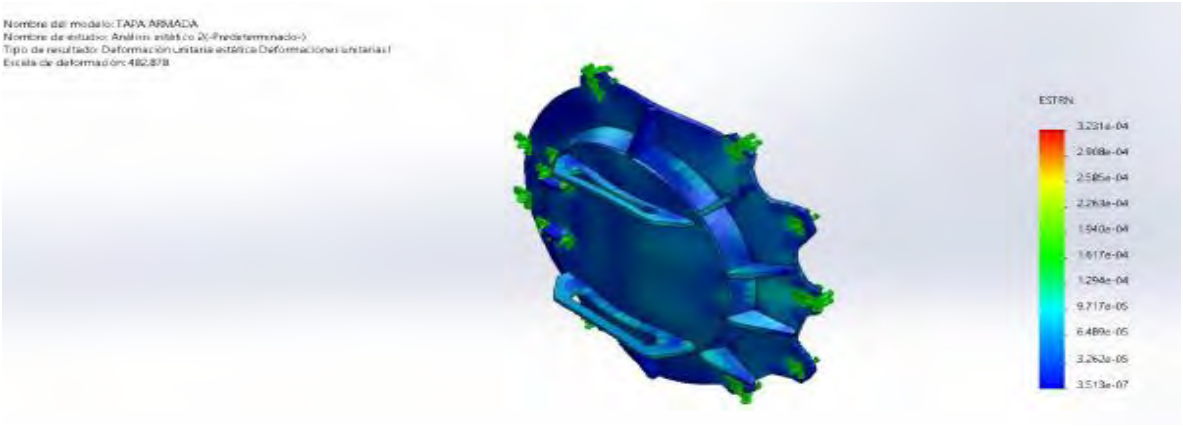
El valor máximo de tensión obtenido es aproximadamente 143 MPa, el cual se mantiene por debajo del límite elástico del acero inoxidable AISI 316 (≈172 MPa). Esto indica que la tapa del reactor trabaja dentro del régimen elástico del material y no presenta riesgo de falla por fluencia

bajo las condiciones de operación evaluadas. En consecuencia, el diseño estructural de la tapa resulta mecánicamente seguro para la presión de diseño considerada.

5.6.2.2. Deformaciones Unitarias

Figura 39

Análisis de deformación de la tapa del reactor térmico para presión de diseño



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

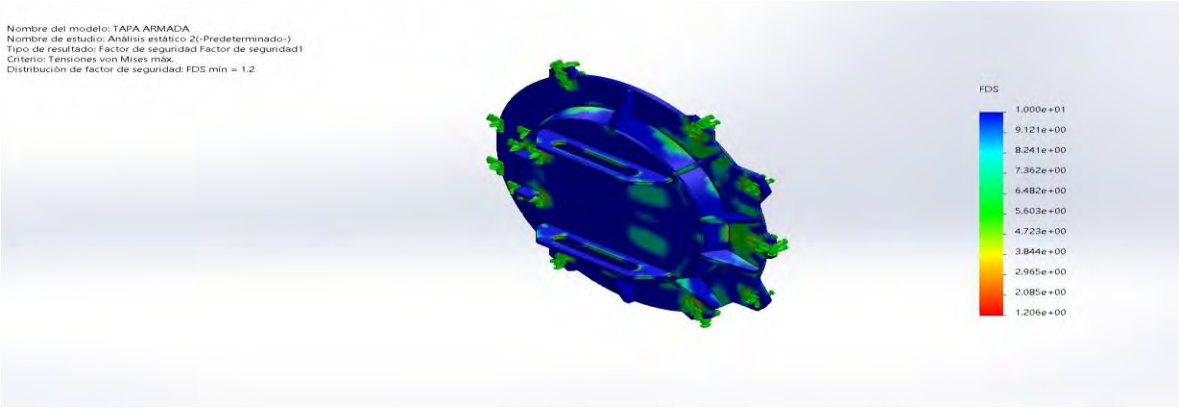
La figura muestra la distribución de los desplazamientos resultantes (URES) en la tapa del reactor térmico sometida a la presión de diseño. Se observa que la máxima deformación, del orden de 0.00032 , se localiza en la zona central de la tapa, mientras que las regiónes cercanas a los puntos de sujeción perimetral presentan desplazamientos mínimos, lo que evidencia un adecuado anclaje estructural.

El valor máximo de desplazamiento obtenido es reducido en comparación con las dimensiones globales del componente, por lo que no compromete la integridad estructural ni el correcto funcionamiento del sistema de cierre y sellado del reactor. En consecuencia, la tapa del reactor presenta un comportamiento mecánico estable y adecuado frente a las condiciones de presión de operación consideradas

5.6.2.3. Factor de Seguridad.

Figura 40

Análisis y evaluación de factor de seguridad de la tapa del reactor para presión de diseño



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

La figura muestra la distribución del factor de seguridad (FDS) de la tapa del reactor sometida a la presión de diseño, considerando como criterio la tensión máxima de von Mises. Se observa que la mayor parte del componente presenta valores elevados de factor de seguridad, representados por tonalidades azules, lo que indica un comportamiento estructural adecuado frente a las cargas aplicadas.

El valor mínimo del factor de seguridad obtenido es aproximadamente 1.2, localizado principalmente en zonas cercanas a los puntos de sujeción y cambios geométricos. Este valor es superior a la unidad, lo que confirma que la tapa del reactor cuenta con un margen de seguridad suficiente para operar bajo las condiciones de presión de diseño establecidas. En consecuencia, el diseño estructural de la tapa resulta mecánicamente seguro y no presenta riesgo de falla estructural.

5.6.2.4. Analisis de resultados de la tapa del reactor

En la simulación AMEF realizada en SolidWorks para una estructura metálica de tapa del reactor de espesor ¼”, fabricada con material acero inoxidable 316, se obtuvieron los siguientes resultados:

4. **Análisis de von Mises**:
    - El valor máximo de tensión obtenido es aproximadamente 143 MPa, el cual se mantiene por debajo del límite elástico del acero inoxidable AISI 316 (≈172 MPa).
5. **Análisis de Deformación unitaria**:
    - El desplazamiento máximo observado fue de 0.00032, el cual es menor a lo permisible para la distancia más larga de la estructura.
6. **Factor de Seguridad Mínimo**:
    - El factor de seguridad mínimo calculado fue de 1.2. Este valor indica que la viga tiene un margen de seguridad adecuado bajo las condiciones de carga simuladas.

5.7. Modelamiento de Estructura del Reactor de Pirólisis

5.7.1. Análisis estático estructural e interpretación de reactor de pirólisis

El modelamiento de soportes estructurales es crucial para asegurar la estabilidad y seguridad de las estructuras en ingeniería, especialmente en aplicaciones industriales como en el diseño de reactores de pirólisis. Los soportes estructurales son diseñados para resistir cargas, tanto estáticas como dinámicas, que pueden ser impuestas por el peso del equipo, el contenido, condiciones ambientales, y las operaciones que se llevan a cabo dentro de la estructura.

Figura 41

Diseño de estructura metálica diseñada para soportar el reactor y sus componentes

Nota. Elaboración propia.

5.7.2. Simulación de la estructura

La simulación estructural de la plataforma soporte del reactor de pirólisis se realizó con el objetivo de verificar la integridad mecánica del conjunto, asegurando que los elementos estructurales resistan de manera segura las cargas actuantes durante la operación del sistema. (Colet, 2015).

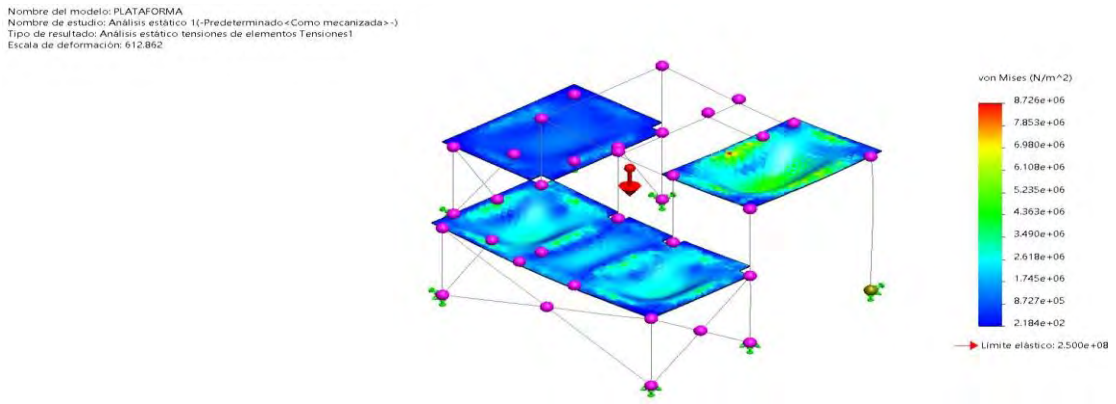
El material estructural fue modelado como acero estructural isotrópico elástico lineal, cuyas propiedades mecánicas fueron definidas conforme a valores estándar de diseño.

Los resultados obtenidos permiten evaluar de manera integral el estado tensional, los desplazamientos máximos y el factor de seguridad, garantizando que el diseño cumpla con los criterios de resistencia y rigidez exigidos para una operación segura (Vargas et al., 2019).

5.7.2.1. Esfuerzos de von Mises

Figura 42

Análisis de tensiones equivalentes de von Mises en la estructura soporte del reactor



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

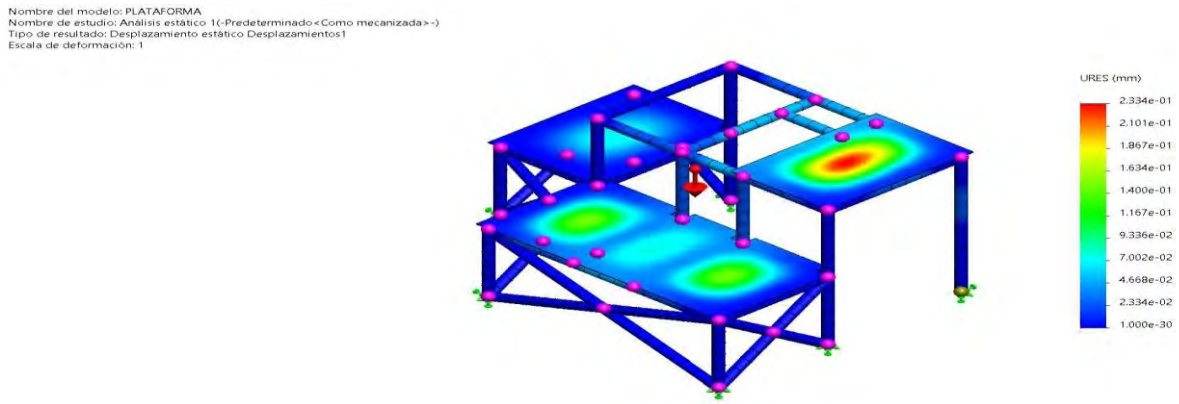
La figura muestra la distribución de las tensiones equivalentes de von Mises obtenidas a partir del análisis estático de la estructura tipo plataforma que soporta el reactor de pirólisis. Los resultados evidencian que las mayores concentraciones de esfuerzo se localizan principalmente en las placas superiores y en las zonas de conexión entre vigas y columnas, donde se aplican las cargas concentradas y restricciones del modelo. El valor máximo de tensión registrado alcanza aproximadamente 8.73×10^6 N/m², mientras que los valores mínimos se sitúan en el orden de 2.18×10^4 N/m², concentrándose en regiónes alejadas de los puntos de carga.

Al comparar estos valores con el límite elástico del material estructural, establecido en 2.50×10^8 N/m², se verifica que las tensiones inducidas representan un porcentaje reducido de la capacidad resistente del acero, manteniéndose ampliamente por debajo del umbral de plastificación. En consecuencia, el diseño estructural de la plataforma presenta una adecuada capacidad portante y cumple con los criterios de resistencia mecánica exigidos para la operación segura del sistema.

5.4.2.1. Desplazamiento / Deformaciones

Figura 43

Análisis de desplazamientos resultantes de la estructura soporte del reactor



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

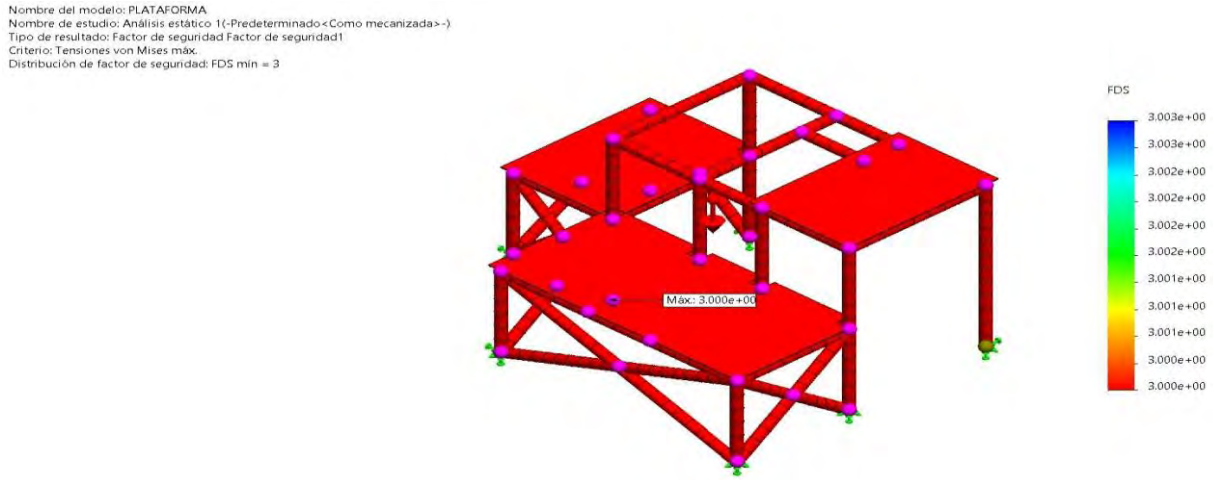
La figura presenta la distribución de los desplazamientos resultantes (URES) obtenidos mediante el análisis estático de la estructura tipo plataforma que soporta el reactor de pirólisis. Los resultados muestran que los desplazamientos máximos se concentran principalmente en las placas superiores, específicamente en las zonas centrales de los elementos planos, donde la estructura experimenta mayor flexión debido a la aplicación de las cargas verticales. El valor máximo de desplazamiento registrado es del orden de 2.33×10^{-1} mm, mientras que los desplazamientos mínimos tienden prácticamente a 0 mm en los apoyos y nodos restringidos, evidenciando una adecuada condición de empotramiento.

La magnitud de los desplazamientos obtenidos es considerablemente reducida en relación con las dimensiones globales de la estructura, lo que indica un comportamiento estructural rígido y un control adecuado de las deformaciones.

5.4.2.1. Factor de Seguridad.

Figura 44

Análisis y evaluación del factor de seguridad de la estructura soporte



Nota. Elaboración propia mediante el software SolidWorks Simulation.

La figura muestra la distribución del factor de seguridad (FDS) obtenida a partir del análisis estático de la estructura tipo plataforma que soporta el reactor de pirólisis. El criterio de evaluación empleado corresponde a la tensión máxima de von Mises, considerando un factor de seguridad mínimo de diseño FDS = 3, de acuerdo con criterios conservadores comúnmente aplicados en estructuras metálicas sometidas a cargas estáticas.

Los resultados indican que el factor de seguridad mínimo alcanzado es aproximadamente 3.0, valor que se presenta de manera relativamente uniforme en la mayor parte de los elementos estructurales, especialmente en vigas, columnas y arriostramientos principales. Las zonas críticas se concentran en las uniones estructurales y regiónes cercanas a los apoyos, donde se produce una mayor concentración de esfuerzos; sin embargo, en ningún caso el factor de seguridad desciende por debajo del valor mínimo establecido.

5.7.2.2. Analisis de Resultados

En la simulación AMEF realizada en SolidWorks para una estructura metálica de perfiles cuadrados de 2”, fabricada con material ASTM A36, se obtuvieron los siguientes resultados:

7. **Análisis de von Mises**:

   - La tensión máxima registrada en la estructura fue de 8.73 MPa. Este valor se encuentra dentro de los límites permisibles para el material ASTM A36, cuya resistencia a la tracción es de aproximadamente 250 MPa.

8. **Análisis de Desplazamiento**:

   - El desplazamiento máximo observado fue de 0.23 mm el cual es menor a lo permisible para la distancia más larga de la estructura.

9. **Factor de Seguridad Mínimo**:

   - El factor de seguridad mínimo calculado fue de 3. Este valor indica que la viga tiene un margen de seguridad adecuado bajo las condiciones de carga simuladas.

5.8. Simulación del proceso del reactor de Pirólisis

5.8.1. Simulación térmica del reactor

Se realizo una simulación para analizar el comportamiento térmico y de presión en la superficie interna del reactor. Este análisis permite determinar si los resultados obtenidos, y cálculos; garanticen la confiabilidad numérica de la simulación, la cual las variables son las siguientes:

- Temperatura de trabajo (°C) en el interior del reactor
- Presión máxima de trabajo en el interior del reactor

El análisis térmico y obtención de datos se ingresarán a SolidWorks Simulation

Tabla 40

Parámetros de ingreso, a analizar en SolidWorks Simulation

Variable	Valor	Unidad

Presión de Operación	1.6	MPa
Temperatura de Operación	773	K
Esfuerzo del material AISI 304 a la temperatura de diseño (T:500 °C)	93	MPa

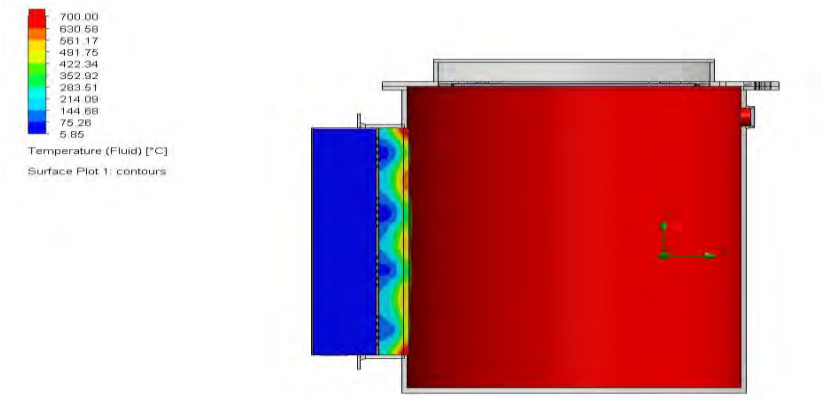
Nota. Elaboración propia

5.8.2. Resultados

Las variables de interés para este análisis es observar el incremento y distribución de temperatura.

Figura 45

Distribución de las temperaturas en el reactor



Nota. Elaboración propia mediante SolidWorks Simulación

Las mayores temperaturas se concentran, desde el ingreso del calor, alcanzando valores adecuados para la descomposición termoquímica del caucho granulado.

Este comportamiento confirma que el diseño propuesto permite una distribución térmica adecuada, reduciendo la presencia de zonas frías y mejorando la eficiencia del proceso de pirólisis.

5.8.3. Simulación térmica del condensador de tubo y corazas

Se realizo un análisis térmico del condensador, ingreso del agua dentro de los tubos del condensador y en la coraza el ingreso de gases provenientes del reactor, con flujo contracorriente.

Tabla 41

Parámetros de operación para la simulación térmica del condensador de tubo y coraza

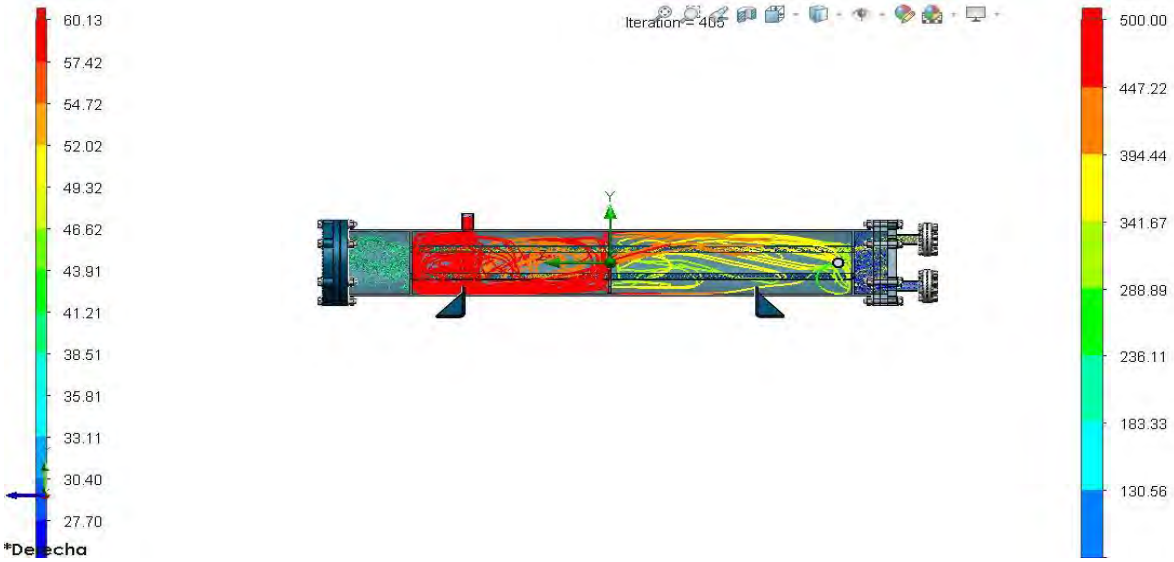
Variable	Valor	Unidad
Presión de Operación	150	kPa
Temperatura de Operación	473	K
Esfuerzo del material AISI 304 a la temperatura de diseño	138	MPa
Velocidad del agua	1	m/s
Velocidad del gas	17.5	m/s
Numero de tubos del condensador	8	und

Nota. La tabla presenta las condiciones de operación y los parámetros principales utilizados en la simulación térmica del condensador de tubo y coraza, considerando presión, temperatura, material, velocidades de los fluidos y número de tubos del condensador.

Se aprecia el desplazamiento del fluido caliente a través del intercambiador y la variación progresiva de temperatura a lo largo del equipo. Las trayectorias de flujo evidencian zonas de mezcla que favorecen la transferencia de calor entre el gas de pirólisis y el medio de enfriamiento, lo cual contribuye al proceso de condensación de los vapores.

Figura 46

Simulación térmica del condensador en vista longitudinal

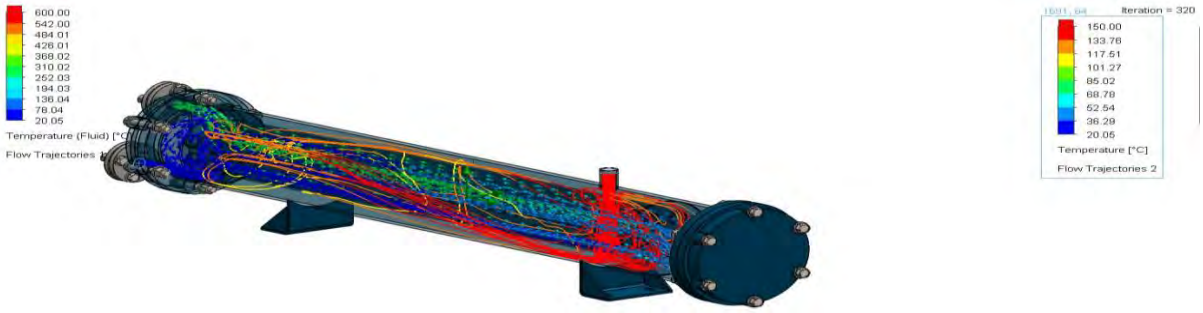


Nota. Elaboración propia mediante SolidWorks Simulation

Se evidencia el gradiente térmico a lo largo del recorrido del fluido, observándose una disminución progresiva de temperatura desde la entrada hasta la salida del equipo. Este comportamiento confirma la capacidad del condensador para extraer calor de manera eficiente y facilitar la recuperación de fracciones condensables del proceso.

