



UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS
PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS
EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

JULIACA – PERÚ

2025



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS
PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS
EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA**

TESIS PRESENTADA POR:

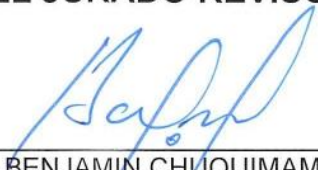
Bach. YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE

: 
DR. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO

PRIMER MIEMBRO

: 
ING. CARLOS ALEJANDRO CÁCERES VARGAS

SEGUNDO MIEMBRO

: 
ING. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN

ASESOR DE TESIS

: 
MGTR. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

: TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18



"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1445-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 04 de noviembre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025 - CU - 8575 presentado por el (la) Bachiller: **YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES** estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN.**

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA**, la misma que pertenece a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
- * **1er Miembro** : Ing. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS
- * **2do Miembro** : Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN

ARTÍCULO SEGUNDO. - RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS.**

ARTÍCULO TERCERO . - APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista.** de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : jueves 13 de noviembre del 2025
- * **HORA** : 08:00 horas
- * **LUGAR** : Aula 204 - EPIME

ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y C. PURAS

Dr. OSCAR V. VIANONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y C. PURAS

Dr. P. de W. Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo



UNIVERSIDAD ANDINA
"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 588-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 02 de julio del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU - 4257 por el señor (a): YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES quien solicita REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis), el PROVEIDO - N° 356- 2025-UI-FICP-UANCV/J, y la FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS) formato N° 008 - 2025 del integrante del comité de investigación EPIME de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 008 - 2025 aprobando el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA, Correspondiente a la línea de investigación TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS), para la REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN, presentado por el señor (a): YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulado: DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA correspondiente a la línea de investigación TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como ASESOR DE INVESTIGACIÓN al (a) la), Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. OSCAR M. VILAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP 32730



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. Priz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
interesado (a)



UNIVERSIDAD ANDINA
"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1905-2024-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 27 de diciembre del 2024

VISTO: El expediente N° 2024-CU- 15011, presentado el señor (a) **YEFERSON MIGUEL CEAMBI PAREDES** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el **PROVEIDO - N° 1207-2024-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 039-2024 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **YEFERSON MIGUEL CEAMBI PAREDES** ha presentado su propuesta de investigación Titulado: **DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Dr. Benjamín Chuquimamani Quinto** de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 039-2024- aprobando la propuesta de investigación titulado: **DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **YEFERSON MIGUEL CEAMBI PAREDES**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**, con el Tema Titulado: **DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



Dr. MILTON QUISPE HUANCA
DECANO
CIP. 47790



Dr. Eirain Parillo Sosa
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



25% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12% Fuentes de Internet
- 3% Publicaciones
- 21% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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.



Metadatos complementarios - UANCV

Título de la Tesis	
DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74461975
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-2506-9934
Datos del asesor	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02383061
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-8660-8733
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02406088
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	29591476
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SÁNCHEZ CARREÓN
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02064066

Datos de investigación	
Línea de investigación	TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Departamento: PUNO Provincia: SAN ROMAN Distrito: JULIACA Longitud oeste: -15.483488880851368 Latitud sur: , -70.12817121230837
	URL: https://maps.app.goo.gl/wt5QfSoanbeS2z357
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Setiembre 2024 – Febrero 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.00 Mecánica aplicada https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.02
- Librería	https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS EXACTAS Y AGRARIAS
D. César G. Camargo Najar
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES, identificado con DNI Nro. 74461975, en mi condición de egresado de:

- Escuela Profesional
- Programa de Segunda Especialidad,
- Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación, Trabajo Académico denominada:

DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA

Asesorado por: MGTR. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 10 de diciembre del 2025


FIRMA ASESOR


FIRMA TESISISTA


Huella



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi amada madre, quien ya no se encuentra en este mundo, pero cuyo más grande anhelo en vida fue verme convertido en un profesional. Su recuerdo y su amor siguen siendo mi mayor inspiración. A mi padre, por su cariño, amor asimismo comprensión, y porque, gracias a la vida, aún tengo la dicha de tenerlo a mi lado acompañándome en este camino. A mis hermanos, por su constante ayuda, palabras de aliento y sus consejos, que han sido fundamentales para mi formación como persona y profesional. Quiero resaltar de manera especial a mi hermano Jaime, quien desde el inicio de mi carrera me brindó un apoyo incondicional, demostrando con hechos su compromiso con mi crecimiento y mi éxito. En memoria de mi amada madre, cuyo espíritu me acompaña en cada logro y cuyo amor perdura más allá del tiempo.



AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y salud para concluir esa fase de mi vida. Sin su guía, este logro no habría sido posible. A la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez (UANCV), especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por brindarme la formación académica que hoy me permite alcanzar el título profesional. A mi asesor de tesis, Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cárdenas, por su acompañamiento, dedicación y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. A mis amigos, compañeros y todos los que, de una u otra forma, contribuyeron en ese proceso, gracias por su ayuda y motivación constante. Este logro no es el final del camino, sino el inicio de nuevos desafíos. Que cada meta alcanzada sea siempre un impulso para seguir creciendo.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....iii

AGRADECIMIENTOiv

ÍNDICE DE CONTENIDO v

ÍNDICE DE TABLASix

ÍNDICE DE FIGURAS..... x

RESUMEN.....xi

ABSTRACTxiii

INTRODUCCIÓNxv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de situación problemática 1

1.2. Planteamiento del problema 3

 1.2.1. General 3

 1.2.2. Específicos..... 3

1.3. Objetivos de estudio 3

 1.3.1. General 3

 1.3.2. Específicos..... 3

1.4. Justificación de la investigación 4

1.5. Hipótesis de estudio 6

 1.5.1. Hipótesis general 6



1.5.2. Hipótesis específica.....6

1.6. Variables7

1.6.1. Variable independiente.....7

1.6.2. Variable dependiente7

1.7. Operacionalización de variables7

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la estudio9

2.1.1. Antecedentes Internacionales9

2.1.2. Antecedentes nacionales12

2.1.3. Antecedentes locales15

2.2. Marco teórico18

2.2.1. Plásticos.....18

2.2.2. Pirólisis.....22

2.2.3. Parámetros que influyen en proceso de pirólisis38

2.2.4. Variables del proceso de pirolisis39

2.2.5. Combustibles40

2.3. Marco normativo.....42

2.4. Marco conceptual43

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION



3.1. Diseño de estudio	46
3.2. Tipo de la estudio	46
3.3. Nivel de estudio	46
3.4. Enfoque de estudio	46
3.5. Población y muestra	47
3.5.1. Población	47
3.5.2. Muestra	47
3.6. Técnicas e instrumentos de recogida de información	47
3.6.1. Técnicas.....	47
3.6.2. Instrumentos	48
3.7. Materiales y equipos	48
3.8. Localización de zona en análisis	48
3.9. Procedimiento metodológico	48
3.9.1. Determinar las particularidades de desechos plásticos originados en la ciudad de Juliaca.....	48
3.9.2. Diseñar el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina.....	49
3.9.3. Determinar factibilidad económica de prototipo de pirolisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en gasolina.	52

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Resultados	53
------------------------------	----



4.1.1. Determinar las características de residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca.	53
4.1.2. Dimensionar prototipo de reactor de pirolisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en combustible líquido.	61
4.1.3. Determinar factibilidad económica de prototipo de pirolisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en gasolina.	95
4.2. DISCUSIÓN	102
CONCLUSIONES	106
RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	118



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	7
Tabla 2 <i>Categorización de plásticos</i>	18
Tabla 3 <i>Clasificación de los plásticos</i>	19
Tabla 4 <i>Comparación de 3 principales procesos de transformación química</i> ..	21
Tabla 5 <i>Tipos proceso de pirólisis</i>	29
Tabla 6 <i>Dimensiones de reactores de lecho fijo en experimentales pruebas de pirólisis</i>	32
Tabla 7 <i>Tecnologías de valorización de pirólisis</i>	33
Tabla 8 <i>Generación per cápita de desechos sólidos de Juliaca</i>	53
Tabla 9 <i>Composición de desechos sólidos de la ciudad de Juliaca</i>	57
Tabla 10 <i>Características de desechos plásticos originados en Juliaca</i>	59
Tabla 11 <i>Costo neto de recipiente a presión</i>	96
Tabla 12 <i>Costos del sistema mecánico</i>	96
Tabla 13 <i>Costos del sistema eléctrico</i>	97
Tabla 14 <i>Estimación de materia prima indirecta</i>	98
Tabla 15 <i>Costo total</i>	98