Figura 47

Simulación térmica del condensador en vista isométrica

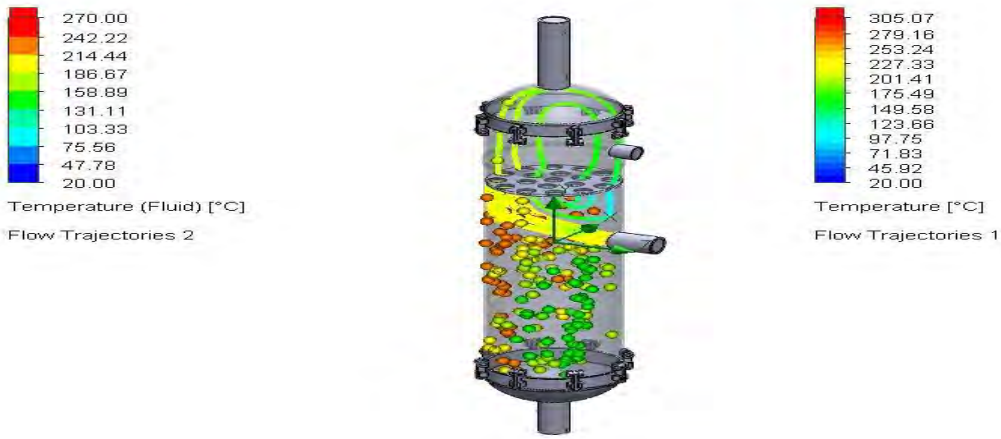


Nota. Elaboración propia mediante SolidWorks Flow Simulation.

5.8.4. Simulación del separador gas-líquido

Figura 48

Trayectorias del flujo y distribución de temperatura en el separador vertical bifásico



Nota. Elaboración propia mediante SolidWorks Flow Simulation.

Se observa que, al ingresar la mezcla gas-líquido al separador, la velocidad del flujo disminuye, permitiendo la separación gravitacional de fases. La fase líquida se deposita en la parte inferior, mientras que la fase gaseosa asciende hacia la salida superior. Este comportamiento valida la geometría del equipo y su eficiencia para la separación de productos del proceso de pirólisis.

Tabla 42

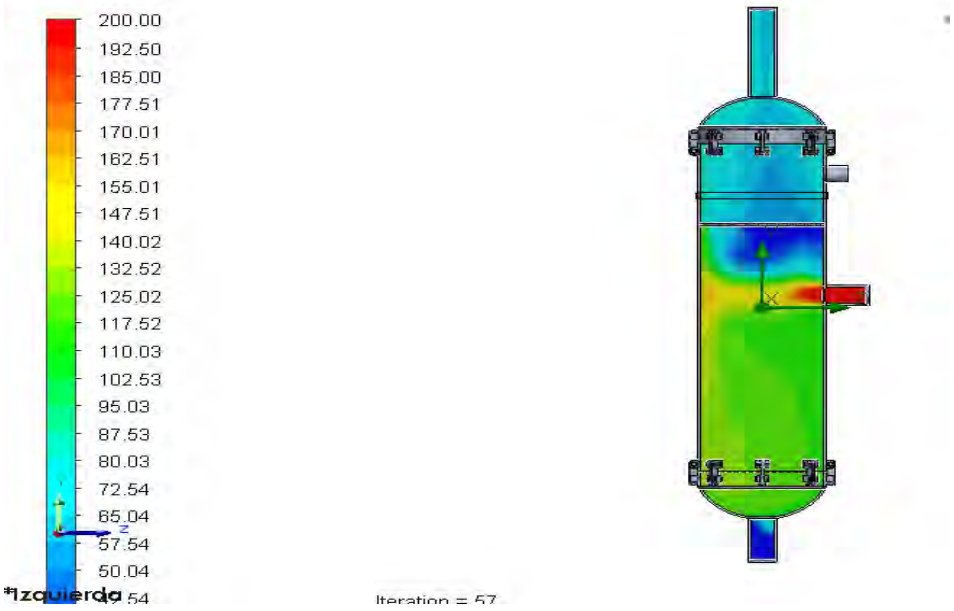
Parámetros de operación para la simulación del separador bifásico

Variable	Valor	Unidad
Presión de Operación	150	kPa
Temperatura de Operación	473	K
Esfuerzo del material AISI 304 a la temperatura de diseño (200 °C)	138	MPa

Nota. La tabla presenta las condiciones de operación y las propiedades del material AISI 304 consideradas en la simulación del separador bifásico, empleadas para validar el comportamiento del equipo durante la separación gravitacional de la fase líquida y gaseosa.

Figura 49

Distribución de temperatura del flujo en el separador vertical bifásico



Nota. Elaboración propia mediante SolidWorks Simulation

5.8.5. Análisis de resultados de simulación

Los resultados obtenidos en las simulaciones térmicas y de flujo permiten validar el desempeño del sistema de pirólisis diseñado. En el reactor, se confirma una adecuada distribución de temperatura y un patrón de flujo que favorece la transferencia de calor, lo cual es fundamental para el proceso de descomposición térmica del material. En el sistema de condensación, se evidencia una reducción progresiva de temperatura del fluido, lo que garantiza la condensación de los vapores hidrocarburados. Por su parte, el separador gas-líquido presenta un comportamiento coherente con el principio de separación gravitacional, asegurando la correcta diferenciación de fases. Estos resultados demuestran que el diseño propuesto cumple con las condiciones operativas requeridas y presenta un comportamiento funcional adecuado, validando su viabilidad técnica para el procesamiento de neumáticos usados mediante pirólisis.

CAPÍTULO VI: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

6.1. Introducción

El presente capítulo desarrolla la descripción de los materiales y equipos que se deben emplear para la fabricación del sistema de pirólisis, así como las características de montaje e instalación de todos sus subsistemas, tanto mecánicos como térmicos. La selección se fundamenta en criterios de resistencia mecánica, comportamiento térmico, resistencia a la corrosión, disponibilidad comercial y factibilidad de fabricación.

El suministro de materiales, equipos y montaje se efectuará teniendo en consideración las normas técnicas vigentes. El sistema integral está conformado por los siguientes subsistemas principales: reactor de pirólisis, sistema de condensación, separador vertical bifásico, sistema de calentamiento, sistema de suministro de gas combustible, sistema de transmisión mecánica, estructura soporte y almacenamiento de productos. La integración de estos elementos permite una operación técnicamente viable, favoreciendo la transferencia de calor, la conducción de los gases de proceso, la recuperación de las fracciones condensables y la separación de las fases generadas durante la pirólisis.

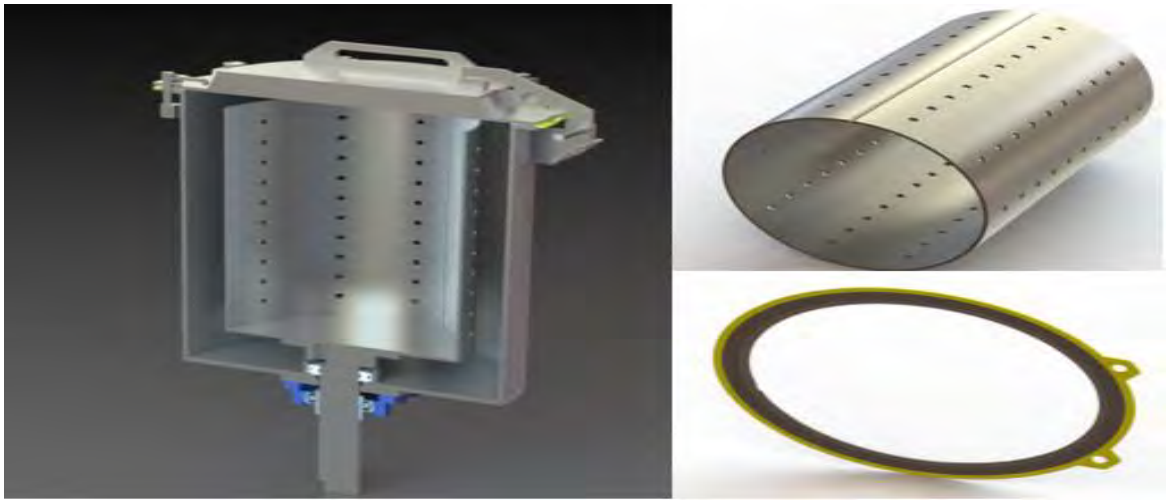
6.2. Especificaciones técnicas de materiales

La selección de materiales se realizó considerando la resistencia mecánica, la resistencia térmica, la resistencia a la corrosión, la disponibilidad comercial y la compatibilidad con las condiciones de operación del sistema. En el reactor principal se emplean aceros inoxidables AISI 316 y AISI 304; el primero en los componentes más exigidos térmica y químicamente y el segundo en componentes con menor exigencia y menor costo. Para la estructura soporte se selecciona acero estructural ASTM A36 y para el eje de transmisión, acero AISI 1045.

6.2.1. Reactor de pirólisis

Tabla 43

Especificaciones técnicas del reactor de pirólisis

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Reactor rotativo vertical (cilindro base, cilindro rotatorio, tapa y base)			
			
Función	Núcleo del sistema; cámara donde ocurre la descomposición termoquímica (pirólisis) del caucho granulado en ausencia de oxígeno.	—	Reactor rotatorio
Geometría	Cilíndrica rotatoria	—	Calentado externamente
Diámetro	50	cm	
Longitud	75	cm	
Espesor de pared	6.35	mm	Criterio comercial
Cilindro base	Acero inoxidable AISI 316, e = 1/4"	—	Mayor exigencia térmica
Cilindro rotatorio	Acero inoxidable AISI 304, e = 1/4"	—	
Tapa del reactor	Acero inoxidable AISI 316, e = 1/4"	—	
Base inferior	Acero inoxidable AISI 304, e = 1/4"	—	
Junta de brida	Grafito reforzado con acero inoxidable	—	Sellado del cierre
Norma técnica	ASTM A240 / A480	—	Plancha de acero inoxidable
Instrumentación básica	Manómetro	—	Control de presión

Nota. Selección de materiales basada en criterios de resistencia mecánica, térmica y a la corrosión. Elaboración propia mediante el software SolidWorks.

Tabla 44

Propiedades de los materiales principales del reactor

Material	Dureza Rockwell B	Temperatura de servicio	Resistencia a la fluencia
AISI 304	70 – 90 HRB	870 °C	205 MPa (30 ksi)
AISI 316	70 – 95 HRB	925 °C	205 MPa (30 ksi)

Nota. Propiedades de referencia de los aceros inoxidables empleados en el reactor.

6.2.2. Sistema de condensación

Tabla 45

Especificaciones técnicas del sistema de condensación

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Condensador armado			
Función	Recuperar las fracciones líquidas de los vapores generados en el reactor, reduciendo su temperatura.	—	Carcasa y tubos
Material	Acero inoxidable AISI 304	—	Tubería, carcasa y accesorios
Tubería	Tubo 1 1/2" *3/16 “AISI 304	8	Banco de tubos
Norma técnica	ASTM A312 / A240	—	
Línea de condensación, bomba y reservorios			
Línea y accesorios	Tubería 1" cedula 40 AISI 304, codos 90°, bridas armadas y empaques	—	Sellado por pernos
Bomba de recirculación	Bomba hidráulica de impulsión de agua	—	Enfriamiento
Reservorio de agua	Fabricado en acero inoxidable AISI 304	—	

Nota. Selección del sistema de condensación en función de criterios operativos y de fabricación. Elaboración propia mediante el software SolidWorks.

6.2.3. Separador vertical bifásico

Tabla 46

Especificaciones técnicas del separador bifásico

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Separador bifásico de líquidos y gases			
Función	Mejorar la separación entre la fase gaseosa y la fase líquida luego de la condensación parcial del flujo.	—	Separador vertical
Material	Acero inoxidable AISI 304	—	Carcasa, boquillas y conexiones
Componentes internos	Planchas perforadas en inoxidable (deflector interno), tubos 1" SCH 40 y reducciones	—	
Bridas y conexiones	Bridas armadas y accesorios	—	
Norma técnica	ASTM A240	—	

Nota. Especificaciones del separador a partir de materiales y procesos de fabricación. Elaboración propia mediante el software SolidWorks.

6.2.4. Sistema de calentamiento

Tabla 47

Especificaciones técnicas del sistema de calentamiento

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Quemador a gas			
Función	Suministrar la energía térmica necesaria para alcanzar la temperatura de pirólisis mediante la combustión de gas.	—	Calentamiento externo
Tipo	Quemador lineal fabricado	—	
Material	Acero inoxidable	—	Resistente a alta temperatura
Combustible	Gas (GNV)	—	
Norma Técnica	ASME PTC – códigos de pruebas de rendimiento de diseño calderas,		

Nota. Quemador lineal seleccionado en función de los requerimientos térmicos del proceso.

6.2.5. Sistema de suministro de gas

Tabla 48

Especificaciones técnicas del sistema de suministro de gas

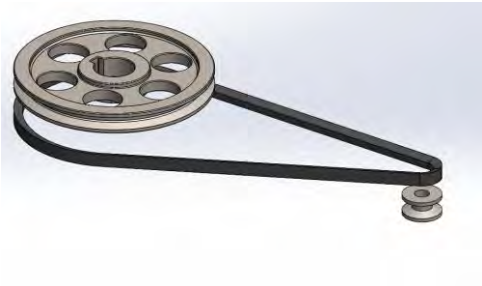
Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Tanque de almacenamiento de gas e instrumentación			
Función	Almacenar y conducir el gas combustible hacia el quemador, controlando el flujo y la presión.	—	
Tanque de almacenamiento	Cilindro de gas de 15 kg	—	
Manómetro	0 – 300	psi	Instrumentación
Reductor de presión	De 1" a 3/4"	—	
Tubería	Acero inoxidable AISI 304	—	Línea de gas inoxidable
Válvula de paso	Manual	—	
Codos	90°	—	

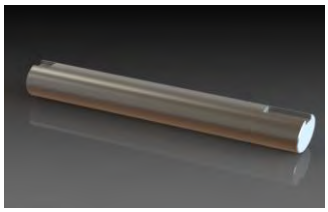
Nota. Componentes y especificaciones para el control del flujo y la presión del gas. Elaboración propia mediante el software SolidWorks.

6.2.6. Sistema de transmisión mecánica

Tabla 49

Especificaciones técnicas del sistema de transmisión

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Transmisión por poleas y faja			
			
Función	Proporcionar el giro controlado del reactor rotatorio desde el motor.	—	Transmisión en V
Tipo de transmisión	Poleas y faja trapezoidal	—	Aluminio
Polea motriz	50	mm	
Polea conducida	250	mm	
Faja	Trapezoidal, L = 1318 mm	—	Faja en V
Chumacera tipo brida (UCF 212)			

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Función	Sostener el eje y permitir su giro; soporta cargas radiales y mixtas.	—	Norma JIS B 1559
Tipo	Chumacera de brida cuadrada con 4 agujeros y tornillos prisioneros	—	Autoalineable
Carcasa	Hierro fundido	—	Absorbe vibraciones
Rodamiento	Acero para rodamientos (SKF)	—	Alta durabilidad
Eje de transmisión			
			
Función	Transmitir el movimiento y la potencia al reactor.	—	
Material	Acero AISI 1045	—	Buena resistencia mecánica
Diámetro	1"	—	

Nota. Componentes seleccionados para el sistema de transmisión y rotación del reactor. Elaboración propia mediante el software SolidWorks.

6.2.7. Estructura soporte

Tabla 50

Especificaciones técnicas de la estructura soporte

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Marco estructural			
Función	Garantizar la estabilidad del reactor y de los equipos auxiliares durante la operación.	—	
Perfil tubular	Tubo cuadrado 50 × 50 × 3 mm, ASTM A36	—	Fy = 315 MPa; 6 m
Perfil tubular	Tubo cuadrado 50 × 50 × 2 mm, ASTM A36	—	Estructuras ligeras / apoyos
Plancha metálica	Plancha e = 1/8", ASTM A36	—	Fy = 250 MPa; 1200 × 2400 mm
Norma técnica	ASTM A36	—	
Acabado	Limpieza mecánica, acabado y pintura	—	Base anticorrosiva

Nota. Perfiles y planchas estructurales seleccionados por su rigidez, capacidad de carga y disponibilidad comercial.

6.2.8. Almacenamiento de productos líquidos

Tabla 51

Especificaciones técnicas del almacenamiento de productos líquidos

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Tanque de almacenamiento líquido			
Función	Almacenar los productos líquidos recuperados del proceso de pirólisis.	—	Horizontal, recepción de liquidos
Material	Fabricado en acero al carbono ASTM A36	—	
Capacidad	Acorde al sistema piloto	—	

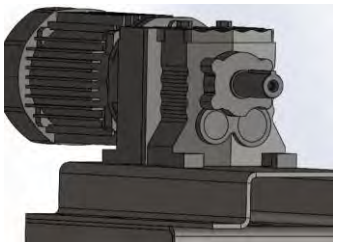
Nota. Tanque de almacenamiento dimensionado para un sistema piloto.

6.3. Especificaciones técnicas de equipos

6.3.1. Motor eléctrico

Tabla 52

Especificaciones técnicas del motorreductor

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Motorreductor SEW Eurodrive 0.12 HP			
			
Equipo	Motorreductor de uso general con soporte rígido	—	SEW Eurodrive
Función	Accionar el sistema de transmisión, generando el movimiento rotatorio del reactor.	—	
Potencia	0.12	HP	
Tipo	Motor eléctrico con reductor	—	
Bomba de Impulsión -recirculación			
Equipo	Bomba hidráulica de impulsión de agua	—	Uso general

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Función	Impulsar el agua de enfriamiento en el sistema de condensación.	—	Pedrollo (acero inoxidable 304)
Potencia	0.5 (0.37kW)	HP	
caudal	6-7	M3/h	
altura	5.5-6.5	m.c.a	

Nota. Equipos seleccionados por compatibilidad dimensional, disponibilidad comercial y facilidad de mantenimiento.

6.4. Especificaciones técnicas de fabricación y montaje

6.4.1. Especificaciones de unión por soldadura y otras

Tabla 53

Especificaciones técnicas de soldadura y procesos de fabricación

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Uniones soldadas y procesos			
Unión entre planchas de acero inoxidable	Soldadura TIG / MIG con material de aporte compatible con AISI 304 / 316	—	Reactor, condensador y separador
Unión entre perfiles estructurales	Soldadura por arco eléctrico SMAW / GMAW	—	Estructura ASTM A36
Corte y conformado	Corte por plasma o láser y rolado de planchas	—	
Pintura	Base anticorrosiva y acabado en esmalte	—	Estructura soporte

Nota. Procesos de unión y fabricación según el material de cada subsistema.

6.4.2. Especificaciones de montaje e instalaciones

Tabla 54

Especificaciones técnicas de montaje e instalaciones

Parámetro	Descripción	Ud.	Observación
Personal y responsabilidades			
Técnico mecánico	Ensamblar estructuras, ductos y componentes; alinear ejes y sincronizar la transmisión; ajustar pernos y verificar tolerancias.	—	Uso adecuado de EPP
Técnico electricista	Instalar y conectar el motor, la bomba y los controles; verificar sentido de giro, voltaje y consumo; cableado general.	—	Uso adecuado de EPP
Procesos de montaje			
Montaje mecánico	Ensamblaje del sistema, alineación de ejes y pruebas de funcionamiento.	—	
Instalación eléctrica	Conexión de motor, bomba, tableros y accesorios.	—	

Nota. Montaje e instalación a cargo de personal técnico calificado y con uso de equipos de protección personal.

CAPÍTULO VII: RENTABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

7.1. Costos y presupuesto del sistema

Para el análisis de rentabilidad económica del proyecto, se consideró como base el presupuesto técnico del sistema de pirólisis, elaborado a partir de la selección de materiales, equipos, procesos de fabricación, montaje e instalación desarrollados en el capítulo anterior. Este presupuesto comprende el costo del reactor principal, el sistema de condensación, el separador bifásico, el sistema de calentamiento, el sistema de transmisión mecánica, la estructura soporte, el sistema de almacenamiento de gas, el tanque de almacenamiento líquido y los costos complementarios de montaje, instalación eléctrica y documentación técnica.

Desde el punto de vista económico, esta valorización constituye la inversión inicial requerida para la implementación del sistema. En consecuencia, el presupuesto total del proyecto asciende a S/ 30,586, monto que representa el CAPEX técnico del sistema de pirólisis y que sirve como base para el análisis de rentabilidad económica del proyecto.

7.2. Resumen de metrados y costos unitarios

un cuadro de metrados y costos unitarios por partida principal. Debido a que la estimación económica del proyecto se desarrolló a nivel de subsistemas y no como presupuesto de fabricación detallado por pieza individual, los metrados se presentan de forma global por cada componente o partida principal del sistema.

Este resumen permite vincular los costos del proyecto con las partidas técnicas seleccionadas en el capítulo anterior, facilitando la interpretación del presupuesto y sirviendo como soporte para la evaluación de la inversión inicial.

Tabla 55

Costos de materiales, subcontratos de servicios de reactor de pirólisis

Partida 1	**Soporte Estructural**				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total(S/.)**
1.1	Materiales				
1.1.1	Perfil Tubular ASTM A36 Tubo Cuadrado 50X50X3	m	25.03	26.8	670.80
1.1.2	Perfil Tubular ASTM A36 Tubo Cuadrado 50X50X2	m	3.78	20.1	75.98
1.1.3	Plancha Metálica ASTM A-36 (e=1/8")	m2	3.75	260	975.00
1.2	Subcontratos				
1.2.1	Cortes de perfiles a medidas	und	1	250	250.00
1.2.2	Soldadura Calificada (GMAW)	und	1	575	575.00
1.2.3	Limpieza mecánica, acabado y pintura	und	1	190	190.00

Partida 2	**Separador Bifásico**				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
2.1	Materiales				
2.1.1	plancha AISI 304	und	1	550.00	550.00
2.1.2	tubos de 1" SCH 40 304, reducciones	und	1	400.00	400.00
2.1.3	bridas armadas y accesorios	und	1	325.00	325.00
2.1.4	planchas perforadas en inoxidable(deflector-interno)	und	1	200.00	200.00
2.1	Subcontratos				
2.2.1	Rolado de plancha	und	1	115.00	115.00
2.2.2	Soldadura Calificada (GMAW)	und	1	1000.00	1000.00
2.2.3	Limpieza mecánica, acabado y pintura	und	1	250.00	250.00

Partida 3	**Condensador**				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
3.1	Materiales				
3.1.1	Tubería 1" AISI 304 SCH 40	m	7	132.14	924.98
3.1.2	Plancha A-36 1/8" (Carcasa)	und	1	260.00	260.00

3.1.3	Accesorios (Codos, Bridas, Reducciones)	kit	1	425.00	425.00
3.2	Subcontratos				
3.2.1	Mano de Obra (Soldadura TIG y Rolado)	und	1	1850.00	1850.00
3.2	Materiales				
3.3.1	Tubería de 1 " cedula 40 acero inoxidable AISI 304	m	8.5	22.50	191.25
3.3.2	codo de 90° de 1" cedula 40	und	7	28.00	196.00
3.3.3	brida armada, sellado de pernos y empaques	und	8	85.00	680.00
3.4	Sistemas del Condensador				
3.4.1	bomba hidráulica de impulsión de agua	und	1	1495.00	1495.00
3.4.2	reservorio de agua, fabricado con acero inox AISI 304	und	1	460.00	460.00

Partida 4	**Reactor**				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
4.1	Materiales				
4.1.1	Base cilíndrica en plancha de acero inox 316 espesor 1/4"	und	1	2700.00	2700.00
4.1.2	Base cilíndrica en plancha de acero AISI 304 con 100 perforaciones	und	1	2250.00	2250.00
4.1.3	Tapa de reactor - acero inox 316 espesor de 1/4"	und	1	750.51	750.51
4.1.4	Base inferior -plancha de acero inox AISIS 304 1/4 "	und	1	250.00	250.00
4.1.5	Elemento de sellado fabricado en grafito reforzado con acero inoxidable	und	1	862.50	862.50
4.1.6	Pasador en inox AISI 304	und	1	200.00	200.00
4.1.7	Mecanismo de sujeción acero inox AISI 304	und	5	225.00	1125.00
4.1.8	Tornillo hexagonal	und	2	22.43	44.85
4.1.9	Tornillo hexagonal M16*2*25 mm	und	4	15.53	62.10
4.1.10	Arandela M16*2*25 mm	und	8	2.24	17.94
4.1.11	Tuerca hexagonal- rosca métrica M16 X2	und	2	3.80	7.59
4.1.12	manómetro bar(psi)	und	1	95.00	95.00
4.1.13	Aislamiento térmico (fibra de vidrio)	und	1	140.00	140.00
4.1.14	Revestimiento resina 10 mm	und	1	300.00	300.00

Partida 5	Quemador				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
5.1	Quemador lineal - tipo cañón	und	1	3300.00	3300

Partida 6	Sistema de Transmisión				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
6.1	Materiales				
6.1.1	motor eléctrico 0.12 HP Sew euro drive	und	1	650.00	650
6.1.2	polea motriz 50 mm	und	1	35.00	35
6.1.3	polea conducida 250 mm	und	1	120.00	120
6.1.4	faja trapezoidal 1318 mm	und	1	55.00	55
6.1.5	chumacera tipo brida UCF 2"	und	1	280.00	280
6.1.6	rodamiento SKF 6108	und	1	95.00	95
6.1.7	plancha guía para el rodaje de espesor 1/4"	und	1	180.00	180
6.1.8	plancha guía para el rodaje de espesor 1/2"	und	1	220.00	220
6.1.9	eje de 2 pulg. Acero AISI 1045	und	1	120.00	120

Partida 7	Tanque de almacenamiento de líquidos				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
7.1	tanque de almacenamiento de gas combustible 10 KG-Comercial	und	1	400.00	400

Partida 8	Tanque de almacenamiento de Gas				
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo Unitario**	**Costo Total**
8.1	Materiales				
8.1.1	tanque de almacenamiento de gas combustible	und	1	350.00	350
8.1.2	manómetro de presión bar (psi) Ø 2.5″, 0-300 psi, SS316, con glicerina 1/4 NPT	und	3	82.00	246
8.1.3	reductor 1" a 3/4 “	und	1	12.00	12

8.1.4	tubería de 1 " cedula 40 acero inoxidable AISI 304	m	1.5	22.50	33.75
8.1.5	tubería de 1 " cedula 40 acero inoxidable AISI 304	m	1.5	22.50	33.75
8.1.6	llave de paso	und	1	55.00	55
8.1.7	codo de 90° de 1" cedula 40	und	2	18.00	36
	Total				S/. 27086.00

Nota. Elaboración propia

Tabla 56

Resumen de metrados y costos unitarios del sistema de pirólisis

Ítem	Componente o partida	Unidad	Metrado	Costo unitario (S/)	Costo parcial (S/)
1	Soporte estructural	glb	1	2,737	2,737
2	Separador bifásico	glb	1	2,840	2,840
3	Sistema de condensación	glb	1	6,922	6,922
4	Reactor principal	glb	1	8,335	8,335
5	Quemador	und	1	3,330	3,330
6	Sistema de transmisión	glb	1	1,755	1,755
7	Tanque de almacenamiento líquido	und	1	400	400
8	Sistema de almacenamiento de gas	glb	1	767	767
9	Montaje	glb	1	1,500	1,500
10	Instalación eléctrica y materiales	glb	1	1,000	1,000
11	Diseño y planos	glb	1	1,000	1,000
	Total, general				**30,586**

Nota. Presupuesto resumido expresado en términos de metrados globales y costos unitarios referenciales por subsistema- elaboración propia

La formulación del presupuesto mediante metrados globales responde al nivel de desarrollo del presente estudio, el cual se enmarca en una propuesta de diseño técnico y no en una ingeniería de detalle de fabricación. En consecuencia, los costos unitarios presentados tienen carácter referencial y sirven como base para la estimación de la inversión inicial del sistema.

7.3. Costos de producción del sistema

Los costos de producción del sistema de pirólisis se estimaron con la finalidad de expresar el comportamiento económico de la operación en diferentes escalas de tiempo: por hora, por mes y por año. Esta desagregación permite comprender de manera más precisa la estructura de costos del proceso y sirve como base para la proyección económica del proyecto.

Para la presente evaluación se consideraron únicamente los costos de producción, es decir, los costos fijos de producción y los costos variables de producción establecidos para el primer año de operación. No se incluyeron en este apartado los gastos administrativos ni los gastos de ventas, debido a que estos se presentan posteriormente dentro del estado de resultados proyectado.

7.3.1. Costo de producción por hora

Para expresar el costo de producción en términos horarios, se adoptó una operación referencial de 200 horas por mes, equivalente a una jornada de trabajo de 8 horas diarias durante 25 días al mes. Bajo este criterio, el costo fijo de producción por hora asciende a S/ 9.75, mientras que el costo variable de producción por hora asciende a S/ 25.50, obteniéndose un costo total de producción por hora de S/ 35.25.

7.3.2. Costo de producción por mes

A nivel mensual, el costo de producción resulta de la suma del costo fijo de producción y del costo variable de producción. De acuerdo con los valores adoptados para el primer año de operación, el costo fijo mensual asciende a S/ 1,950, mientras que el costo variable mensual asciende a S/ 5,100, obteniéndose un costo total de producción mensual de S/ 7,050.

7.3.3. Costo de producción por año

A nivel anual, el sistema presenta un costo fijo de producción de S/ 23,400 y un costo variable de producción de S/ 61,200, lo que representa un costo total de producción anual de S/ 84,600. Este valor constituye la base operativa empleada para la proyección económica del proyecto y para la construcción posterior del estado de resultados proyectado.

Tabla 57

Costos de producción del sistema por hora, mes y año

Concepto	Por hora (S/)	Por mes (S/)	Por año (S/)
Costos fijos de producción	9.75	1,950	23,400
Costos variables de producción	25.50	5,100	61,200
Costo total de producción	**35.25**	**7,050**	**84,600**

Nota. Para la desagregación horaria se adoptó una operación referencial de 200 horas por mes, equivalente a 2,400 horas por año.

La tabla anterior permite observar que los costos variables representan la mayor proporción del costo total de producción del sistema, lo cual indica que la rentabilidad del proyecto dependerá en gran medida del comportamiento de los insumos y gastos operativos asociados al proceso. Esta estructura de costos sirve como base para la formulación del análisis económico del proyecto y su posterior evaluación mediante los indicadores VAN y TIR.

7.4. Supuestos y datos básicos del análisis económico

Para evaluar la rentabilidad económica del proyecto, se establecieron supuestos financieros y operativos que permitieron proyectar el comportamiento económico del sistema durante el periodo de vida útil considerado. Estos supuestos constituyeron la base para la elaboración del estado de resultados, el flujo neto de fondos y el cálculo de los indicadores de rentabilidad del proyecto, expresados mediante el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

En primer lugar, se consideró una inversión inicial total de S/ 30,586, correspondiente a la fabricación del reactor, adquisición de equipos, instalación del sistema y demás componentes necesarios para su funcionamiento. Asimismo, se estableció un horizonte de evaluación de cinco años, periodo durante el cual se proyectaron los ingresos y egresos asociados a la operación del sistema. Al finalizar este periodo, se consideró un valor de salvamento de S/ 2,000, correspondiente al valor residual estimado de los equipos.

Para la evaluación económica se adoptó una tasa de interés de oportunidad de 18 %, la cual fue utilizada como tasa de descuento en el cálculo del VAN. Del mismo modo, se consideraron los ingresos por ventas, costos fijos de producción, costos variables de producción, gastos administrativos y gastos de ventas, con el propósito de estimar la rentabilidad del proyecto durante el periodo de evaluación.

Tabla 58

Supuestos económicos del proyecto

Concepto	Valor
Inversión inicial	S/ 30,586
Duración del proyecto	5 años
Valor de salvamento	S/ 2,000
Tasa de impuestos	29.5 %
Tasa de interés de oportunidad (TIO)	18 %

Nota. Parámetros utilizados para la evaluación económica del proyecto.

En relación con las condiciones de operación proyectadas para el primer año de funcionamiento del sistema, se estimaron los ingresos, costos y gastos necesarios para el desarrollo del análisis económico. Estos valores permitieron proyectar el comportamiento del proyecto durante el horizonte de evaluación considerado.

Tabla 59

Datos económicos del primer año de operación

Concepto	Valor
Ingresos por ventas	S/ 103,680
Costos fijos de producción	S/ 23,400
Costos variables de producción	S/ 61,200
Incremento anual de costos variables	3 %
Gastos administrativos	S/ 10,000
Gastos de ventas	S/ 1,500
Incremento anual de gastos de ventas	2 %

Nota. Estimación de ingresos y costos para el primer año de operación del sistema.

Los ingresos por ventas correspondieron a la comercialización de los productos obtenidos mediante el proceso de pirólisis de neumáticos usados. Por su parte, los costos de producción se dividieron en costos fijos y costos variables, considerando que estos últimos presentaron un incremento anual del 3 % debido a posibles variaciones en los precios de insumos y costos operativos. Asimismo, se consideraron gastos administrativos anuales de S/ 10,000 y gastos de ventas de S/ 1,500, con un incremento anual del 2 % por efectos inflacionarios.

7.5. Estado de resultados proyectado

El estado de resultados proyectado permitió estimar el desempeño económico del proyecto durante el periodo de evaluación de cinco años. Este instrumento mostró la relación entre los ingresos generados por la operación del sistema y los costos y gastos asociados a su funcionamiento, permitiendo determinar la utilidad neta anual del proyecto. Para su elaboración se consideraron los ingresos por ventas, los costos fijos y variables de producción, los gastos administrativos, los gastos de ventas y la depreciación de los equipos. A partir de estos elementos se obtuvo la utilidad operativa, la utilidad antes de impuestos y, finalmente, la utilidad neta del proyecto. En esta versión simplificada del análisis no se incorporaron gastos financieros, puesto que la evaluación económica se centró únicamente en la rentabilidad del proyecto mediante VAN y TIR.

Tabla 60

Estado de resultados proyectado en soles peruanos

Concepto	Fórmula	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por ventas		103,680	103,680	103,680	103,680	103,680
Costos fijos de producción		23,400	23,400	23,400	23,400	23,400
Costos variables de producción	Costo variable × (1.03)	61,200	63,036	64,927	66,875	68,881
Utilidad bruta	Ingresos – costos fijos – costos variables	19,080	17,244	15,353	13,405	11,399
Gastos administrativos		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Gastos de ventas	Incremento anual 2 %	1,500	1,530	1,561	1,592	1,624
Depreciación	(Inversión – valor residual) / vida útil	5,620	5,620	5,620	5,620	5,620
Utilidad antes de impuestos	Utilidad bruta – gastos administrativos – gastos de ventas – depreciación	1,960	5278	8800	12536	16499
Gastos financieros		2167.2	1733.7	1300.3	866.88	433.44
Utilidad antes del impuesto	Utilidad operacional- gastos financieros	-207	3544	7499	11669	16065
Impuestos	Utilidad antes del impuesto	-60	1028	2175	3384	4659
Utilidad neta final	Utilidad antes del impuesto- impuesto	-147	2516	5324	8285	11406

Nota. Proyección de ingresos, costos, gastos y utilidades del proyecto durante el periodo de evaluación.

Como se observa en la tabla anterior, el desempeño económico del proyecto depende principalmente del comportamiento de los costos variables y del nivel de ingresos proyectado. La utilidad neta anual constituye la base para la construcción del flujo neto de fondos del proyecto, el cual se utiliza posteriormente para el cálculo del VAN y la TIR.

7.6. Flujo neto de fondos del proyecto

El flujo neto de fondos del proyecto se construyó a partir de la inversión inicial y de los beneficios económicos generados durante el horizonte de evaluación. Este flujo representa el movimiento neto de recursos del proyecto y constituye la base para el cálculo de los indicadores de rentabilidad económica.

Para la evaluación se consideró la inversión inicial en el año 0 y los flujos netos anuales obtenidos durante los cinco años de operación. Estos valores permitieron determinar la recuperación de la inversión y la generación de valor económico del proyecto.

Tabla 61

Flujo neto de fondos del proyecto

Concepto	Fórmula	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
inversión		30,100					
Intereses	Gastos financieros		2167	1734	1300.32	866.88	433.44
Utilidad neta final	Sacamos del resultado		-147	2516	5324	8285	11406
Depreciación	Sacamos del resultado		5620	5620	5620	5620	5620
Flujo neto de fondos del proyecto	Utilidad final + depreciación + intereses	-30100	7640	9870	12245	14772	17460

Periodo	Flujo de fondos (S/)
Año 0	-30,586
Año 1	7,640
Año 2	9,870
Año 3	12,245
Año 4	14,772
Año 5	17,460

Nota. Flujo de caja proyectado del proyecto durante el periodo de evaluación.

El flujo neto de fondos muestra una recuperación progresiva de la inversión inicial, generando saldos positivos a partir del primer año de operación. Estos valores se utilizaron para la evaluación de la rentabilidad del proyecto mediante el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno.

7.7. Evaluación económica del proyecto

La evaluación económica del proyecto se realizó mediante el cálculo de dos indicadores financieros ampliamente utilizados: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permitieron determinar si los flujos generados por el proyecto fueron suficientes para recuperar la inversión inicial y producir beneficios económicos durante el periodo de evaluación.

7.7.1. Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto representa el valor presente de los flujos netos generados por el proyecto, descontados a una tasa determinada. En este caso, se utilizó una tasa de descuento del 18 %, correspondiente a la tasa de interés de oportunidad. Un VAN positivo indica que el proyecto genera beneficios superiores a la inversión inicial, mientras que un VAN negativo indicaría que no resulta conveniente desde el punto de vista económico.

La expresión general del Valor Actual Neto (VAN) se define de la siguiente manera:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

$$VAN = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \ldots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

- I_0 : Inversión inicial
- F_t : flujo de caja neto
- k : tasa de descuento o tasa de interés de oportunidad
- n: Número total de periodos evaluados

El Valor Actual Neto (VAN) permite determinar el valor actual de los flujos de ingresos y egresos del proyecto descontados a una tasa de interés determinada. Este indicador permite evaluar si el proyecto genera beneficios económicos superiores a la inversión inicial realizada.

Cálculo del Valor Presente Neto (VPN):

$$VAN1 = \frac{7640}{1.18} = 6{,}474.58$$

$$VAN2 = \frac{9870}{1.18^2} = 7{,}090.88$$

$$VAN3 = \frac{12245}{1.18^3} = 7{,}453.41$$

$$VAN4 = \frac{14772}{1.18^4} = 7{,}577.17$$

$$VAN5 = \frac{17460}{1.18^5} = 7{,}628.64$$

$$VAN\ total = 6{,}474.58 + 7{,}090.88 + 7{,}453.41 + 7{,}577.17 + 7{,}628.64$$

$$VAN = 36{,}224.68 - 30{,}586$$

$$VAN\ =\ 6{,}124.68$$

El resultado obtenido mostró que el proyecto generó un Valor Actual Neto positivo de S/ 6,124.68, lo que significa que los ingresos futuros descontados superaron la inversión inicial realizada. En consecuencia, el proyecto resultó económicamente rentable.

7.7.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno corresponde a la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto del proyecto sea igual a cero. Este indicador expresa el rendimiento porcentual de la inversión y permite compararlo con la tasa mínima esperada por el inversionista. Si la TIR es mayor que la tasa de interés de oportunidad, el proyecto se considera económicamente aceptable.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+TIR)^t}$$

$$VAN = -I_0 + \frac{F_1}{(1+TIR)} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \ldots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

Donde:

- I_0 : Inversión inicial
- F_t : flujo de caja neto en el periodo t
- t : el periodo de tiempo
- n: Número total de periodos evaluados
- TIR: Tasa interna de retorno

$$VAN = 0$$

$$VAN = -30100 + \frac{7640}{(1+TIR)} + \frac{9870}{(1+TIR)^2} + \frac{12245}{(1+TIR)^3} + \frac{14772}{(1+TIR)^4} + \frac{17460}{(1+TIR)^5} = 0$$

$$TIR = 26.21\ \%$$

A partir de los flujos netos de fondos del proyecto, se obtuvo una Tasa Interna de Retorno de 26.21 %. Dado que este valor fue superior a la tasa de interés de oportunidad del 18 %, se concluyó que el proyecto presentó una rentabilidad económica favorable.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el proyecto presentó una rentabilidad económica favorable. El Valor Actual Neto fue positivo, con un valor de S/ 6,124.68, lo que indicó

que la inversión inicial fue recuperada y que el proyecto generó beneficios económicos adicionales durante el periodo de evaluación. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno alcanzó un valor de 26.21 %, superior a la tasa de interés de oportunidad del 18 %, lo que confirmó la conveniencia económica del diseño propuesto.

En consecuencia, desde la perspectiva de la evaluación económica, el proyecto del reactor de pirólisis para el procesamiento de neumáticos usados granulados con capacidad de 20 kg/h resultó rentable, constituyéndose en una alternativa viable para su futura implementación.

CONCLUSIONES

El diseño del reactor de pirólisis propuesto, que procesa neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h, cumple con los requerimientos energéticos, mecánicos y técnicos. El diseño fue verificado mediante elaboración de cálculos, planos, presupuesto e interpretación de resultados; las cuales garantizan una descomposición térmica, uniforme y eficiente, constituyendo como una alternativa factible para la valorización de neumáticos fuera de uso frente a la creciente acumulación de residuos en la región del Cusco.

La aplicación de la metodología VDI 2221 y VDI 2225 permitió optimizar el diseño mediante una lista de exigencias, caja negra y matriz morfológica. Proponiéndose 3 posibles conceptos de solución y se eligió el concepto de solución N.° 2, la cual se tomó en cuenta los aspectos técnicos – económico donde X_i = 0,71; Y_i= 0,73, este ofrece un equilibrio favorable, la cual cumple requerimientos energéticos, mecánicos, económicos y de seguridad.

El diseño térmico, se realizó un balance energético integral, la cual se determinó la demanda térmica total del proceso, permitiendo la selección de un quemador de GLP de 7,5 kW, con una eficiencia de 85 % cumpliendo con los estándares de seguridad establecidos por la norma ASME PTC. Además, se calculó sistemas auxiliares de traslado de gases pirolíticos, garantizando distribución uniforme de tubería de 1” SCH 40. Se dimensiono un intercambiador de tubo y coraza bajo la configuración de flujo cruzado, con una capacidad de remoción de 6480 kJ/h, la cual contiene 8 tubos de ¾” BWG 18. La velocidad de refrigeración del agua es 1 m/s, perdida de carga calculada de 6,9 m.c.a., la cual es solventada por una bomba de impulsión de 0.37 KW. Para el sistema de separación de gases y líquidos pirolíticos, se diseñó apoyado bajo la norma GPSA, con un Q: 0,0045 m^3/s y con una velocidad terminal de partícula de 2,45 m/s.

Se realizo el diseño mecánico del reactor, condensador y separador bifásico, apoyado en normas de diseño de recipientes a presión, ASME BPVC, Sección VIII, División 1, la cual permitió determinar el espesor de ¼” de lámina de acero inoxidable AISI 304. Los cálculos estáticos del reactor muestran deformaciones y esfuerzos dentro de los limites seguros; esfuerzo de von Mises 121 MPa, factor de seguridad de 1,53 mediante uso de SolidWorks. El reactor es accionado por un motor de 0,12 HP, la cual proporciona al sistema una velocidad de 10 RPM; un sistema de transmisión por fajas la cual se calculó: 1 faja en “V” B51 con poleas de D:250 mm y d:50 mm, longitud de L:1318 mm. El eje de transmisión se calculó usando norma ASME-elíptica, la cual permitió determinar un diámetro de 1” con un factor de seguridad de 3, de acero SAE 1045.

Se desarrollo la evaluación económica la cual identifica y cuantifica costos directos e indirectos, la cual requiere una inversión de S/ 30 100,00. Con estos datos se desarrolló un flujo de caja y se calcularon los indicadores, Valor Actual Neto (VAN) fue positivo, con un valor de S/ 6 124,68, lo que indicó que la inversión inicial fue recuperada y que el proyecto generó beneficios económicos adicionales durante el periodo de evaluación. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanzó un valor de 26,21 %, superior a la tasa de interés de oportunidad del 18 %, lo que confirmó la conveniencia económica del diseño propuesto.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable construir y validar experimentalmente el prototipo del reactor de pirolisis con capacidad de 20 kg/h en condiciones reales de operación. Para verificar la estabilidad del proceso, la distribución térmica, consumo energético, la cual permitirá comparar los resultados obtenidos mediante cálculos y simulaciones en el comportamiento real del equipo

- Se recomienda complementar las metodologías de diseño, incorporando la evaluación multicriterio y análisis de sensibilidad que consideren eficiencia energética, mantenimiento, impacto ambiental. Esto fortalecerá la selección del concepto de diseño y facilitará futuras optimizaciones del reactor.

- Es recomendable realizar el diseño eléctrico detallado para la operación del reactor.

- Se recomienda complementar el estudio del diseño del soporte – estructura del reactor de pirolisis, detallado de conexiones soldadas, pernos de anclaje debido a que dichos elementos no forman parte del alcance principal de esta tesis y son necesarios para su funcionamiento.

- Se sugiere complementar el proyecto mediante un estudio de mecánica de suelos, diseño de cimentación y análisis vibracional en conjunto durante su funcionamiento.

- Se recomienda actualizar un análisis económico con cotización vigentes de materiales, fabricación para toma de decisión de inversión, debido a que dichos costos pueden variar según condiciones de mercado.

- Se recomienda realizar una evaluación de impacto ambiental y un estudio de responsabilidad social para determinar la viabilidad del proyecto en la región del Cusco.