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Unidad pirólisis de lecho fijo</i>	24
Figura 2 <i>Unidad de pirólisis</i>	33
Figura 3 <i>Productos obtenidos del proceso de pirólisis</i>	37
Figura 4 <i>Modelo del reactor de pirolisis a diseñar</i>	63
Figura 5 <i>Modelado tornillo sin fin propuesto</i>	65
Figura 6 <i>Modelado tornillo sin fin propuesto</i>	67
Figura 7 <i>Diseño de tapa toriesférica</i>	70
Figura 8 <i>Modelo de una tapa plana para el reactor</i>	72
Figura 9	76
Figura 10 <i>Modelado del sistema térmico</i>	86
Figura 11 <i>Geometría 3D del reactor de pirolisis</i>	87
Figura 12 <i>Conjunto de brida y pernos</i>	89
Figura 13 <i>Conjunto de brida y pernos</i>	89
Figura 14 <i>Mallado de los pernos y sección de interés</i>	90
Figura 15 <i>Resultados de esfuerzos en los pernos "Sizing 2 mm"</i>	91
Figura 16 <i>Conjunto abastecimiento plástico</i>	91
Figura 17 <i>Resultados de esfuerzos en alimentación "Sizing 1,5 mm"</i>	92
Figura 18 <i>Modelado de Reactor en SolidWorks</i>	95
Figura 19 <i>Comparación de precios de venta del combustible líquido obtenido por pirolisis vs. el combustible tradicional (diésel)</i>	101



RESUMEN

La presente investigación desarrolla el diseño de una miniplanta prototipo de pirólisis orientada a la transformación de residuos plásticos en combustibles líquidos, con el objetivo de ofrecer una alternativa tecnológica viable para mitigar la creciente contaminación ambiental originada por plásticos en la ciudad de Juliaca. Este estudio parte de la actual problemática del manejo ineficiente de desechos sólidos, donde los plásticos —principalmente polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS)— representan uno de los desechos más persistentes, dado a su resistencia a degradación y a provisión en botaderos informales, ríos, zonas urbanas y áreas periurbanas. El diseño del prototipo se fundamentó en un análisis técnico, termodinámico y ambiental, considerando las propiedades físico-químicas de los plásticos y los requerimientos energéticos necesarios para su descomposición térmica. El reactor propuesto es de tipo cilíndrico vertical, fabricado en acero inoxidable AISI 304, con un volumen útil de **0.33 m³** y capacidad para procesar **300 kg de plástico triturado por lote**, operando a una **temperatura óptima de 550 °C**, donde se obtiene el mayor rendimiento de combustible líquido según literatura especializada. El sistema incluye un condensador para recuperar vapores hidrocarbonados y transformarlos en una fracción líquida equivalente a gasolina, además de gas no condensable y char (residuo carbonoso) con potencial uso industrial, desde un enfoque ambiental, la pirólisis representa una alternativa de reciclaje avanzado con importantes beneficios frente a los métodos convencionales. A diferencia de incineración, pirólisis se efectúa en **ausencia de oxígeno**, lo que reduce significativamente la formación de dioxinas, furanos y otros contaminantes



peligrosos. Asimismo, contribuye a disminuir el volumen de residuos plásticos hasta en un **70–80 %**, reduciendo la presión sobre los botaderos y el impacto visual, sanitario y ecológico en la ciudad. Si bien el proceso requiere energía térmica, este consumo puede ser compensado mediante el aprovechamiento del gas pirolítico generado, el cual puede emplearse como combustible secundario para sostener la temperatura del reactor, mejorando eficiencia energética global del sistema. Se destaca también el potencial económico y energético del combustible obtenido, que posee características similares a una gasolina ligera, con alto contenido energético y aplicaciones potenciales en procesos industriales. Esto permite plantear un modelo de economía circular, en donde los desechos plásticos dejan de ser un problema ambiental para convertirse en un recurso energético aprovechable. La investigación concluye que el diseño propuesto es **técnica, económica y ambientalmente viable**, demostrando coherencia con estudios previos y evidenciando que la implementación de una planta de pirólisis a escala prototipo puede constituir una solución sostenible al problema de residuos plásticos en Juliaca. Además, el proceso contribuye a mermer la contaminación del ambiente, mejorar las prácticas de gestión de residuos asimismo promover alternativas innovadoras basadas en principios de sostenibilidad y eficiencia energética.