REFERENCIAS

Aguado, R., Arrizabalaga, A., Arabiourrutia, M., Lopez, G., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Principal component analysis for kinetic scheme proposal in the thermal and catalytic pyrolysis of waste tyres. *Chemical Engineering Science*, 106, 9–17. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.11.024

American Petroleum Institute. (2008). *Specification for oil and gas separators* (API Specification 12J, 8th ed.).

Aponte, J., & Gordillo, G. (2012). *Caracterización de las propiedades energéticas de Gynerium sagittatum para ser usada como biomasa* [Proyecto de grado, Universidad de los Andes].

Arteaga, J., Arenas, E., López, D., Sánchez, C., & Zapata, Z. (2012). Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (Elaeis guineensis Jacq). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 144–161.

ASME. (2013). *Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels.* American Society of Mechanical Engineers.

Balseca-Sampedro, O. F., Aquino-Arroba, S. M., Chela-Hinojosa, S. W., & Figueroa-Moreno, J. D. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, y PS. *Polo del Conocimiento*, 6(5), 394–425. https://doi.org/10.23857/pc.v6i5.2668

Barriga, B. (2013). *Métodos de diseño en ingeniería mecánica* [Material de enseñanza]. Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2020). *Mecánica de materiales* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Camargo, G., & Moreno, J. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas* [Proyecto de trabajo de grado, Universidad Libre].

Colet, M. (2015). *Estudio de las variables de operación del proceso de pirólisis catalítica de polietileno* [Tesis de maestría, Universidad de Chile].

Cortés, D. (2015). *Exploración de la obtención del fuel oil a partir de pirólisis de desechos de neumáticos en presencia de catalizadores básicos* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].

Dickerson, T., & Soria, J. (2013). Catalytic fast pyrolysis: A review. *Energies, 6*(1), 514–538.

Díez, C., Sánchez, M. E., Haxaire, P., Martínez, O., & Morán, A. (2005). Pyrolysis of tyres: A comparison of the results from a fixed-bed laboratory reactor and a pilot plant (rotatory reactor). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74(1–2), 254–258. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.11.024

Fonseca, W. (2016). *Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

Google. (2026). [Mapa de la ubicación del área de estudio en la región Cusco]. Google Maps. https://www.google.com/maps

GPSA. (1998). *Engineering Data Book* (11.ª ed.). Gas Processors Suppliers Association.

Hoang, A. T., Nguyen, T. H., & Nguyen, H. P. (2024). Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46*(1), 6305–6322.

Iresiduo. (2017, 18 de septiembre). Las llantas usadas, materia prima para nuevos combustibles. *Agencia Informativa del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.*

Julian Daga, R. F., Vilchez Becerra, K. R., Figueroa Bados, J. S., Condor Fabian, J. M., Vilchez Becerra, K. F., & Hurtado Rengifo, P. J. (2022). Design and control of a pyrolysis reactor to obtain fuel with plastic waste in Huancayo-Peru. *2022 5th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*, 17–21. https://doi.org/10.1109/RCAE56054.2022.9995988

Lanteigne, J.-R., Laviolette, J.-P., Tremblay, G., & Chaouki, J. (2013). Predictive kinetics model for an industrial waste tire pyrolysis process. *Energy & Fuels, 27*(2), 1040–1049.

Lara, D., et al. (2021). Characterization and use of char produced from pyrolysis of post-consumer mixed plastic waste. *Water*, 13, artículo 1188. https://doi.org/10.3390/w13091188

León Estrada, J. M. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes sujetos a presión* [Manual técnico]. Ingeniería León, S. A. de C. V.

Megyesy, E. F. (1992). *Pressure vessel handbook* (9.ª ed.). Pressure Vessel Publishing.

Ministerio del Ambiente. (2021a, 12 de octubre). Neumáticos fuera de uso influyen significativamente en la generación de residuos sólidos. gob.pe. https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/543946-neumáticos-fuera-de-uso-influyen-significativamente-en-la-generacion-de-residuos-solidos

Ministerio del Ambiente. (2021b). Régimen especial de gestión y manejo de neumáticos fuera de uso (NFU) (Decreto Supremo N.° 024-2021-MINAM). https://faolex.fao.org/docs/pdf/per204653anx.pdf

Ochoa Mariño, A. P., & Mahecha Suárez, D. P. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas* [Tesis de pregrado, Universidad Libre].

Osayi, J. I., Iyuke, S., & Ogbeide, S. E. (2014). Biocrude production through pyrolysis of used tyres. Journal of Catalysts, 2014, artículo 386371. https://doi.org/10.1155/2014/386371

Perry, R. H., & Green, D. W. (1997). *Perry's chemical engineers' handbook* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Pretell, V., Astorayme, M., Pilco, A., & Ramos, W. (2021). Producción de combustibles líquidos por pirólisis al vacío de neumáticos usados [Ponencia]. *19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, Buenos Aires, Argentina. https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.70

Ramli, T., & Sri, R. (2019). Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. *Energy Reports*, 5, 70–77.

Repsa. (24 de abril de 2023). *¿Con qué materiales se fabrica una llanta? Materias primas de las llantas*. Obtenido de https://repsaautocentro.com/con-que-materiales-se-fabrica-una-llanta-materias-primas-de-las-llantas/

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2023). *Datos climatológicos históricos del Perú.* https://www.senamhi.gob.pe/

Suárez, E. (2018). *Obtención de productos adhesivos a partir de pirólisis de llantas recicladas* [Tesis de maestría, Universidad de La Sabana].

Towler, G., & Sinnott, R. (2008). *Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design.* Butterworth-Heinemann.

Towler, G., & Sinnott, R. (2022). *Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design* (3.ª ed.). Butterworth-Heinemann/Elsevier.

Vargas-Santillán, A., Aguilar-González, A. L., Zúñiga-Neria, G. C., & Castro-Montoya, A. J. (2019). Análisis tecno-económico de gasificación de polietileno, caso en México. *Revista de Tecnologías en Procesos Industriales*, 3(7), 1–5. https://doi.org/10.35429/JTIP.2019.7.3.1.5

Marulanda Arévalo, J. L., Burbano, V. M., & Peláez, J. A. (2013). Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbono por SMAW. Revista Facultad de Ingeniería, 22(35), 91–100. https://doi.org/10.19053/01211129.2517

ANEXOS

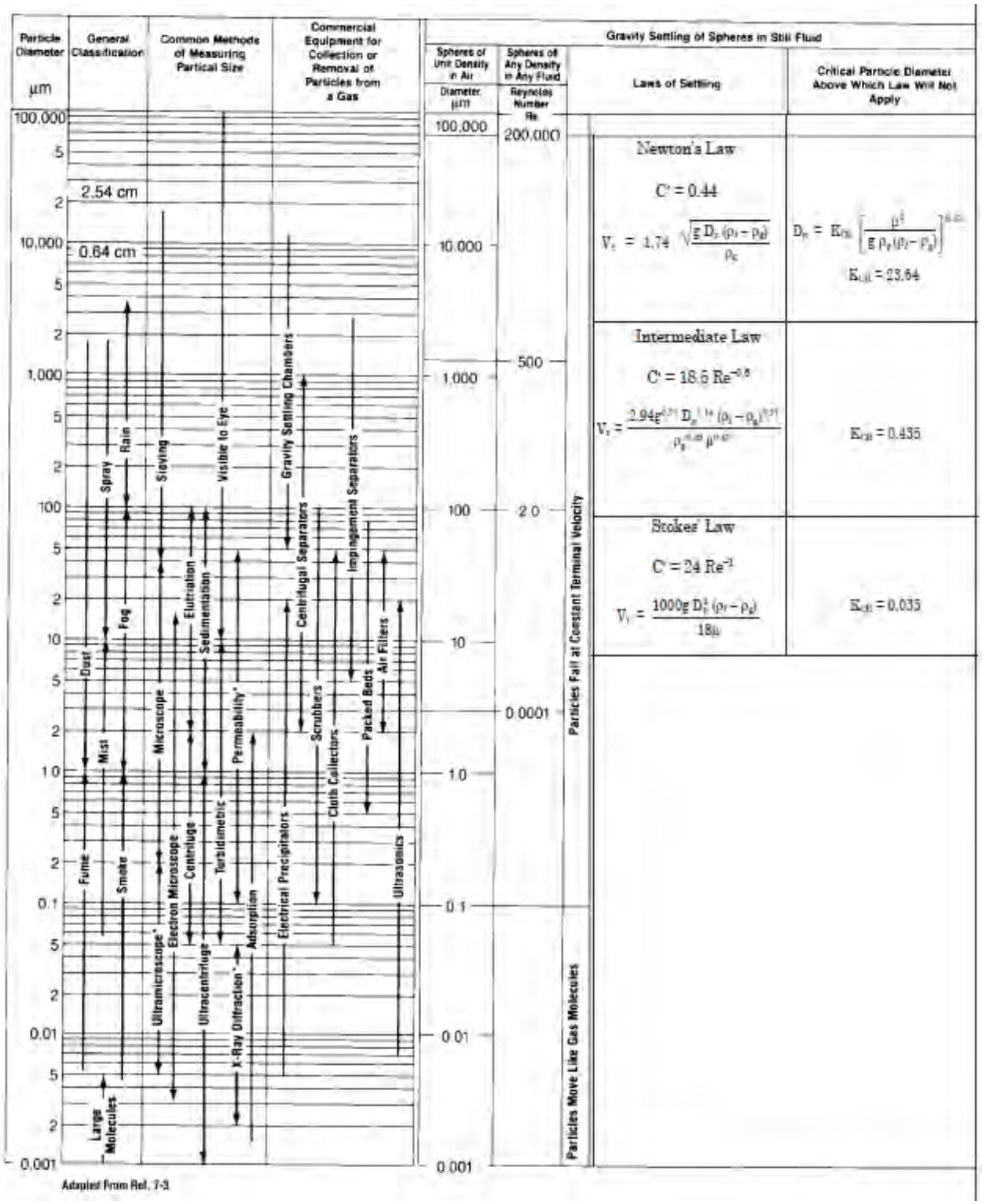
Anexo 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

DISEÑO DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS APARTIR DE NEUMÁTICOS USADOS GRANULADOS CON UNA CAPACIDAD DE 20 KG/H EN LA REGIÓN CUSCO				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
¿De qué manera se puede aprovechar los neumáticos usados granulados, utilizando un reactor de pirólisis con una capacidad de 20 kg/h en la región del Cusco?	Diseñar un reactor de pirólisis a partir de neumáticos usados granulados, con una capacidad de 20 kg/h en la Región del Cusco	El diseño de reactor de pirólisis con capacidad 20 kg/h, permitirá aprovechar los neumáticos usados granulados, utilizando herramientas de diseño conceptual, diseño térmico y mecánico, simulación y análisis económico.	Variables Independientes •Densidad y tamaño de material de neumáticos usados (kg/m3) •Flujo masico de gránulos de neumáticos usados (kg/h) •Parámetros de operación (temperatura °C, presión de diseño Pa) Variables Dependientes Rendimiento de productos (%líquidos, gases y char)	TIPO: aplicada con un enfoque cuantitativo. NIVEL: Descriptivo propositivo DISEÑO: No Experimental
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS		
•¿Qué conceptos y metodologías se deben aplicar para el diseño de reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h? • ¿Cuáles son los parámetros para el diseño térmico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados para una capacidad de 20 kg/h? •¿En qué medida el desarrollo del diseño mecánico; podría dar una solvencia técnica en el dimensionamiento de componentes mecánicos del reactor de pirólisis con una capacidad de 20 kg/h? •¿De qué manera se puede verificar la rentabilidad y factibilidad económica del reactor de pirólisis?	•Definir los conceptos y metodologías para el diseño de reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h. •Definir los parámetros técnicos y desarrollar el diseño térmico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h. •Desarrollar el diseño mecánico del reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h. •Desarrollar un análisis económico del reactor de pirólisis, para determinar su rentabilidad y factibilidad mediante los indicadores VAN y TIR	• Los conceptos y metodología identificados en la presenta investigación garantizan el diseño de reactor de pirólisis de neumáticos usados granulados con una capacidad de 20 kg/h. • El diseño térmico, permitirá garantizar el tiempo y capacidad para 20 kg de gránulos de neumáticos usados. • El diseño mecánico del sistema permitirá garantizar el funcionamiento y rendimiento del reactor de pirólisis de neumáticos usados con una capacidad de 20 kg/h • La evaluación económica, justificara la inversión.		

Anexo 2. Propiedades físicas y químicas de gránulos de caucho

PROPIEDADES FÍSICAS	**DESCRIPCIÓN**
Forma	Sólidos en forma de granulados y polvo.
Color	Negro
Olor	Caucho característico
Densidad (gr/cm3)	0.7942 – 1.032
Peso especifico	1,15 – 1,27
Humedad (%)	< 0.75
Punto de combustión (ºC)	300 - 450
PROPIEDADES QUÍMICAS	**DESCRIPCIÓN**
Extracto cetónico (%)	5,00 – 22,00
Contenido en cenizas (%)	7,00 – 11,00
Contenido en polímeros NR/SR (%)	70/30 – 60/40
Contenido de negro de humo (%)	26,00 – 38,00
Contenido de caucho natural (%)	10,00 – 35,00
Contenido en hidrocarburo de caucho (%)	57,00 - 58,00
Contenido de Plomo (mg/kg)	< 0.03
Azufre (%)	1,0 – 7,00
pH (25ºC)	8,12 – 8,20
Solubilidad	Insoluble en agua, parcialmente soluble en acetona.

Anexo 3. Leyes de sedimentación por gravedad y características de las partículas



Anexo 4. Electrobomba centrifuga

HF Electrobombas centrífugas

➡ Caudales medios

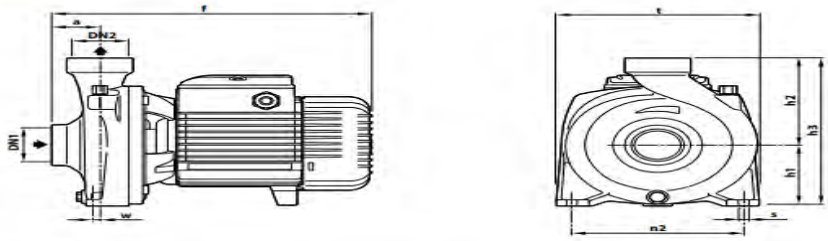
Aguas limpias
Uso agrícola
Uso industrial

TIPO		POTENCIA (P2)			Q m³/h	0	3	6	9	12	15	18	21	24	30	36	42
Monofásico	**Trifásico**	**kW**	**HP**	**3~**	l/min	**0**	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**	**500**	**600**	**700**
HFm 50B	**HF 50B**	0.37	0.50	**IE2**		10	10	9.5	8.5	7.5	6	4					
HFm 50A	**HF 50A**	0.55	0.75			12	12	11.5	11	9.6	8	6					
HFm 51B	**HF 51B**	0.60	0.85			18.2	17.2	16	14	11.5	9	5.4					
HFm 51A	**HF 51A**	0.75	1			21.2	20.2	19	17	14.5	11.6	8.4					
HFm 70C	**HF 70C**	1.1	1.5	**IE3**		27.5	27.5	26.5	25.1	23	20.3	17					
HFm 70B	**HF 70B**	1.5	2			31	31	30.1	28.8	26.8	24.2	21					
–	**HF 70A**	2.2	3		**H** m	38	38	37.5	36.5	35	32.8	30					
HFm 5B	**HF 5B**	0.75	1			13.7	–	13.2	13	12.5	11.6	10.5	9.2	8	5		
HFm 5A	**HF 5A**	1.1	1.5			16	–	15.4	14.9	14.2	13.5	12.6	11.5	10.4	7.6	4.3	
HFm 5BM	**HF 5BM**	1.1	1.5	**IE3**		19	–	18.5	18	17	16	15.2	14	12.8	9.7	6	
HFm 5AM	**HF 5AM**	1.5	2			22	–	21.5	21	20.5	19.8	19	18	16.8	13.8	10	
HFm 5ARM	**HF 5ARM**	2.2	3			27	–	27	26.8	26.4	25.6	24.8	23.8	22.5	19.8	16.2	12

Q = Caudal **H** = Altura manométrica total **HS** = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestaciones según EN ISO 9906 Grado 3B.

DIMENSIONES Y PESOS



TIPO		BOCAS		DIMENSIONES mm									kg	
Monofásico	Trifásico	DN1	DN2	a	f	h1	h2	h3	t	n2	w	s	1~	3~
HFm 50B	HF 50B	1½"	1½"	42	270	82	118	200	166	135	-8	10	8.1	8.1
HFm 50A	HF 50A												8.9	8.2
HFm 51B	HF 51B			45	303	92	133	225	190	160	2		12.9	12.7
HFm 51A	HF 51A												13.2	13.2
HFm 70C	HF 70C			48.5	373	114	155	269	216	171	12	12	20.0	20.0
HFm 70B	HF 70B												21.5	21.5
–	HF 70A				393								–	24.3
HFm 5B	HF 5B	2"	2"	43	316	97	141	238	192	160	-68	10	14.1	14.1
HFm 5A	HF 5A												15.1	14.1
HFm 5BM	HF 5BM			59	386	110	150	260	208		12.5	11	20.3	20.3
HFm 5AM	HF 5AM												21.8	21.8
HFm 5ARM	HF 5ARM				406								24.6	24.6

Anexo 5. Motor del catálogo Sew Eurodrive

Product information

SEW EURODRIVE

Catalog designation

R07DR2S56MR4
Helical gearmotors R..DRS.. (IE1)

Product data

Rated motor speed	[rpm]	: 1380
Output speed	[rpm]	: 51
Overall gear ratio		: 26,97
Output torque	[lb-in]	: 150
Service factor SEW-FB		: 3,00
Mounting position		: M1
Base / top coat		: Unpainted
Terminal box position [°]	[°]	: 0
Cable entry position		: X
Output shaft	[in]	: 0.750x1.57
Design type		: Foot-mounted design
Permitted output overhung load with n=1400	[Lb]	: 315
Lubricant quantity 1st gear unit	[Gallons]	: 0,032
Motor power	[HP]	: 0,12
Duration factor		: S1-100%
Efficiency class		: -
Efficiency (50/75/100% Pn)	[%]	: 43,9 / 51,4 / 54,8
CE mark		: Yes
Motor voltage	[V]	: 400
Connection type		: star
Wiring diagram		: R10
Frequency	[Hz]	: 50
Rated current	[A]	: 0,35
Cos Phi		: 0,61
Thermal class		: 155(F)
Motor protection type		: IPS4
Design requirement		: Europe (CE)
Mass moments of inertia (referring to the input side)	[lb-ft²]	: 0,0028
Weight	[kg]	: 6.90

Additional feature

Output shaft: 0.750x1.57 in
Thermal class 155(F)
ECO2 natural aluminum

Anexo 6. Coeficiente de corrección de la potencia

Tabla Nº 3 - Coeficiente de corrección de la potencia						
Tipo de máquina conductora Tipo de máquina conducida	Motores de corriente alterna, torque normal, a jaula de ardilla, sincrónicos, fase partida. Motores de corriente continua, bobinado en shunt. Máquinas de combustión interna, cilindros múltiples.			Motores de corriente alternada, alto torque, alto deslizamiento, bobinado en serie y anillado colector. Motores de corriente continua, bobinado en serie y bobinado compound. Máquina a combustión interna, monocilíndrica. Ejes en línea. Arranque directo y con embrague.		
	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias	Servicio intermedio hasta 7 horas diarias	Servicio normal 8 a 15 horas diarias	Servicio continuo más de 16 horas diarias
Agitador para líquidos y semilíquidos, ventiladores y aspiradores, compresores y bombas centrífugas. Sopladores hasta 10 HP. Transportadores livianos.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Cintas transportadoras para arena, granos, etc. Mezcladores de panadería. Sopladores de má de 10 HP, generadores. Línea a ejes (ejes principales), máquinas de lavaderos, máquinas herramienta, punzadoras, prensa, guillotinas, bombas rotativas positivas. Máquinas de imprenta, zarandas vibradoras y giratorias.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Máquina de ladrillos y cerámicas, elevadores a cangilones. Generadores y excitatrices.Compresores a pistón, transportadores, molinos a martillos, molinos batidores para papel, bombas a pistón, sopladores positivos. Pulverizadores, desmenuzadoras, sierras y máquinas para elaboración de madera, máquinas textiles.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6

Anexo 7. Selección de correa comercial según longitud primitiva nominal

Tabla Nº 6	Longitud primitiva nominal					
Correa (in)	Sección Z (mm)	Sección A (mm)	Sección B (mm)	Sección C (mm)	Sección D (mm)	Sección E (mm)
41	1066	1075	1086	-	-	-
42	1092	1106	1100	-	-	-
43	1117	1134	1140	-	-	-
44	1143	1153	1156	1191	-	-
45	1168	1186	1184	1217	-	-
46	1193	1199	1204	1242	-	-
47	1219	1232	1237	1267	-	-
48	1244	1262	1268	1293	-	-
49	1270	1280	1288	1318	-	-
50	1295	1306	1318	1344	-	-
51	1320	1330	1328	1357	-	-
52	1346	1354	1367	1394	-	-
53	1371	1381	1392	1429	-	-
54	1397	1405	1410	1442	-	-
55	1422	1429	1443	1460	-	-
56	1447	1459	1460	1497	-	-
57	1473	1492	1491	1527	-	-
58	1498	1507	1512	1550	-	-
59	1524	1532	1541	1576	-	-
60	1549	1556	1556	1598	-	-
61	-	1584	1601	1623	-	-
62	-	1605	1626	1648	-	-
63	-	1633	1641	1674	-	-
64	-	1658	1674	1699	-	-
65	-	1683	1695	1725	-	-
66	-	1714	1724	1745	-	-
67	-	1742	1743	1775	-	-
68	-	1767	1770	1788	-	-
69	-	1785	1794	1826	-	-
70	-	1813	1818	1847	-	-
71	-	1841	1846	1877	-	-
72	-	1862	1878	1897	-	-
73	-	1887	1900	1928	-	-
74	-	1913	1924	1953	-	-
75	-	1937	1947	1979	-	-
76	-	1963	1973	1989	-	-
77	-	1989	1999	2015	-	-
78	-	2013	2024	2042	-	-

Anexo 8. Especificaciones para tubos de acero comercial norma BWG-ANSI

Tabla 7: Especificaciones para tubos de acero comercial según norma ANSI.

D_{Nom} pulg	De pulg	Cédula	Di pulg
3/4	1,05	40	0,824
		80	0,742
1	1,315	40	1,049
		80	0,957
1 1/4	1,660	40	1,38
		80	1,278
1 1/2	1,900	40	1,61
		80	1,50
2	2,375	40	2,067
		80	1,939
2 1/2	2,875	40	2,469
		80	2,323
3	3,5	40	3,068
		80	2,900
3 1/2	4,0	40	3,548
		80	3,364
4	4,5	40	4,026
		80	3,826
5	5,536	10 S	5,295
		40	5,047
		80	4,813
6	6,625	10 S	6,357
		40	6,065
		80	5,761
8	8,625	10 S	8,329
		30	8,071
		80	7,625
10	10,75	10 S	10,420
		30	10,192
		XX	9,750
12	12,75	10 S	12,39
		30	12,09
		XX	11,75
14	14,0	10	13,5
		Estándar	13,25
		XX	13,00
16	16,0	10	15,50
		Estándar	15,25
		XX	15,00
18	18,0	10 S	17,624
		Estándar	17,25
		XX	17,00

Tabla 6: Especificaciones para tubos de acero comercial según norma BWG.

De (pulg)	BWG	Di pulg	De pulg	BWG	Di pulg
1/4	22	0,194	1 1/4	7	0,890
	24	0,206		8	0,920
	26	0,214		10	0,982
3/8	18	0,277		11	1,010
	20	0,305		12	1,032
	22	0,319		13	1,060
	24	0,331		14	1,084
1/2	16	0,370		16	1,120
	18	1,402		18	1,152
	20	0,430		20	1,180
	22	0,444		10	1,232
5/8	12	0,407		12	1,282
	13	0,435		14	1,334
	14	0,459		16	1,370
	15	0,481	2	11	1,760
	16	0,495		13	1,810
	17	0,509	2 1/2	9	2,204
	18	0,527			
	19	0,541			
	20	0,555			
3/4	10	0,482			
	11	0,510			
	12	0,532			
	13	0,560			
	14	0,584			
	15	0,606			
	16	0,620			
	17	0,634			
	18	0,652			
	20	0,682			
7/8	10	0,607			
	11	0,635			
	12	0,657			
	13	0,685			
	14	0,709			
	16	0,745			
	18	0,777			
	20	0,805			
1	8	0,670			
	10	0,732			
	11	0,760			
	12	0,782			
	13	0,810			
	14	0,834			
	15	0,856			
	16	0,870			
	18	0,902			
	20	0,930			

Anexo 9. Propiedades del acero AISI 304 y AISI 316

Aceros Inoxidables	Normas		
	AISI	W. Nr.	DIN
Austeníticos	**304** **304L**	**1.4301** **1.4306**	**X5CrNi18-10** **X2CrNi19-11**

Propiedades del Acero

Propiedades mecánicas

Temperatura ambiente

Tipo Acero	Rango de dimensiones	Límite Elástico 0,2% ($R_{p\,0,2}$) min. N/mm²	Resistencia a la tracción (R_m) N/mm²	Elongación (A_5) min. %
304	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 230	540 - 750	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 210	520 - 720	≥ 45
304L	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥ 220	520 - 670	≥ 45
	Laminado en caliente e ≤ 6 mm.	≥ 200	520 - 670	≥ 45

Temperatura variable

Tipo Acero	Temperatura ºC	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
304	Límite elástico 0,2% ($R_{p\,0,2}$) min. N/mm²	157	142	127	118	110	104	98	95	92	90
304L		147	132	118	108	100	94	89	85	81	80

Aceros Inoxidables	Normas		
	AISI	W. Nr.	DIN
Austeníticos	**316** **316L**	**1.4401** **1.4404**	**X5CrNiMo17-12-2** **X2CrNiMo17-12-2**

Propiedades del Acero

Propiedades mecánicas

Temperatura ambiente

Tipo Acero	Rango de dimensiones	Límite Elástico 0,2% ($R_{p\,0,2}$) min. N/mm²	Resistencia a la tracción (R_m) N/mm²	Elongación (A_5) min. %
316	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥240	530 - 680	≥ 40
	Laminado en caliente e ≤ 12 mm.	≥220		
316L	Laminado en frío e ≤ 6 mm.	≥240	530 - 680	≥ 40
	Laminado en caliente e ≤ 12 mm.	≥220		

Temperatura variable

Tipo Acero	Temperatura ºC	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
316	Límite elástico 0,2% ($R_{p\,0,2}$) min. N/mm²	196	177	162	147	137	127	120	115	112	110	108
316L		182	166	152	137	127	118	113	108	103	100	98

Anexo 10. Tabla de costos operativos

Costos variables		
Concepto	**Mensual**	**Anual**
NFU- Granulados	S/ 4,752.00	S/ 57,024.00
GNV	S/ 180.00	S/ 2,160.00
Electricidad	S/ 60.00	S/ 720.00
		S/ 59,904.00
Costos fijos		
Concepto	**Mensual**	**Anual**
Operador	S/ 1,800.00	S/ 21,600.00
Mantenimiento	S/ 150.00	S/ 1,800.00
		S/ 23,400.00

Clasificación	Mensual (S/)	Anual (S/)	Porcentaje del Total
Costos Variables	4,992.00	59,904.00	71.90%
Costos Fijos	1,950.00	23,400.00	28.10%
Total OPEX Producción	**6,942.00**	**83,304.00**	**100.00%**

Anexo 11. Tabla de ingresos por venta, rendimiento de productos

Producto	Rendimiento (%)	Producción Diaria (kg)	Producción Mensual (kg)	Producción Anual (kg)	Precio de Venta (S/ por kg)	Ingreso Mensual (S/)	Ingreso Anual (S/)
Aceite	50.00%	80	1,920.00	23,040.00	S/ 3.50	S/ 6,720.00	S/ 80,640.00
Char	30.00%	48	1,152.00	13,824.00	S/ 1.20	S/ 1,382.40	S/ 16,588.80
Gas	20.00%	32	768	9,216.00	S/ 0.70	S/ 537.60	S/ 6,451.20
TOTAL	**100.00%**	**160**	**3,840.00**	**46,080.00**	—	**S/ 8,640.00**	**S/ 103,680.00**

Anexo 12. Cotizaciones

INMISAC
SUMINISTROS INDUSTRIALES
RUC: 20603350571

FICHA TÉCNICA CAUCHO GRANULADO NACIONAL

PRODUCTO:NACIONAL

PRESENTACIÓN:

•SACO30KILOS
• TONELADAS

El caucho granulado es ideal para ser usado como complemento para el desarrollo de proyectos deportivos, el caucho que comercializamos es de color negro SBR es apto para su uso endistintas alturas y densidades de grasssintéticosegún el deporte al que será destinado el campo.
El caucho proviene deneumáticosreciclados, el cual pasa por un proceso de desimantado y lavado para su uso comercial.
Sedebeevitarutilizarparalainstalacióndererellenodecaucho en polvo, caucho rallado o caucho de colores.

Su granulometría (tamaño) influirá en las propiedades finales del pavimento.
Se recomienda:

CAUCHO GRANULADO SBR (StyreneButadienRubber)
GRANULOMETRÍA: Entre (1,50mm a 4.5mm)

Características orientativas:
•Origen neumáticosfuera de uso (NFU), color Negro
•Porcentaje de los fino (< 0,5mm) serainferioral 5%
•El peso de partículasde metal < 0,01 %
•El peso de restos textiles < 1%

CLIENTE
HINOJOSA TTITO LUIS ALDAIR
10761631751
0
0
929423063
cliente

COT-0365-2026
INMISAC
SUMINISTROS INDUSTRIALES
RUC: 20603350571
CCL
www.inmisac.com
ventas@inmisac.com
Telf.: 922908056 / 937339564

Valido hasta:27/06/2026 *Emitido el:28/05/2026*

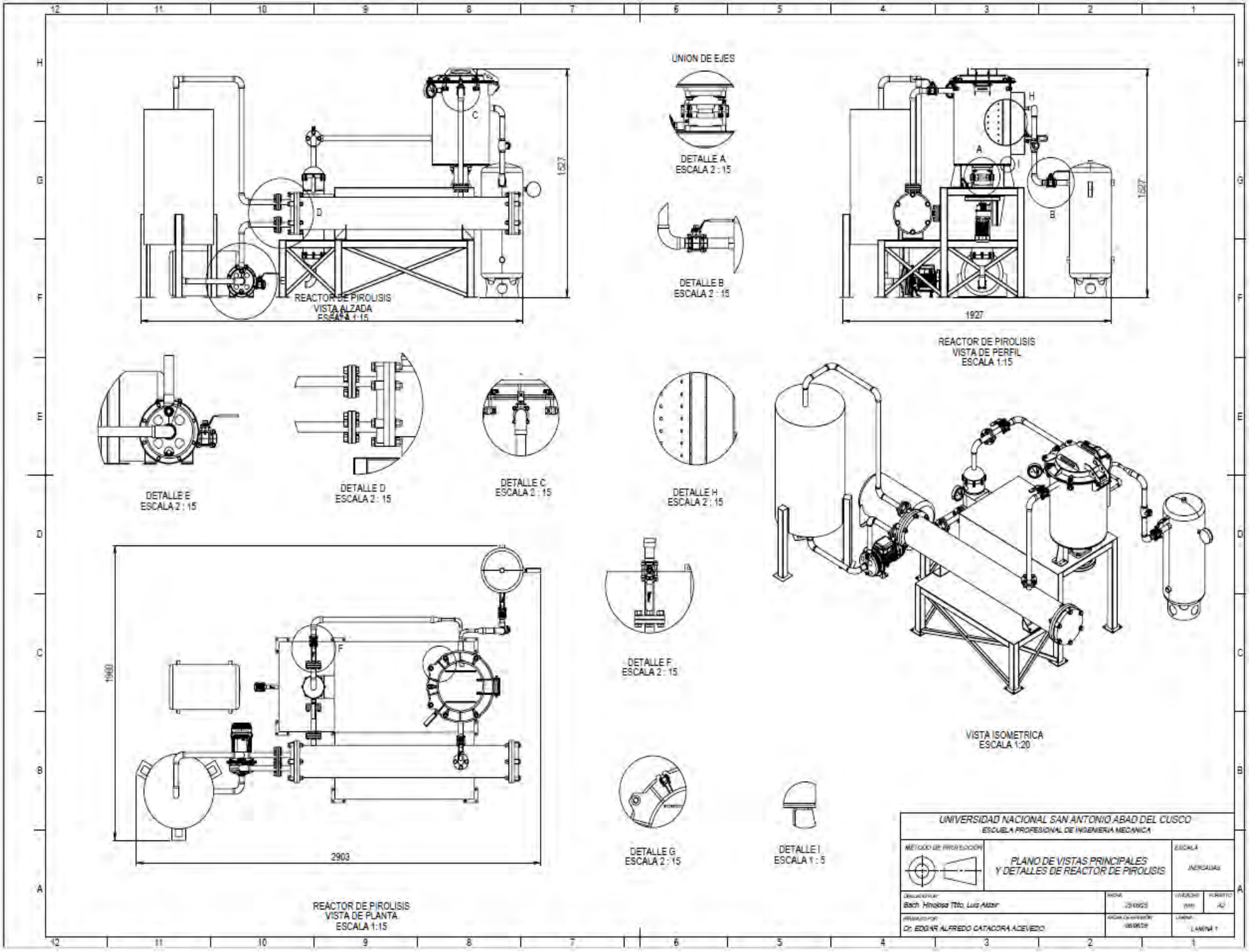
COTIZACIÓN

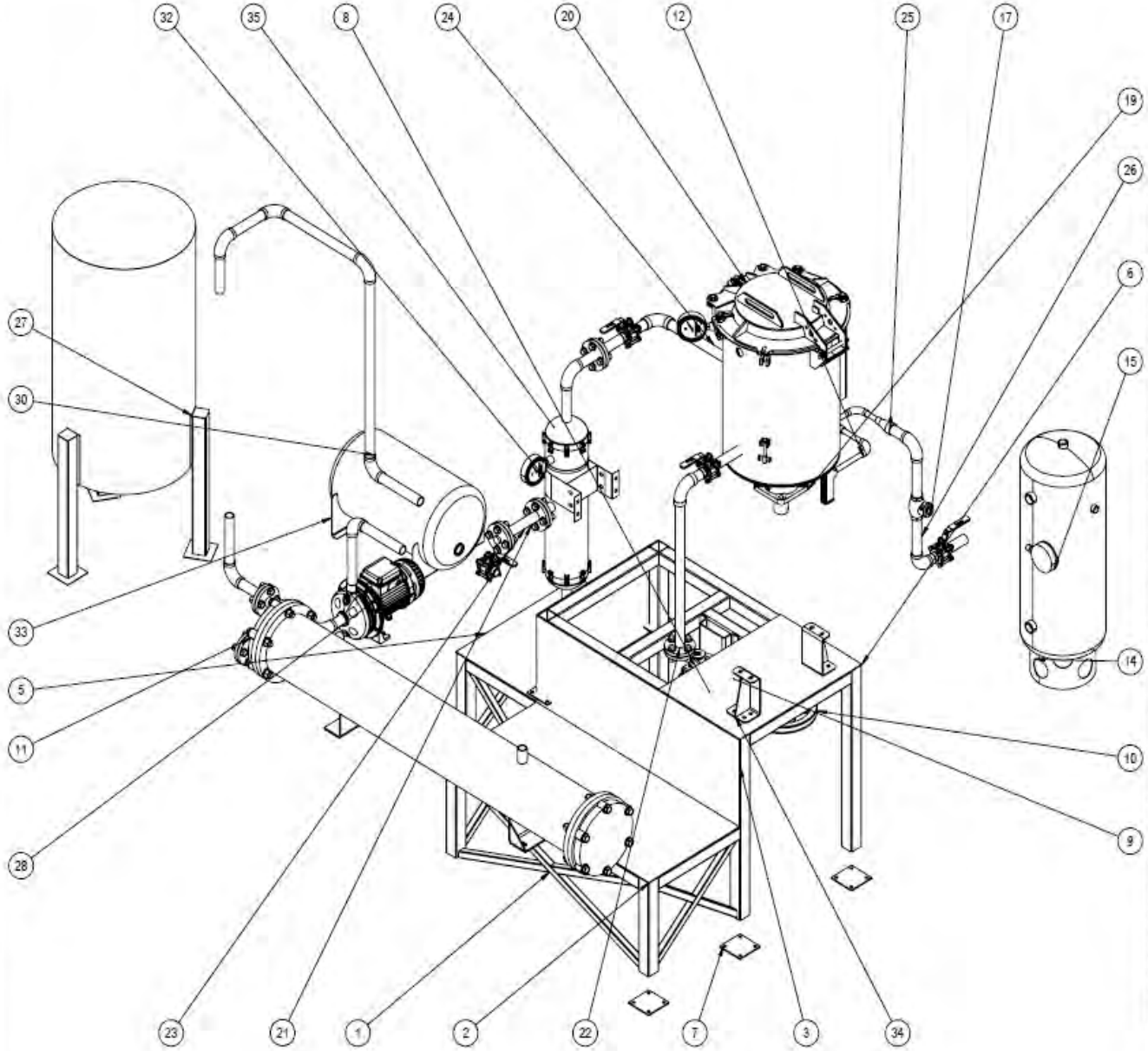
CODIGO	PRODUCTO	PROCEDENCIA// MARCA	U.M	CANT.	P. UNIT.	SUB TOTAL	DCTO	TOTAL
PR00728	Caucho granulado SBR de 1.5 mm a 4.5 mm saco 50 kilos	NACIONAL	SACO	40	S/ 63.83	S/ 2553.2	0%	S/ 655.32

Esta Cotización tiene una validez de :30Dias.
Condición de pago: contado
Observación: ninguna
Plazo de Entrega: 1 a 5 dias hábiles según disponibilidad de stock, previa confirmación de deposito
¡Realizamos envios a nivel nacional!
Una vez solicitado el producto vía O.C o SOLPED, no se aceptan cambios ni devoluciones
CTA.BANCARIA: BCP SOLES 19476074593021 CCI 00219417607459302192 INVERSIONES NIKKO MIRANDA S.A.C
CTA.BANCARIA: INTERBANK SOLES 200-3007514229 CCI 003-200-003007514229-36 INVERSIONES NIKKO MIRANDA S.A.C
CTA.BANCARIA: INTERBANK DOLARES 200-3007514236 CCI 003-200-003007514236-31 INVERSIONES NIKKO MIRANDA S.A.C
NOTA La cotización ya incluye costo de envio a toda Lima metropolitana incluyendo la gestion en agencias. El despacho se realiza,una vez confirmado el pago previa coordinación.
¡Gracias por su confianza!

SUB TOTAL	S/ 2553.2
IGV(18%)	S/ 459.58
TOTAL	S/ 3012.77

Anexo 13. Planos


UNION DE EJES
DETALLE A
ESCALA 2 : 15
DETALLE B
ESCALA 2 : 15
REACTOR DE PIROLISIS
VISTA ALZADA
ESCALA 1:15
1527
1927
REACTOR DE PIROLISIS
VISTA DE PERFIL
ESCALA 1:15
DETALLE E
ESCALA 2 : 15
DETALLE D
ESCALA 2 : 15
DETALLE C
ESCALA 2 : 15
DETALLE H
ESCALA 2 : 15
DETALLE F
ESCALA 2 : 15
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:20
1960
2903
REACTOR DE PIROLISIS
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:15
DETALLE G
ESCALA 2 : 15
DETALLE I
ESCALA 1 : 5
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA
METODO DE PROYECCIÓN
PLANO DE VISTAS PRINCIPALES
Y DETALLES DE REACTOR DE PIROLISIS
ESCALA
INDICADAS
Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair
Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO
LAMINA 1



VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:20

N.º DE PIEZA	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANT.	UBICACIÓN
35	SEPARADOR ARMADO MODIFICADO	----	1	E - 6 / D - 8
34	SOPORTE DE REACTOR	AISI 316	2	
33	TANQUE DE ALMACENAMIENTOS DE CONDENSADOS	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	E - 9 / E - 10
32	ABRAZADERA DE SEPARADOR	---	1	
31	LINEA CONDEBANDOR TANQUE	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
30	CODO	ACERO INOXIDABLE AISI 304.	11	
29	LINEA DE TANQUE DE AGUA - CONDENSADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
28	BOMBA	----	1	
27	TANQUE DE AGUA	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	E - 11 / F - 11
26	LINEA DE TANQUE DE GAS QUEMADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
25	REDUCTOR	---	2	
24	LINEA SEPARADOR QUEMADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
23	LINEA CONDENSADOR-SEPARADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
22	LINEA DE TUBERIA REACTOR-ITERCAMBIADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
21	BRIDA ARMADA	----	4	
20	CILINDRO ESTÁTICO	AISI 316	1	E - 6 / F - 7
19	CHUMACERA TIPO BRIDA UCF 2"	----	1	
18	SEPARADOR ARMADO	----	1	
17	VÁLVULA CHECK	---	1	
16	VALVULA DE BOLA DE ACERO INOX	---	4	
15	MANOMETRO DE PRESION	---	2	
14	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GAS COMBUSTIBLE	---	1	D-4 / E - 4
13	QUEMADOR	----	1	
12	LINEA REDUCTOR SEPARADOR QUEMADOR	ACERO INOXIDABLE AISI 304	1	
11	TANQUE CONBEDANDOR ARMADO	----	1	E - 6 / D - 9
10	TRANSMISION ARMADA	----	1	
9	RIGIDIZADOR DE BASE DE CHUMACERA	ASTM-A36	1	
8	MOTOR ARMADO CON SOPORTE	----	1	
7	PLATABANDA-4 mm	ASTM-A36	8	
6	PLANCHA SUPERIOR	ASTM-A36	1	
5	PLANCHA INFERIOR 2	ASTM-A36	1	
4	PLANCHA LATERAL	ASTM-A36	1	
3	PLANCHA FRONTAL 2	ASTM-A36	1	
2	PLANCHA INFERIOR 1	ASTM-A36	1	
1	PLATAFORMA	ASTM-A36	1	

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCIÓN

PLANO DE VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES DE REACTOR DE FIROLISIS

ESCALA: INDICADAS

DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair

FECHA: 25/06/25

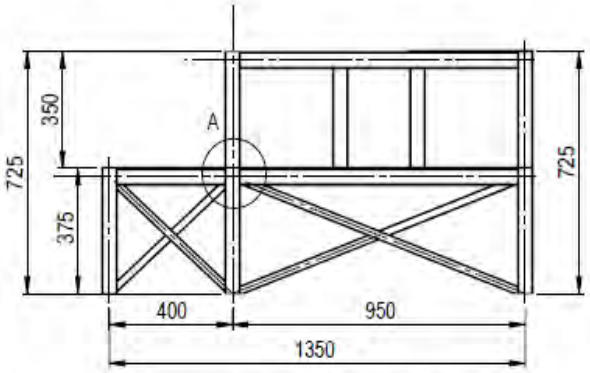
LONGITUD: mm

FORMATO: A2

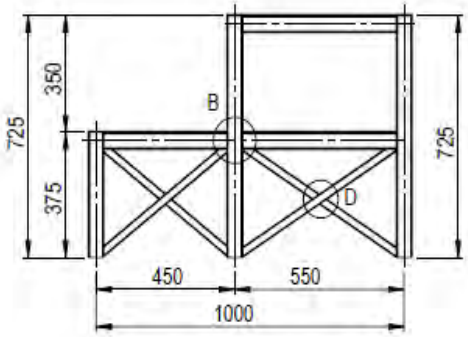
DIRIGIDO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO

FECHA DE REVISIÓN: 26/06/25

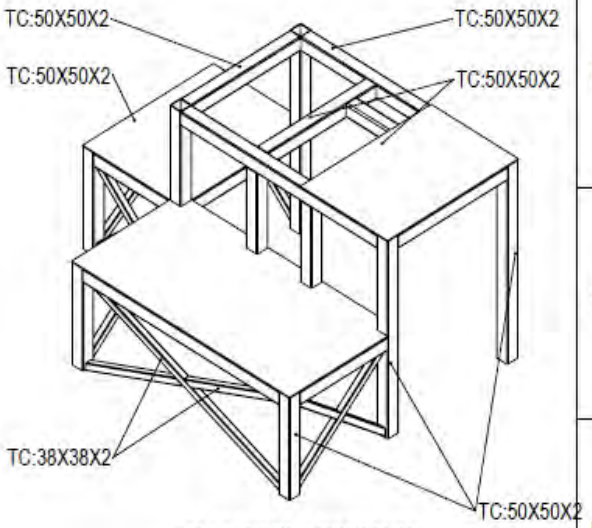
LÁMINA: LÁMINA 2



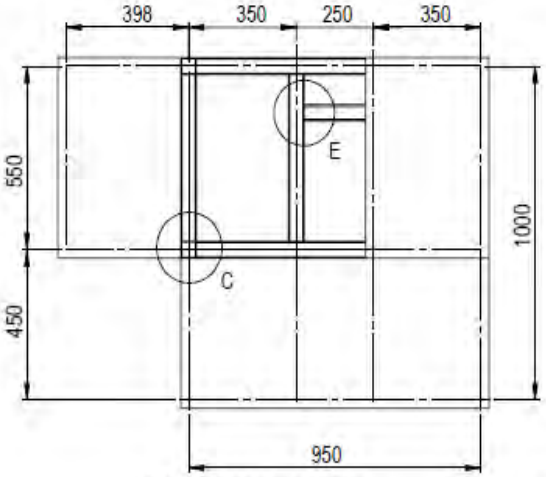
PLATAFORMA PORTANTE
VISTA ALZADA
ESCALA 1:15



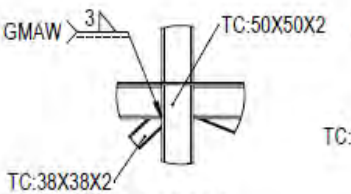
PLATAFORMA PORTANTE
VISTA DE PERFIL
ESCALA 1:15



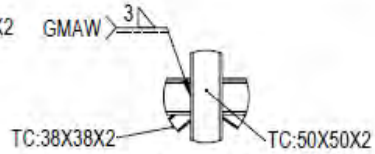
PLATAFORMA PORTANTE
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:15