Este trabajo sienta las bases para futuros proyectos de ampliación, optimización de rendimiento, implementación piloto e integración con políticas municipales de gestión ambiental, posicionándose como una herramienta tecnológica relevante para enfrentar problemática creciente de desechos plásticos en la región.

Palabras clave: Prototipo de pirólisis, residuos plásticos, gasolina, factibilidad.



ABSTRACT

This research presents the design of a prototype pyrolysis miniplant aimed at transforming plastic waste into liquid fuels, with the objective of offering a viable technological alternative to mitigate the increasing environmental pollution caused by plastics in the city of Juliaca. The study is based on current issue inefficient solid waste management, in which plastics—mainly polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS)—constitute one of most persistent waste streams due to their resistance to degradation and their accumulation in informal dumps, rivers, urban areas, and peri-urban zones. The prototype design was grounded in technical, thermodynamic, and environmental analyses, considering the physicochemical properties of plastics and the energy requirements necessary for their thermal decomposition. The proposed reactor is a vertical cylindrical unit made AISI 304 stainless steel, with useful volume of 0.33 m³ and the capacity to process 300 kg of shredded plastic per batch, operating at an optimal temperature of 550 °C, at which the highest yield of liquid fuel is obtained according to specialized literature. The system includes a condenser to recover hydrocarbon vapors and convert them into a liquid fraction equivalent to gasoline, in addition to non-condensable gas and char (carbonaceous residue) with potential industrial applications. From an environmental perspective, pyrolysis represents an advanced recycling alternative with significant advantages over conventional methods. Unlike incineration, pyrolysis is carried out in absence oxygen, which significantly reduces formation dioxins, furans, and other harmful pollutants. Likewise, it reduces the volume of plastic waste by 70–80%, alleviating the pressure on



landfills and minimizing the visual, sanitary, and ecological impacts in the city. Although the process requires thermal energy, this demand can be partially offset by utilizing the pyrolytic gas produced, which can serve as a secondary fuel to maintain the reactor temperature, thereby improving the system's overall energy efficiency. The study also highlights the economic and energetic potential of the liquid fuel obtained, which exhibits characteristics similar to light gasoline, with high energy content and potential industrial applications. This enables the development of a circular economy model, in which plastic waste ceases to be an environmental problem and becomes a valuable energy resource. The research concludes that the proposed design is technically, economically, and environmentally viable, demonstrating consistency with previous studies and showing that the implementation of a prototype-scale pyrolysis plant can serve as a sustainable solution to plastic waste problem in Juliaca. Furthermore, process contributes to reducing environmental pollution, improving waste management practices, and promoting innovative alternatives based on sustainability and energy efficiency principles.

This work lays the foundation for future expansion projects, performance optimization, pilot implementation, and integration with municipal environmental management policies, establishing itself as a relevant technological tool to address growing issue of plastic waste in the region.

Keywords: Pyrolysis prototype, plastic waste, gasoline, feasibility.



INTRODUCCIÓN

El modelo energético actual no es sostenible a razón del empleo descuidado de los combustibles fósiles, que, junto con el acrecentamiento de producción de desechos sólidos en las ciudades, ha causado el calentamiento global y acrecentamiento de gases de efecto invernadero (Balseca et al., 2021). Como consecuencia, las alteraciones han impactado a todos los organismos vivos del planeta incluyendo al ser humano (Carmona & Espinoza, 2024). Para mitigar o reducir la contaminación ambiental, convención de las Naciones Unidas sobre cambio climático, promueve disminución progresiva de fuentes de energía originadas de desechos fósiles y la desestimación de combustibles fósiles como el carbón (Ocampo, 2019). Además, promueve la exploración de fuentes de energía no tradicionales.