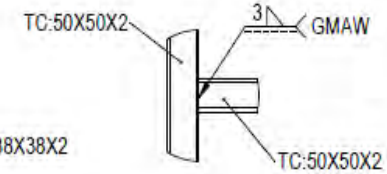
PLATAFORMA PORTANTE
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:15



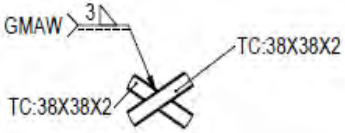
DETALLE A
ESCALA 2 : 15



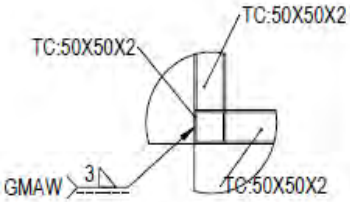
DETALLE B
ESCALA 2 : 15



DETALLE E
ESCALA 2 : 15



DETALLE D
ESCALA 2 : 15



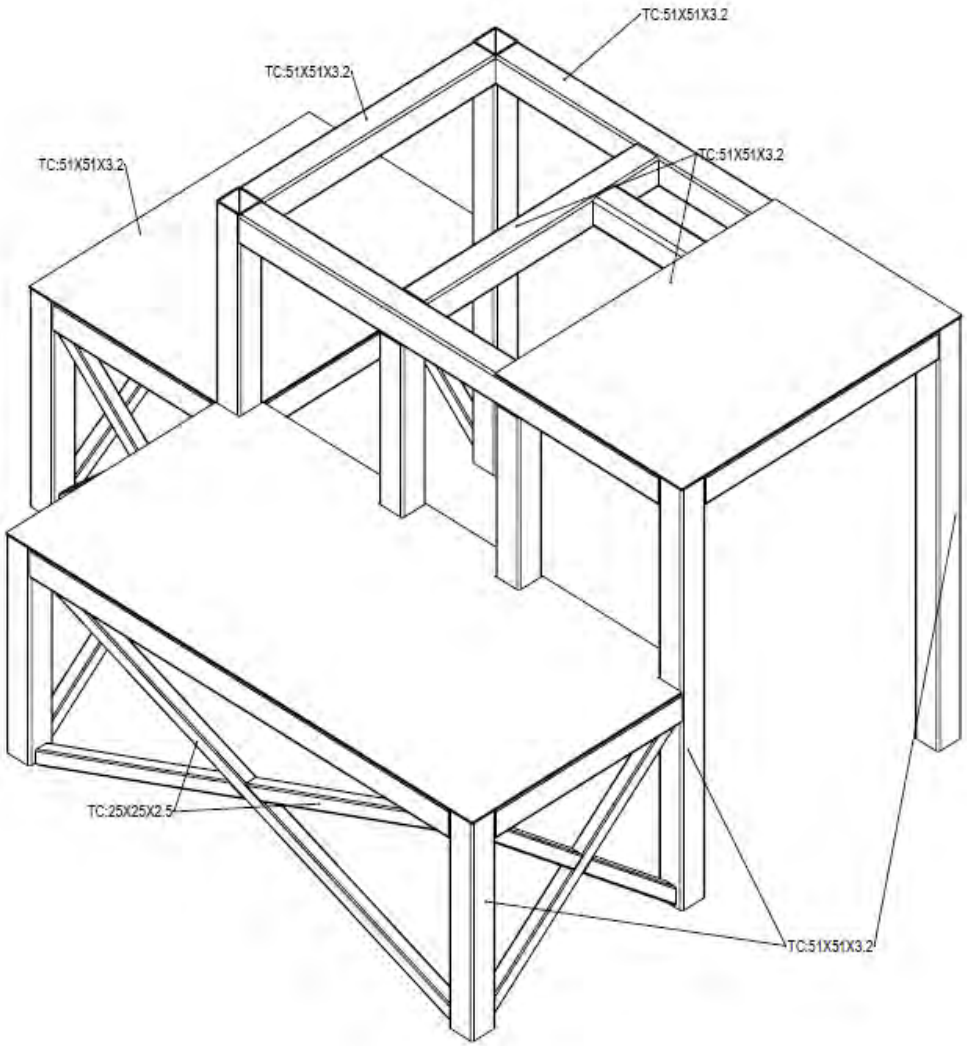
DETALLE C
ESCALA 2 : 15

ACABADO SUPERFICIAL	NORMATIVA DE TRABAJO	MATERIAL
ACABADO MEDIANTE PULIDO	SOLDADURA POR ARCO - AWS SOLDADURA: AWS D1.1/D1.1M – GMAW	ASTM -A36

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCIÓN		ESCALA
	PLANO DE PLATAFORMA PORTANTE ESTRUCTURA PARA REACTOR DE PIROLISIS	INDICADAS

DIBUJADO POR:	FECHA:	UNIDADES:	FORMATO:
Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair	25/09/25	mm	A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 05/06/26	LAMINA: LAMINA 3	



N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	LONGITUD	MATERIAL	CANTIDAD
	TS25x25x2.5	280.8127	ASTM A36 Acero	1
	TS25x25x2.5	594.8296	ASTM A36 Acero	1
	TS25x25x2.5	295.8533	ASTM A36 Acero	1
	TS51x51x3.2	349.2000	ASTM A36 Acero	2
	TS51x51x3.2	299.2000	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	512.1436	ASTM A36 Acero	2
	TS51x51x3.2	199.2000	ASTM A36 Acero	1
	TS25x25x2.5	218.7997	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	477.6985	ASTM A36 Acero	1
	TS25x25x2.5	232.0029	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	252.8556	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	239.5224	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	473.0276	ASTM A36 Acero	2
	TS25x25x2.5	460.5309	ASTM A36 Acero	1
	TS51x51x3.2	499.2000	ASTM A36 Acero	6
	TS51x51x3.2	399.2000	ASTM A36 Acero	4
	TS25x25x2.5	949.5874	ASTM A36 Acero	1
	TS51x51x3.2	899.2000	ASTM A36 Acero	4
	TS51x51x3.2	725.4000	ASTM A36 Acero	4
	TS51x51x3.2	425.4	ASTM A36 Acero	4

Nota:
Todos los perfiles estructurales serán de acero ASTM A36, soldados según AWS D1.1, con superficies limpias, libres de óxido y rebabas antes del pintado. Las uniones atornilladas se realizarán con pernos M10 grado 8.8, y las soldaduras deberán cumplir con los espesores especificados en el plano.

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

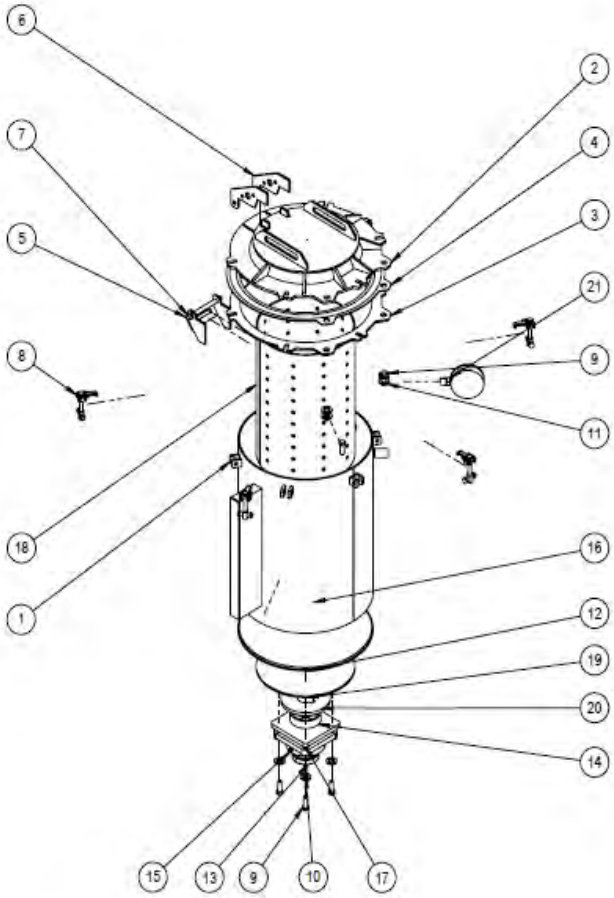
METODO DE PROYECCIÓN

PLANO DE VISTAS PRINCIPALES
Y DETALLES DE REACTOR DE PIROLISIS

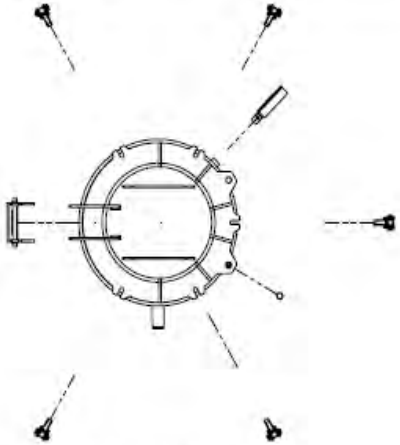
ESCALA: INDICADAS

DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Alcair
FECHA: 25/06/25
UNIDADES: mm
FORMATO: A2

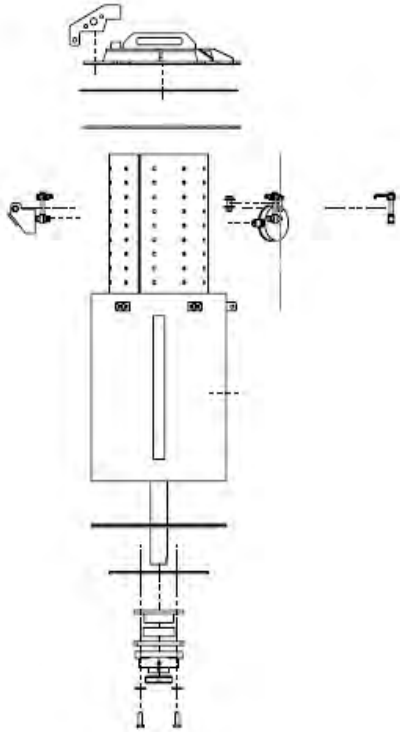
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATADORA ACEVEDO
FECHA DE REVISIÓN: 06/06/25
LÁMINA: LAMINA-4



VISTA DE EXPLOSION
ESCALA 1:10



VISTA DE EXPLOSION EN PLANTA
ESCALA 1:10



VISTA DE EXPLOSION ALZADA
ESCALA 1:10

N.º DE PIEZA	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	CANT.	UBICACIÓN
21	MANOMETRO	INSTRUMENTO DESTINADO A MEDIR Y CONTROLAR LA PRESION INTERNA DE LOS TANQUES DEL SISTEMA, RESISTENTE A ALTAS TEMPERATURAS MEDIANTE SELLO REMOTO.	1	B-8 / C-9
20	SOPORTE SUPERIOR DE EJE 2	RECEPTOR DE EJE DE 2PLG ESTE ELEMENTO CONECTA EL EJE CON EL CILINDRO ROTATORIO	1	F-6 / F-7
19	BASE DE CILINDRO GIRATORIO	PLANCHA DE ACERO INOX DE 1/4 DE ESPESOR	1	C-8
18	CILINDRO ROTATORIO	CILINDRO ROTATIVO FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE AISI 304, CON PERFORACIONES DISTRIBUIDAS UNIFORMEMENTE PARA PERMITIR EL PASO CONTROLADO DE GASES Y VAPORES DURANTE EL PROCESO DE PIROLISIS.	1	E-8 / F-8 / G-8
17	SOPORTE DE RODAJE INFERIOR	PLANCHA GUIA PARA EL RODAJE DE ESPESOR 1/4"	1	B-8
16	EJE DE 2PLG	EJE MACIZO Ø2", ACERO AISI 1045, ALTA RESISTENCIA MECANICA.	1	C-7
15	CHUMACERA TIPO BRIDA UCF 2"	SOPORTE CON RODAMIENTO AUTOALINEABLE Y BASE DE 4 PERNOS PARA EJE DE 2".	1	B-8
14	SOPORTE DE RODAJE	PLANCHA DE INOX ESPESOR 1/2"	1	B-8
13	CHUMACERA TIPO BRIDA UCF 2"	ASE CON BRIDA Y RODAMIENTO P/EJE 2", HIERRO FUNDIDO, SOPORTE DE RODAJE.	1	B-8
12	BASE INFERIOR DE REACTOR	PLACA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 DE 1/4" (6.35 mm) DE ESPESOR, CONFORMA LA PARTE INFERIOR DEL REACTOR Y SIRVE COMO SOPORTE ESTRUCTURAL DEL CUERPO CILINDRICO.	1	C-8 / C-9
11	TUERCA HEXAGONAL M16, ESTILO 1, ASME B18.2.4.1M	TUERCA DE SEIS CARAS (HEXAGONAL) CON ROSCA METRICA M16 × 2, CONFORME A ASME B18.2.4.1M	2	F-7
10	ARANDELA PLANA 16 mm TIPO ANGOSTO, ASME B18.22M	ARANDELA PLANA PARA PERNOS M16, TIPO ANGOSTO (NARROW) SEGUN ASME B18.22M	6	B-8
9	TORNILLO HEXAGONAL CONFORMADO, TIPO AM.	ELEMENTO DE FIJACION CON CABEZA HEXAGONAL, UTILIZADO PARA ENSAMBLES ESTRUCTURALES O DE TAPA.	6	F-7
8	CIERRE TIPO LEVA	MECANISMO DE SUJECIÓN FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE AISI 304, COMPUESTO POR LEVA, EJE Y PASADOR.	5	F-11
7	PASADOR	PASADOR EN INOX AISI 304, ALTA RESISTENCIA TERMICA Y MECÁNICA.	1	G-9 / G-10
6	REFUERZO DE TAPA	REFUERZO ESTRUCTURAL FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE AISI 304, DISEÑADO PARA AUMENTAR LA RIGIDEZ Y EVITAR DEFORMACIONES E	1	H-9
5	SOPORTE DE PASADOR	ELEMENTO FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE AISI 304, ENCARGADO DE SOSTENER Y GUIAR EL PASADOR DE CIERRE DE LA TAPA DEL REACTOR	1	F-9 / G-10
4	JUNTA DE BRIDA	ELEMENTO DE SELLADO FABRICADO EN GRAFITO REFORZADO CON ACERO INOXIDABLE.	1	G-8 / G-9
3	BRIDA INFERIOR ARMADA DE TAPA DE REACTOR	COMPONENTE FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE AISI 304, ESPESOR 1/4" (6.35 mm). FORMA PARTE DEL CONJUNTO DE CIERRE DEL REACTOR, UNIDA AL CUERPO PRINCIPAL MEDIANTE SOLDADURA PERIMETRAL.	1	G-8 / G-9
2	TAPA ARMADA	TAPA DE REACTOR-ACERO INOX 316 ESPESOR 1/4 "	1	G-8 / H-9
1	CILINDRO BASE	BASE CILINDRICA EN PLANCHA DE ACERO INOX 316 ESPESOR 1/4"	1	D-8 / E-9

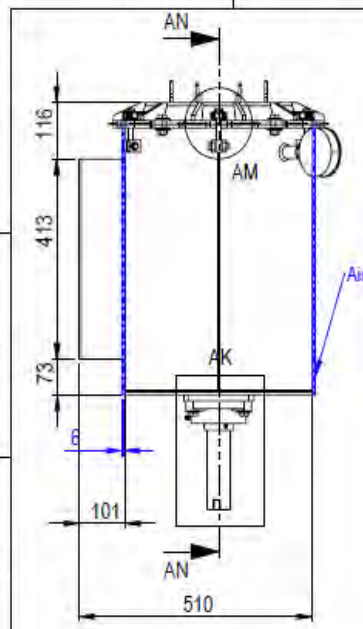
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION

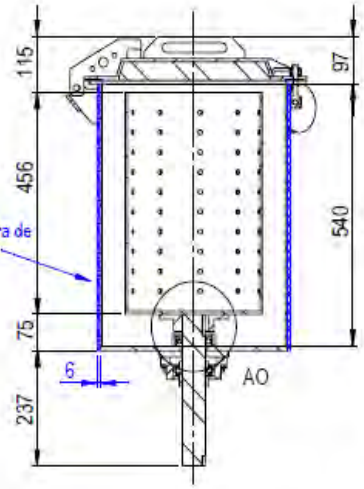
PLANO DE VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES DE REACTOR DE PIROLISIS

ESCALA: INDICADAS

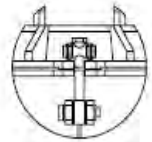
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair
FECHA: 25/08/25
UNIDADES: mm
FORMATO: A2
APROBADO POR: DOC. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO
FECHA DE REVISIÓN: 18/08/26
LÁMINA: LAMINA 5



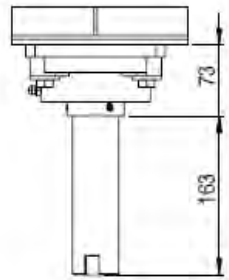
REACTOR ARMADO
VISTA ALZADA
ESCALA 1:10



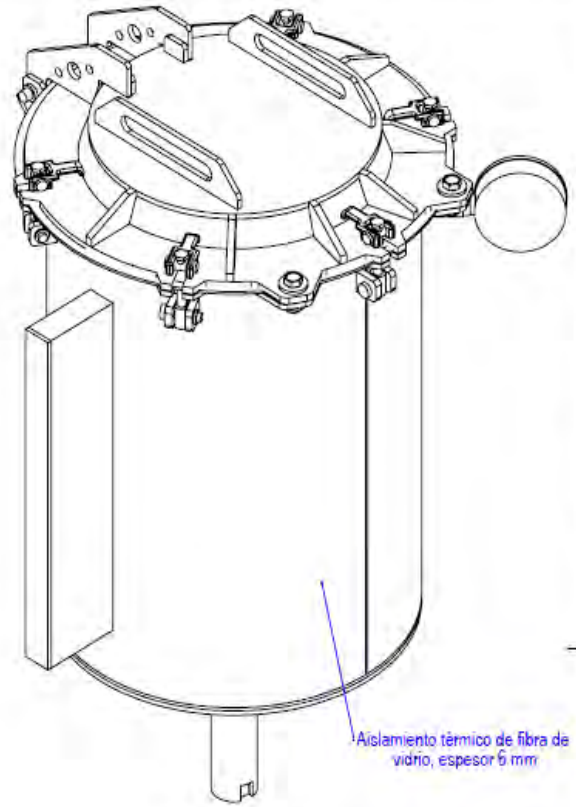
SECCIÓN AN-AN
ESCALA 1 : 10



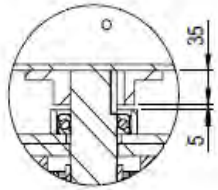
DETALLE AM
ESCALA 1 : 5



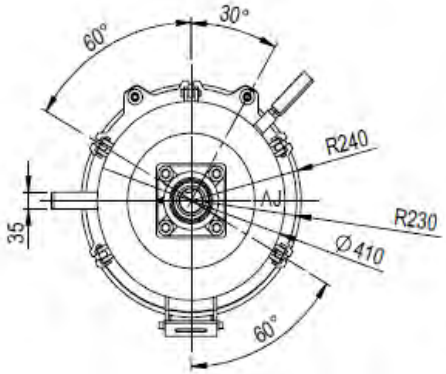
DETALLE AK
ESCALA 1 : 5



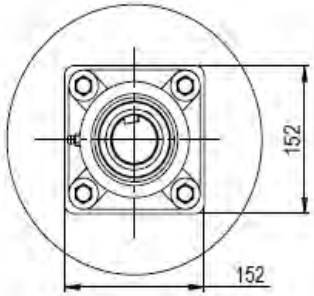
REACTOR ARMADO
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:10



DETALLE AO
ESCALA 1 : 5



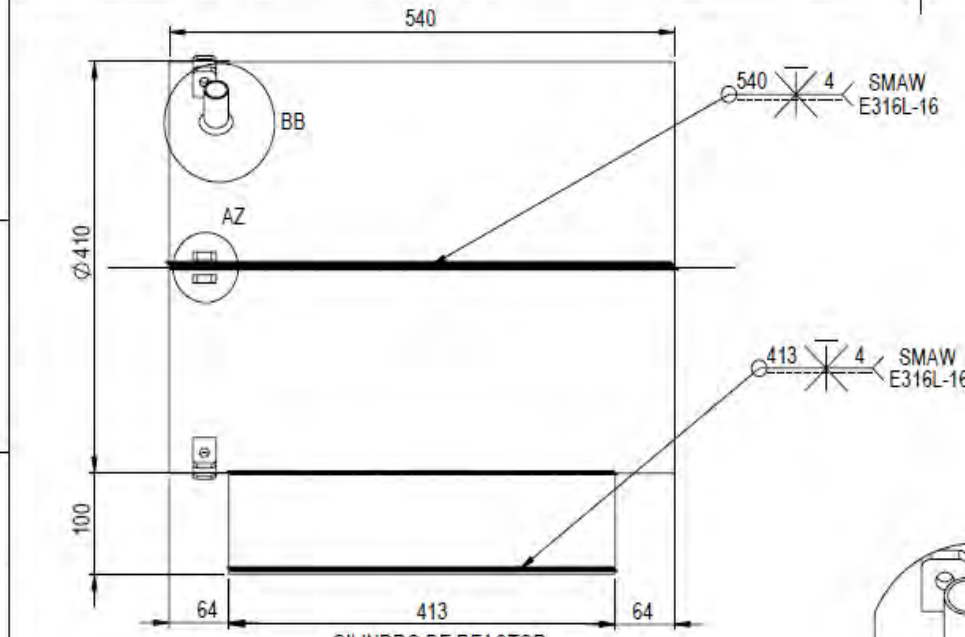
REACTOR ARMADO
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:10



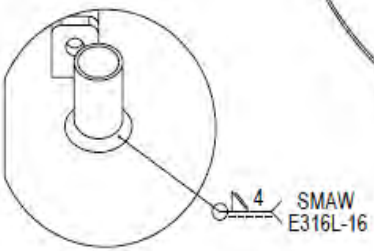
DETALLE AJ
ESCALA 1 : 5

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

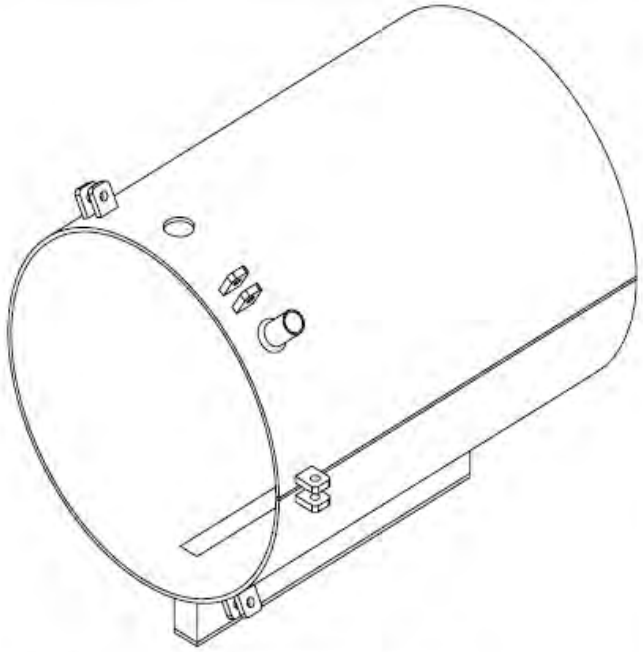
METODO DE PROYECCIÓN	PLANOS DE VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES DEL REACTOR ARMADOR	ESCALA: INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Titto, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm / FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/25	LAMINA: LAMINA 5



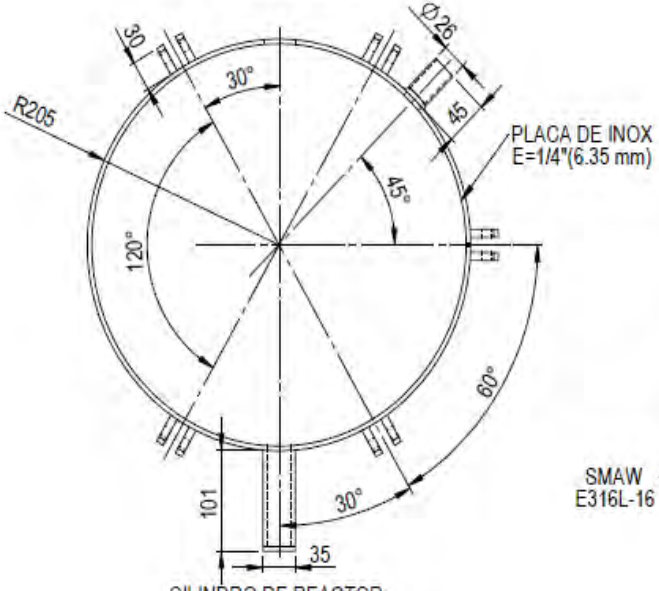
CILINDRO DE REACTOR
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



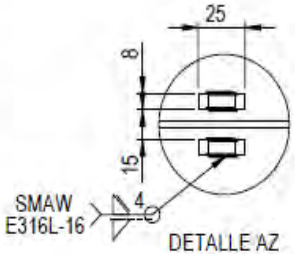
DETALLE BB
ESCALA 2 : 5



CILINDRO DE REACTOR
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:5



CILINDRO DE REACTOR
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:5



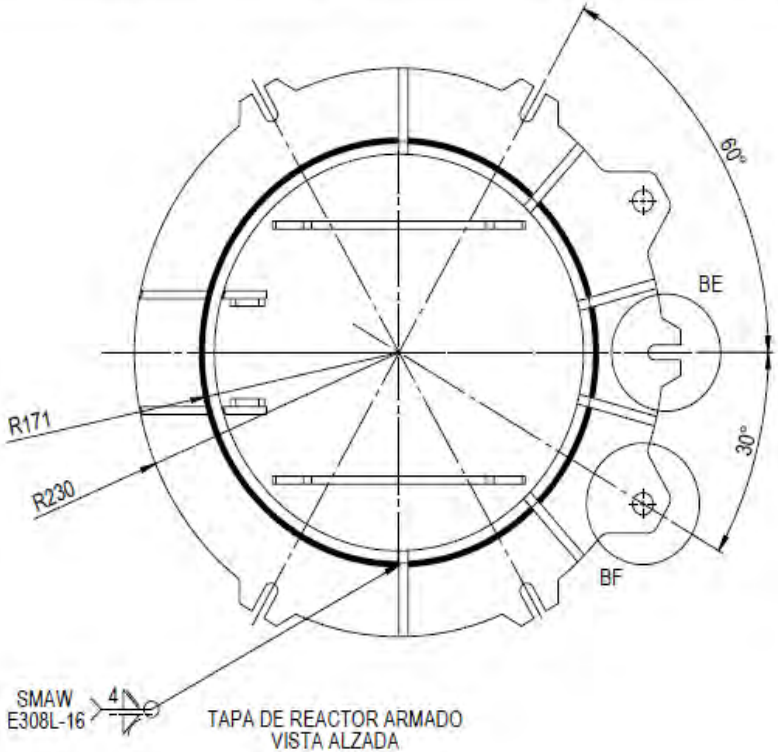
DETALLE AZ
ESCALA 2 : 5

ACABADO SUPERFICIAL	NORMATIVA DE TRABAJO	MATERIAL
ACABADO MEDIANTE PULIDO	SOLDADURA POR ARCO - AWS SOLDADURA: AWS D1.1/D1.1M – SMAW	AISI-316

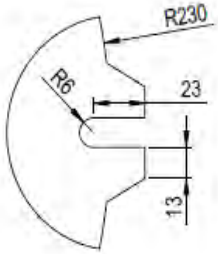
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION	PLANOS DEL CILINDRO DEL REACTOR DE PIROLISIS	ESCALA
		INDICADAS

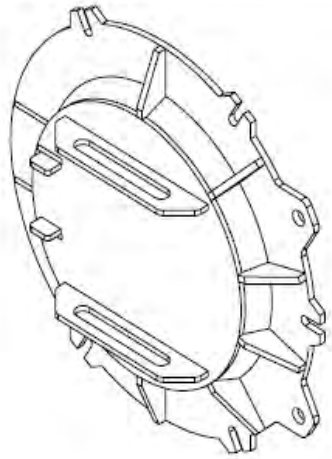
DIBUJADO POR:	FECHA:	FORMATO:
Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	25/09/25	A3
REVISADO POR:	FECHA DE REVISIÓN:	LAMINA:
Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	06/06/26	LAMINA 7



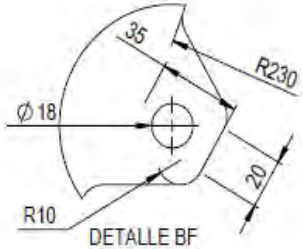
TAPA DE REACTOR ARMADO
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



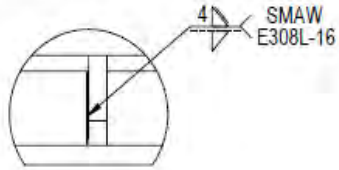
DETALLE BE
ESCALA 1 : 2



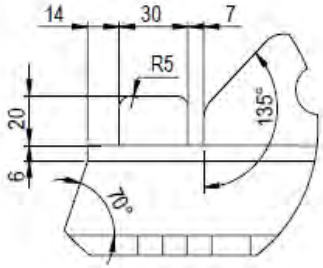
TAPA DE REACTOR ARMADO
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



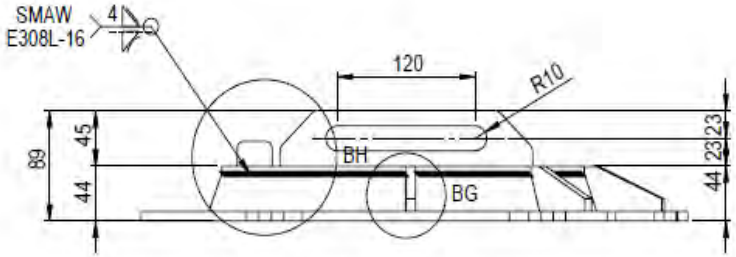
DETALLE BF
ESCALA 1 : 2



DETALLE BG
ESCALA 1 : 2



DETALLE BH
ESCALA 1 : 2



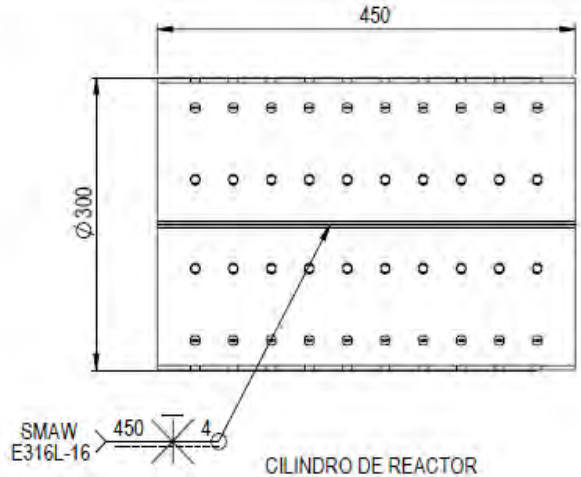
TAPA DE REACTOR ARMADO
VISTA DE PERFIL
ESCALA 1:5

ACABADO SUPERFICIAL	NORMATIVA DE TRABAJO	MATERIAL
ACABADO MEDIANTE PULIDO	SOLDADURA POR ARCO - AWS SOLDADURA: AWS D1.1/D1.1M – SMAW	AISI-316

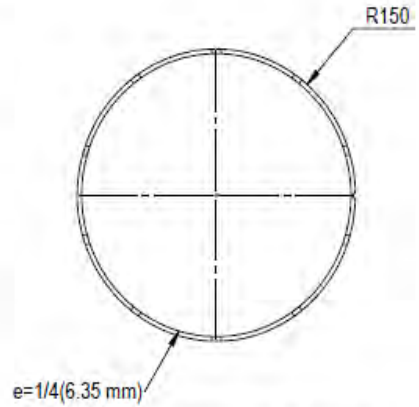
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION		ESCALA
	PLANOS DE LA TAPA DEL REACTOR DE PIROLISIS	INDICADAS

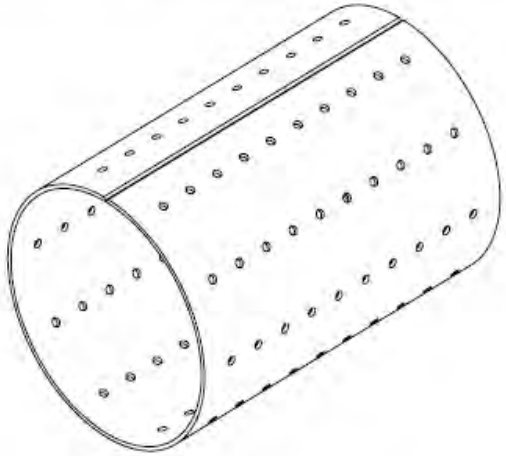
DIBUJADO POR:	FECHA:	UNIDADES:	FORMATO:
Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair	25/09/25	mm	A3
REVISADO POR:	FECHA DE REVISIÓN:	LAMINA:	
Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	06/06/25	LAMINA 8	



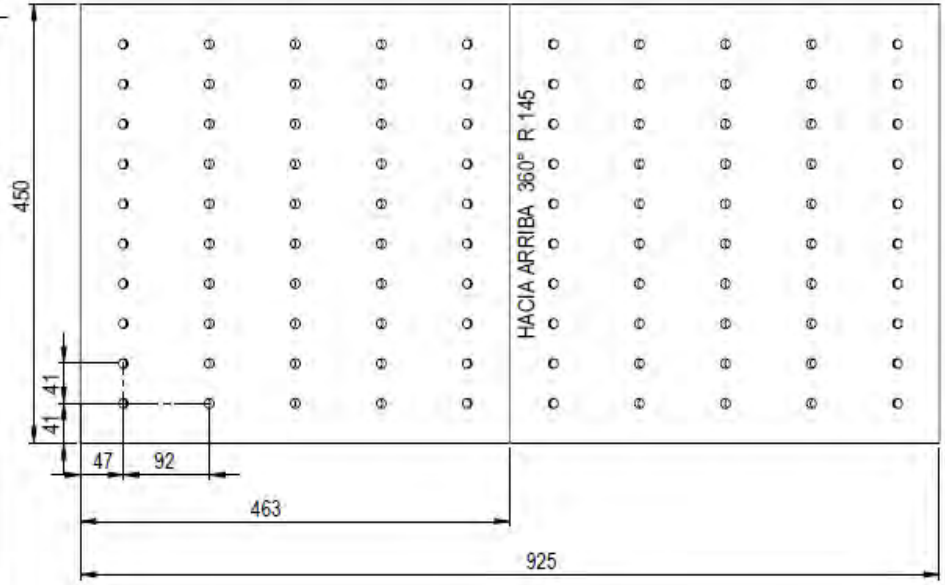
CILINDRO DE REACTOR
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



CILINDRO DE REACTOR
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:5



CILINDRO ROTATIVO
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:5



Nota:
Cilindro rotativo fabricado en acero inoxidable AISI 304, con 100 perforaciones uniformemente distribuidas. Las planchas se rolaron para alcanzar un diámetro final de 300 mm y se unieron mediante soldadura a tope con biselado, proceso SMAW utilizando electrodo E308L-16, con penetración completa.
Se requiere acabado superficial liso y tolerancias de fabricación según especificaciones de cilindro rotativo industrial.

ACABADO SUPERFICIAL	NORMATIVA DE TRABAJO	MATERIAL
ACABADO MEDIANTE PULIDO	SOLDADURA POR ARCO - AWS SOLDADURA: AWS D1.1/D1.1M – SMAW	AISI-316

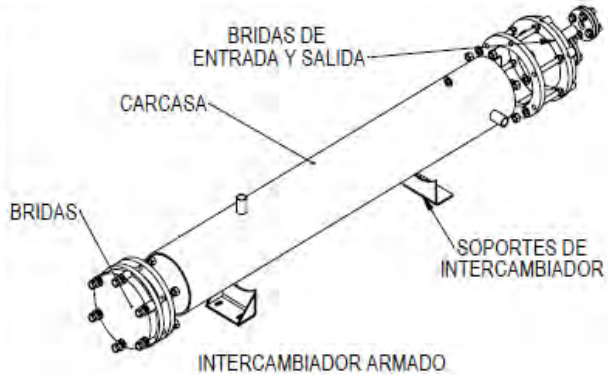
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCIÓN

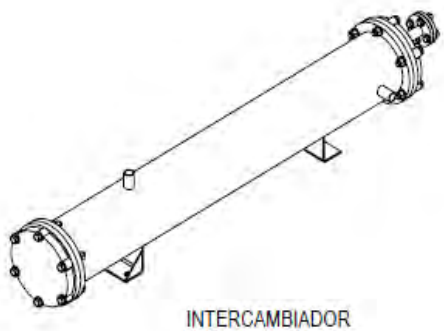
PLANO DE CILINDRO GIRATORIO
VISTAS PRINCIPALES Y DE DETALLES

ESCALA: INDICADAS

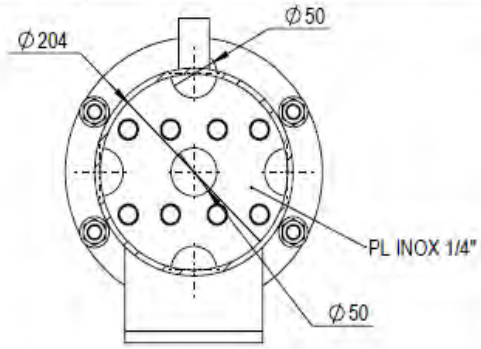
DIBUJADO POR:	FECHA	UNIDADES	FORMATO
Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	25/09/25	mm	A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/26	LAMINA: LAMINA 9	



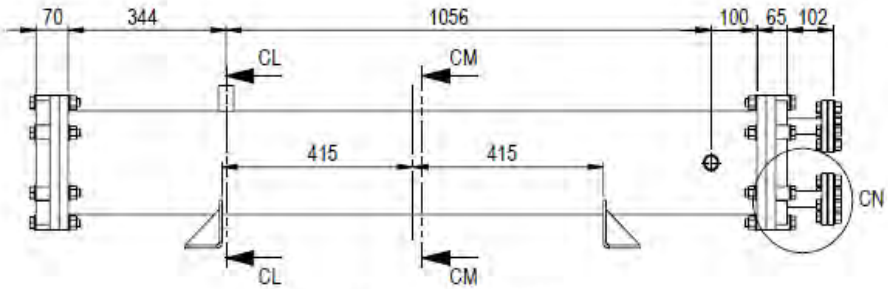
INTERCAMBIADOR ARMADO
VISTA EN EXPLOSION
ESCALA 1:10



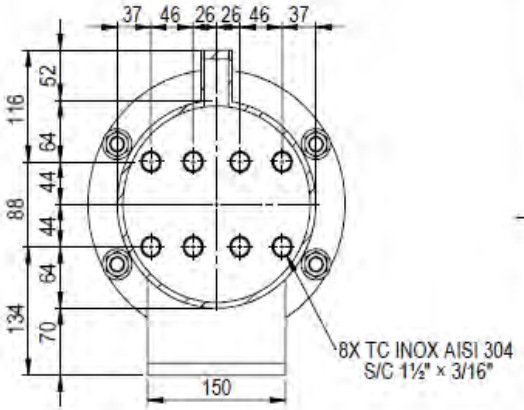
INTERCAMBIADOR
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:15



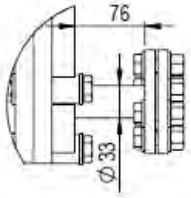
SECCIÓN CM-CM
ESCALA 1 : 5



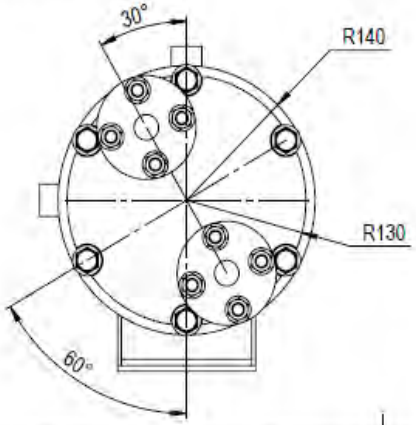
INTERCAMBIADOR ARMADO
VISTA ALZADA
ESCALA .10



SECCIÓN CL-CL
ESCALA 1 : 5

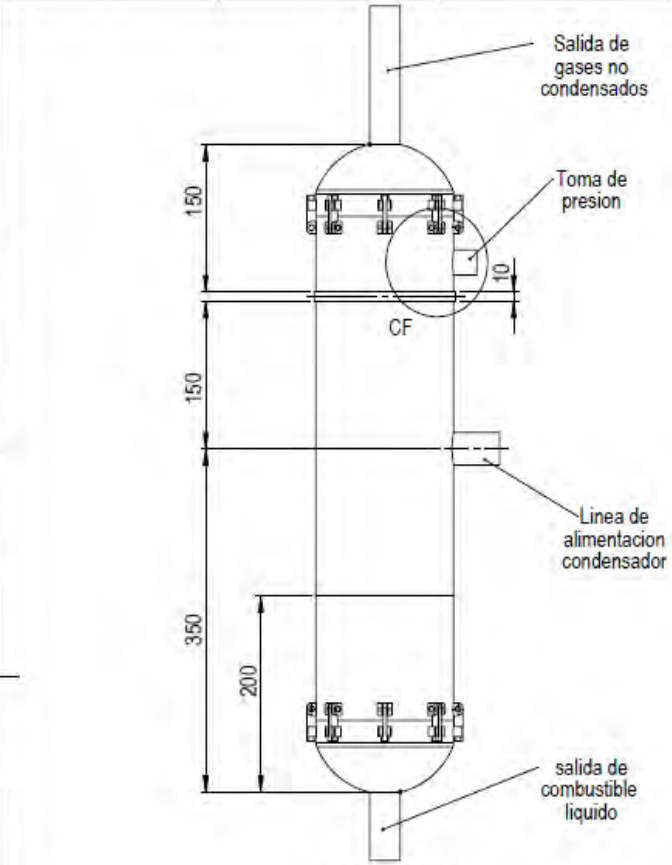


DETALLE CN
ESCALA 1 : 5

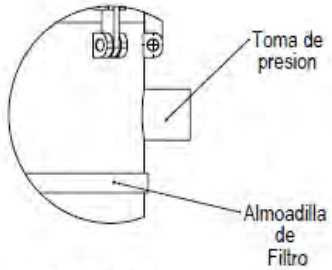


Nota:
Condensador fabricado en acero inoxidable AISI 304, con carcasa cilíndrica, tubos internos para flujo del fluido caliente y bridas de entrada y salida. Incluye tapas finales y soportes de fijación.
El diseño asegura transferencia térmica eficiente, facilidad de mantenimiento y resistencia a la corrosión.

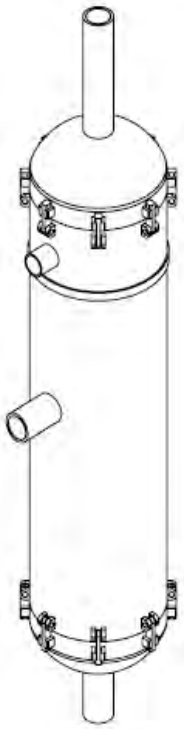
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANO DE INTERCAMBIADOR ARMADO VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES	ESCALA INDICADAS	
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/26	LAMINA: LAMINA 10	



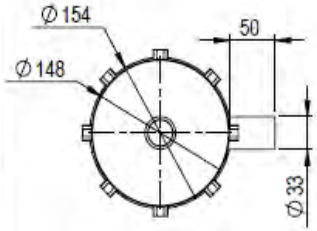
SEPARADOR
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



DETALLE CF
ESCALA 2 : 5



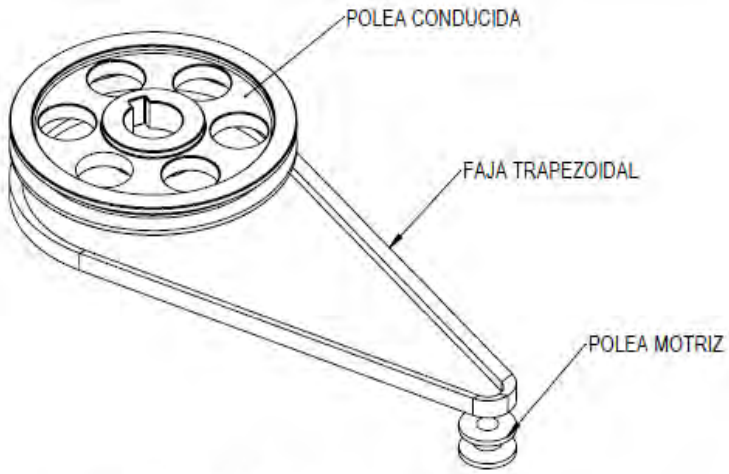
CONDENSADOR ARMADO
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:10



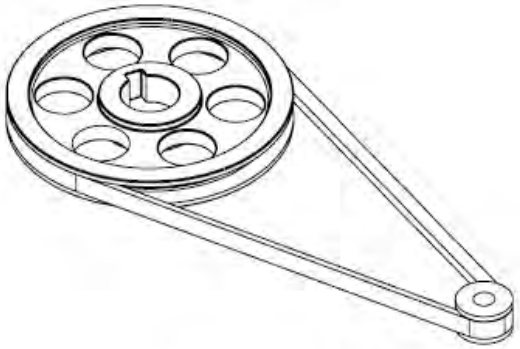
SEPARADOR
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:5

Nota:
Separador fabricado en acero inoxidable AISI 304, diseñado para la separación de fases liquido-gas provenientes del condesandor. Cuenta con entrada de flujo desde el reactor, salida de líquido condensado hacia almacenamiento o procesos posteriores y ventilación o salida de vapor no condensable según diseño. Incluye tapas desmontables para limpieza y mantenimiento bridas de conexión ANSI 150, soportes estructurales y acabado superficial resistente a la corrosión.
Todas las conexiones son de acero inoxidable con diámetro nominal de 1' y se garantiza operación segura bajo presión de trabajo del sistema.