Según Spencer (2017), Perú ha dependido históricamente de la energía hidroeléctrica para el 85% de su energía eléctrica. Sin embargo, en 2008, el país promovió la creación de nuevas fuentes energéticas no tradicionales, que constituyeron menos del 0,02% de la totalidad de energía generada en el país. No obstante, en 2020, gracias a adjudicarse nuevos proyectos, este porcentaje se incrementó hasta el 5,9% de toda la energía generada en el país mediante energía hidroeléctrica. En su programa ambiental, la ONU sostiene que la producción de desechos sólidos de las ciudades en las naciones de América Latina y el Caribe llegó a un nivel de casi 550.000 ton. diarias y expectativa es que, para 2050, la basura generada en la región alcance a 671.000 toneladas» (Jordan & Zurita, 2015). Este incremento en generación de desechos sólidos urbanos es uno de los elementos que favorecen la polución a nivel mundial. En



2019, en Perú se produjeron 7 781 904,29 toneladas de desechos sólidos municipales en todo el estado, según datos recogidos por el MINAM. Del total, 4 252 200,47 (54,64%) fueron orgánicos, y 1 750 458,41 (22,49%) fueron inorgánicos. De los residuos producidos, el 77,13% son valorizables (Alfonso & Coronado, 2022).

Solo el 60% del gran desecho sólidos que se producen diariamente en Juliaca es recogido por el sistema de limpieza; el 40% restante es llevado al relleno sanitario por los mismos compactadores que recorren las calles, donde se deja sin vigilancia para permitir que los residuos sigan contaminando. La proporción restante que no ha sido recolectada se dispersa por las calles y avenidas (RPP, 2019).

Teniendo la siguiente información se favorece el avance del estudio titulado: "Diseño de una miniplanta prototipo de pirolisis para la conversión de residuos plásticos en gasolina en la ciudad de Juliaca"; que incluye IV apartados que correspondientemente se menciona:

El **capítulo I** detalla problema, objetivos, justificación; e hipótesis. De igual manera el **capítulo II**, delimita referencias bibliográficas (antecedentes), marco teórico e igualmente conceptual, continuando con **capítulo III**, donde se detalla diseño y tipo de estudio, población asimismo muestra, técnicas e instrumentos, metodología e igualmente diseño estadístico; tambipen el **capítulo IV**, donde se puntualiza hallazgos, con correspondencia discusión asimismo prueba estadística; y por último, conclusiones y recomendaciones.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de situación problemática

Desde su invención, el plástico se ha empleado en casi la totalidad de facetas de la vida diaria (Figueroa & Chela, 2021). Principalmente se halla en materiales como el nylon, polietileno y polipropileno, los cuales se distinguen por sus excelentes características físicas y térmicas (Vaca, 2023). Sin embargo, debido a su rápido crecimiento, es imposible tratar estos residuos, lo que impacta negativamente en la salud humana y en el entorno (Martínez & Rugeles, 2022). Debido a que estos residuos son los desechos municipales e industriales más frecuentes en las ciudades, es necesario manejarlos adecuadamente y encontrar una alternativa eficiente y rentable (Moreno, 2021).

En Perú, en 2023, la generación de desechos sólidos por persona fue de 0,660 kg/hab/día, donde la materia orgánica representó el 43,47% y la basura plástica y derivados el 9,8% (Campos & Armas, 2023). Los



plásticos derivados del petróleo y gas natural presentan un reto ambiental al acumularse en los ecosistemas y organismos a través de micro plásticos y macro plásticos (Altamirano, 2023). Los plásticos constituyen el 47% de la materia orgánica (Campos & Armas, 2023), y la gran mayoría de ellos son desechados al medio ambiente, dañando el ecosistema. Esto se debe principalmente a su lenta degradación, que hace que se acumulen (Cajusol & Carrión, 2023), aunque nuestra nación ha tomado medidas para mermar la elaboración y el empleo de plásticos de un solo uso, la epidemia de COVID-19 ha tenido el efecto opuesto, ya que el incremento del uso de plástico provoca una extensión proporcional de los residuos sólidos (Carmona y Espinoza, 2024).