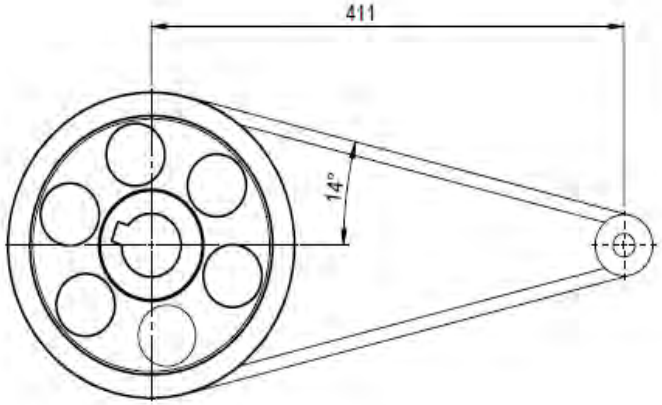
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANO DEL SEPARADOR ARMADO VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES		ESCALA INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 05/06/26	LÁMINA: LAMINA 11	



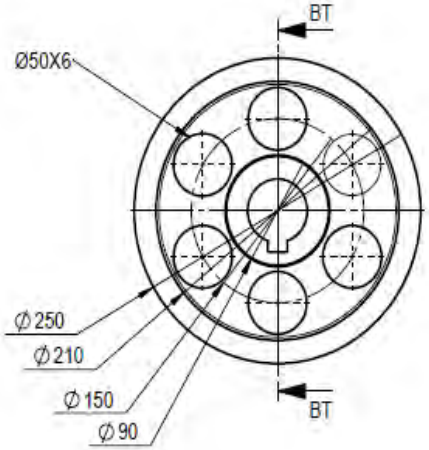
TRANSMISION ARMADA
VISTA SIOMETRICA EN EXPLOSION
ESCALA 1:5

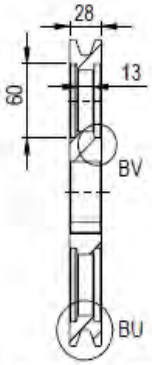


TRANSMISION ARMADA
VISTA SIOMETRICA
ESCALA 1:5

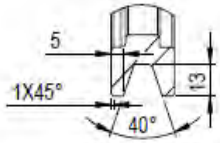


TRANSMISION ARMADA
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:5

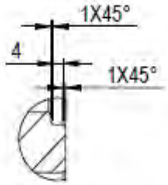




SECCIÓN BT-BT
ESCALA 1 : 4

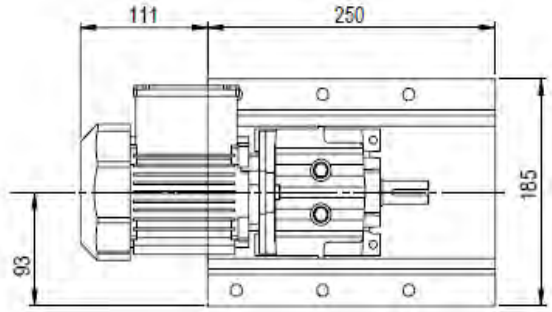


DETALLE BU
ESCALA 1 : 2

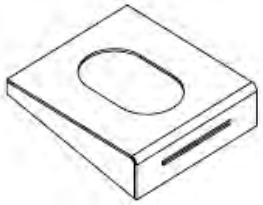


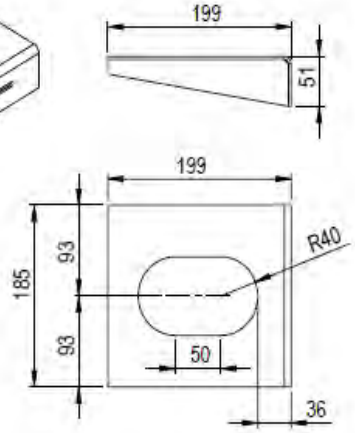
DETALLE BV
ESCALA 1 : 2

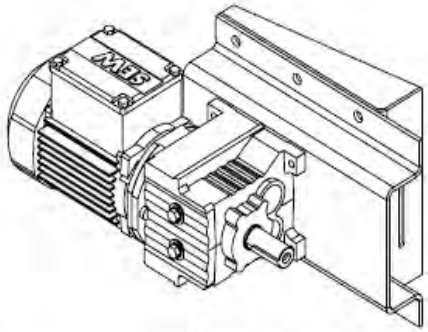
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANO DE LA TRANSMISION DE POLEAS Y COMPONENTES	ESCALA INDICADAS	
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 05/06/26	LAMINA: LAMINA 12	



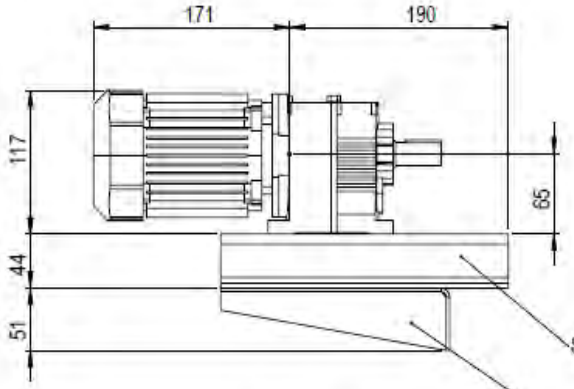
MOTOR ARMADO
VISTA ALZADA
ESCALA 1:4







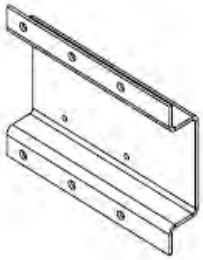
MOTOR ARMADO
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:4

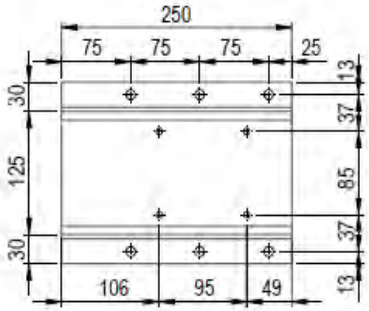


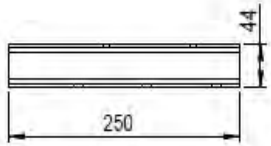
SOPORTE DE MOTOR 1

SOPORTE DE MOTOR 2

MOTOR ARMADO
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:4

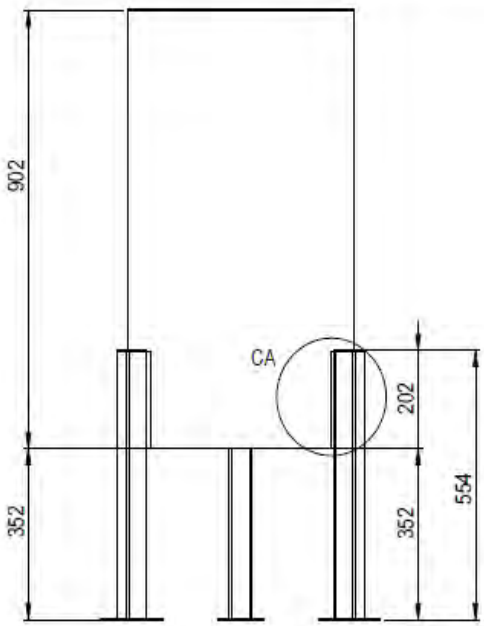




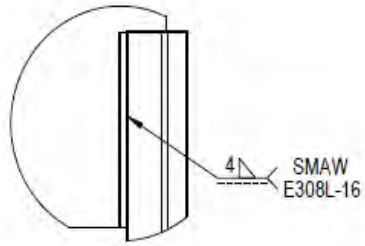


UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

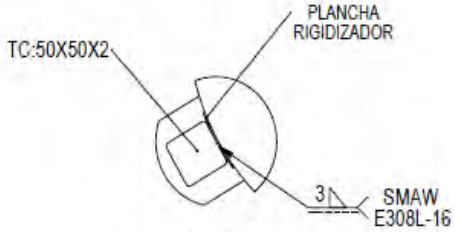
METODO DE PROYECCION	PLANO DE LA TRANSMISION DE POLEAS Y COMPONENTES	ESCALA: INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm / FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/26	LAMINA: LAMINA 13



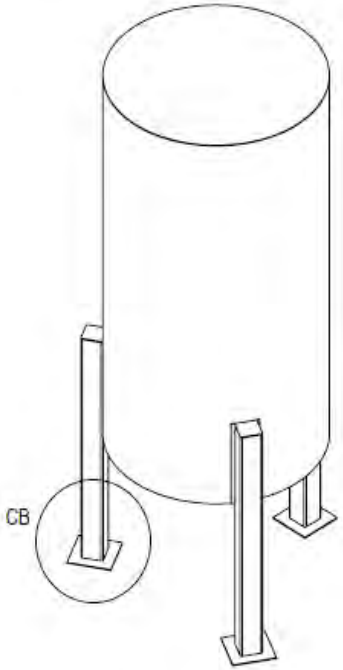
TANQUE DE AGUA
VISTA ALZADA
ESCALA 1:10



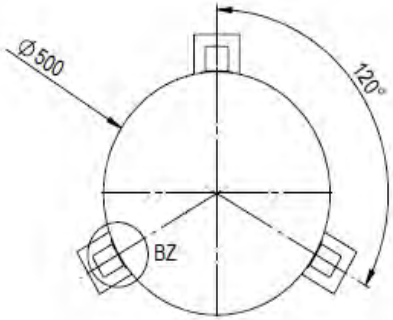
DETALLE CA
ESCALA 1 : 5



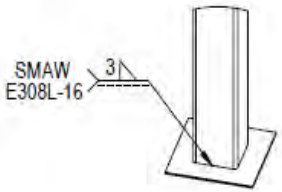
DETALLE BZ
ESCALA 1 : 5



TANQUE DE AGUA
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:10



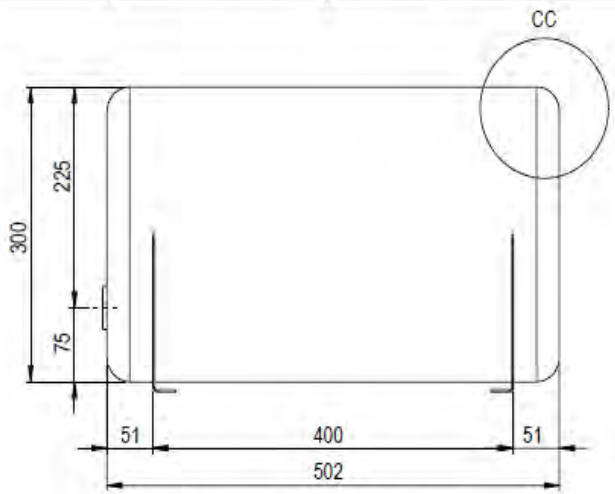
TANQUE DE AGUA
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:10



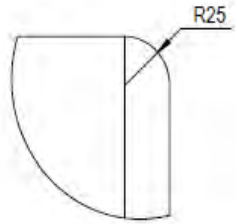
DETALLE CB
ESCALA 1 : 5

Nota:
Tanque de almacenamiento de agua fabricado en acero inoxidable AISI 304, de forma cilíndrica con tapa superior y fondo plano. Equipado con entrada y salida de agua mediante bridas ANSI 150, válvula de drenaje inferior y soporte estructural adecuado.
El diseño garantiza resistencia a la corrosión, estanqueidad total y facilidad de limpieza y mantenimiento, cumpliendo con las condiciones de presión y temperatura del sistema.

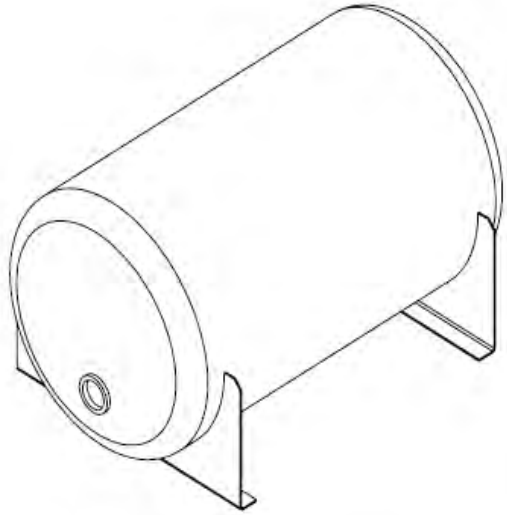
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA		ESCALA INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/26	LAMINA: LAMINA 14	



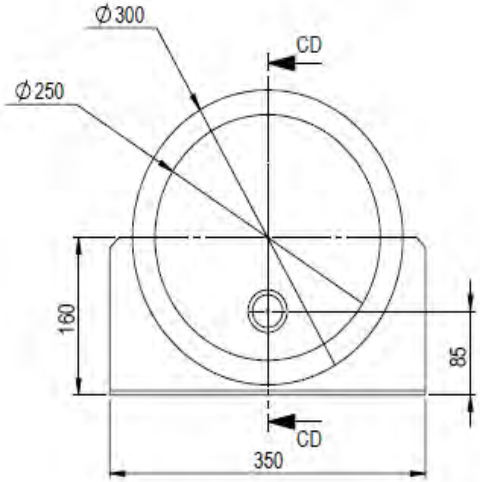
TANQUE DE ALMACENAMIENTO
VISTA ALZADA
ESCALA 1:5



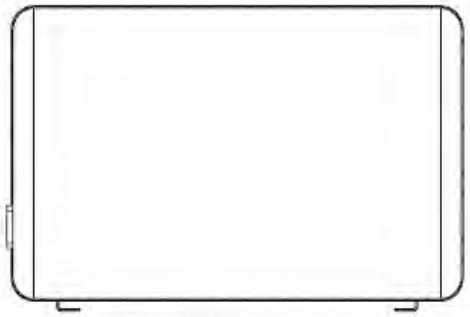
DETALLE CC
ESCALA 2 : 5



TANQUE DE ALMACENAMIENTO
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:5



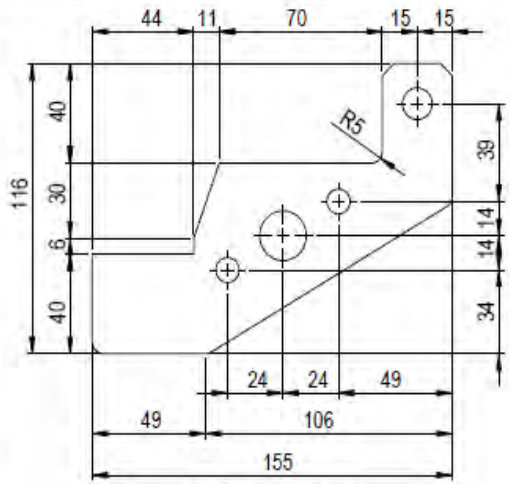
TANQUE DE ALMACENAMIENTO
VISTA FRONTAL
ESCALA 1:5



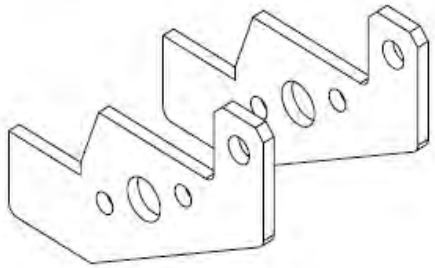
SECCIÓN CD-CD
ESCALA 1 : 5

NOTA:
Tanque de almacenamiento de aceite pirolítico, fabricado en acero al carbono ASTM A36 con espesor de 2 mm. Diseñado para la acumulación y decantación de los líquidos obtenidos del proceso de pirólisis de neumáticos.

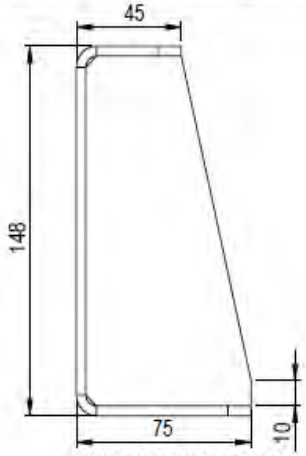
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANOS DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PETROLEO		ESCALA INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair	FECHA 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/26	LAMINA: LAMINA 15	



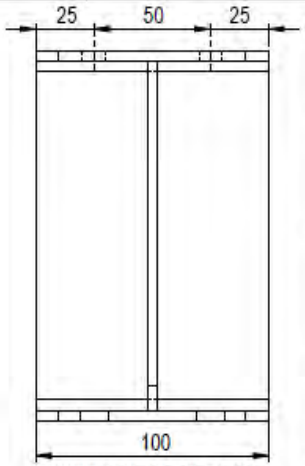
REFUERZO DE TAPA
VISTA ALZADA
ESCALA 1:2



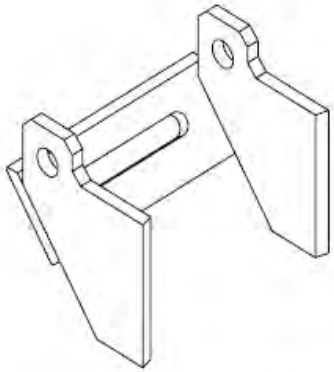
REFUERZO DE TAPA
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:2



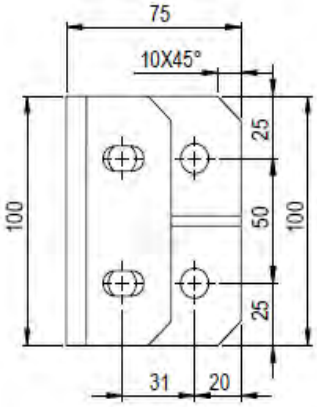
SOPORTE DE REACTOR
VISTA DE PERFIL
ESCALA 1:2



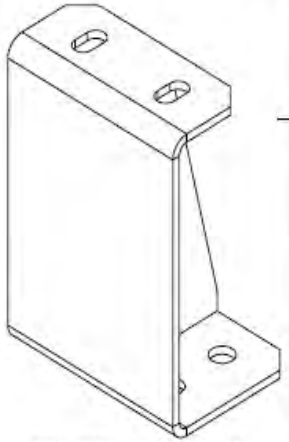
SOPORTE DE REACTOR
VISTA ALZADA
ESCALA 1:2



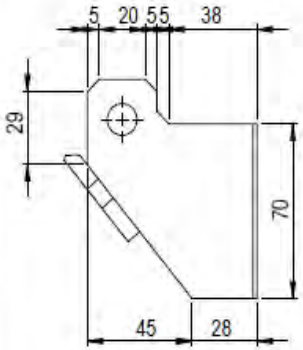
SOPORTE DE PASADOR
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:2



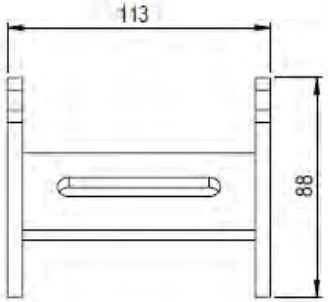
SOPORTE DE REACTOR
VISTA DE PLANTA
ESCALA 1:2



SOPORTE DE REACTOR
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:2

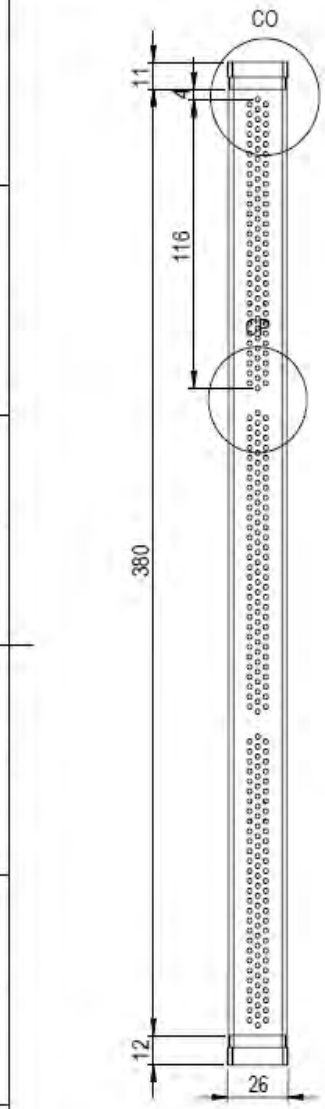


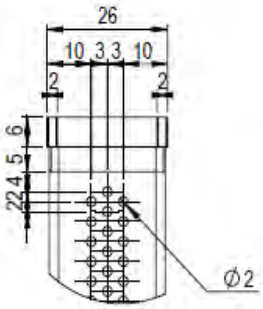
SOPORTE DE PASADOR
VISTA DE PERFIL
ESCALA 1:2



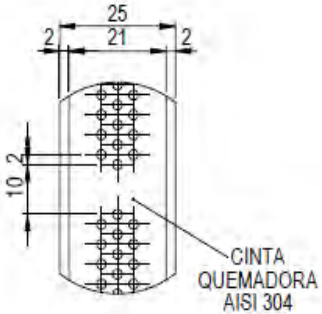
SOPORTE DE PASADOR
VISTA ALZADA
ESCALA 1:2

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCION	PLANO DE ACCESORIOS DE REACTOR DE PIROLISIS	ESCALA INDICADAS	
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Ttito, Luis Aldair	FECHA: 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN: 06/06/25	LAMINA: LAMINA 16	

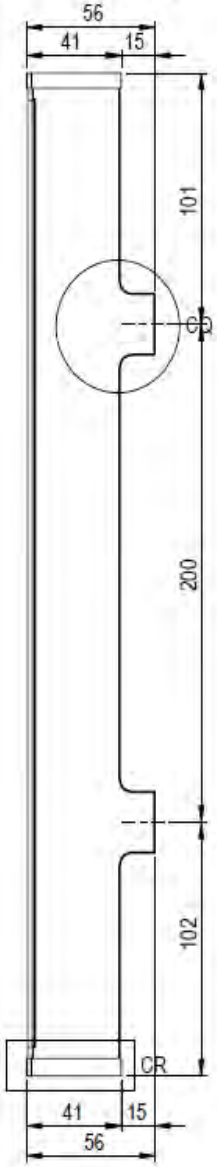


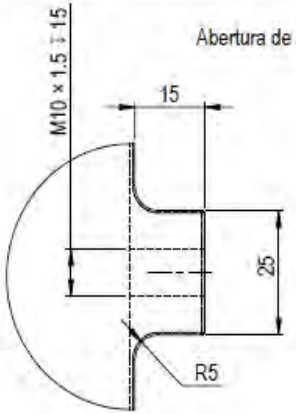


DETALLE CO
ESCALA 1 : 1

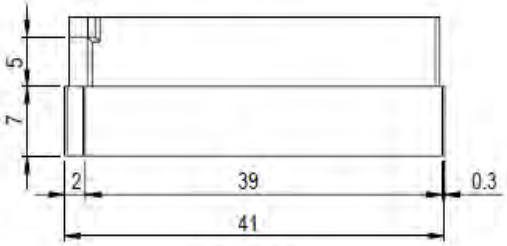


DETALLE CP
ESCALA 1 : 1

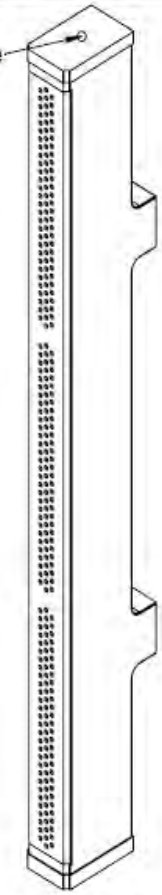




DETALLE CQ
ESCALA 1 : 1



DETALLE CR
ESCALA 2 : 1



QUEMADOR LINEAL
VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:2

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA			
METODO DE PROYECCIÓN	PLANO DEL QUEMADOR DEL REACTOR		ESCALA INDICADAS
DIBUJADO POR: Bach. Hinojosa Tito, Luis Aldair	FECHA 25/09/25	UNIDADES: mm	FORMATO A3
REVISADO POR: Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO	FECHA DE REVISIÓN 06/06/26	LAMINA: LAMINA 17	