Este problema es bien conocido en la región de Puno, en particular en Juliaca, donde toda la población utiliza plásticos derivados del petróleo, que se desechan a la intemperie y provocan una contaminación ambiental a largo plazo debido a que son difíciles de descomponer y, con frecuencia, de recoger, lo que afecta a los animales de la tierra, los torrentes y los pantanos, así como al atractivo estético de la ciudad, entre otras cosas.

No obstante, existen métodos y estrategias para controlar los efectos de los plásticos, como el plan de las 4R, que incluye recuperación, reciclado, reutilización y reducción (Alfonso & Coronado, 2022). A pesar de ello, convertir la basura plástica en combustible se considera una opción viable que puede lograrse mediante una serie de técnicas tradicionales de refinación, entre las que destaca la tecnología de pirólisis.



1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. General

¿Cuál es el diseño del prototipo de reactor de pirólisis para conversión de residuos plásticos en combustible líquido?

1.2.2. Específicos

- ¿Cuáles son las características de residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca?
- ¿Cómo es el dimensionamiento del prototipo de reactor de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en combustible líquido?
- ¿Cuánto es la rentabilidad del prototipo de reactor de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en combustible líquido?
- ¿Sera factible económicamente el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en gasolina?

1.3. Objetivos de estudio

1.3.1. General

Diseñar un prototipo de reactor de pirólisis para la conversión de residuos plásticos en combustible líquido.

1.3.2. Específicos

- Determinar las características de los residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca.
- Dimensionar el prototipo de reactor de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en combustible líquido.
- Determinar la factibilidad económica del prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en gasolina.



1.4. Justificación de la investigación

Se calcula que en promedio 4 millones de ton. de desechos plásticos se generan diariamente en todo el mundo, lo que demanda 20 millones de metros cúbicos de espacio para su almacenaje en vertederos o escombreras para su eliminación. Si se lleva a cabo un cálculo anual, se proyecta que los desechos producidos alcanzan los 1600 millones de toneladas, y área requerida para eliminar esos desechos plásticos sería de 7400 millones de m³ (Jordán & Zurita, 2018).

Dado que actualmente el uso de plásticos sintéticos derivados del petróleo está contaminando gravemente al país, a la región Puno y a la ciudad de Juliaca, afectando los ecosistemas en el aire, agua y suelo, se justifica la presente investigación. Por lo tanto, es necesario proponer soluciones más rentables y sostenibles para mitigar estos impactos.

Por consiguiente, la pirólisis del plástico polietileno se busca fabricar un combustible como una alternativa eficiente y limpia para abordar problemática medioambiental causado por gestión incorrecta de desechos plásticos; además, si se logra generar un combustible con características eficientes se lograría controlar en gran medida el manejo de los desechos plásticos, pues estos con el pasar de los días aportan más daños irreparables a la naturaleza y al ecosistema. Este método en este tipo de materiales poliméricos no ha sido muy usado, por consiguiente, la obtención de datos propios es esencial para el progreso de esta tecnología.



Así mismo el desarrollo de un prototipo de reactor de pirólisis tiene una serie de motivaciones y objetivos fundamentales, siendo lo siguiente

Por qué: La pirólisis es técnica que facilita transformación de residuos orgánicos (biomasa, plásticos, caucho, entre otros) en productos útiles como biocombustibles, biochar o gases combustibles. Diseñar un prototipo es el primer paso para probar y escalar este proceso; así mismo en un mundo con crecientes problemas de contaminación y escasez de recursos, la pirólisis puede contribuir a un modelo de economía circular al reciclar materiales y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Para que: Un prototipo permite estudiar cómo las variables operativas (temperatura, presión, tiempo de residencia, etc.) afectan en desempeño y calidad de productos producidos; así mismo dependiendo de diseño de reactor y condiciones de funcionamiento, se puede priorizar la producción de ciertos productos (como bio-aceites, carbón activado o gas de síntesis) según las necesidades del proyecto.

¿Por qué elegir una planta de pirólisis para reciclar plástico?

La pirólisis se selecciona como alternativa tecnológica para el reciclaje de residuos plásticos debido a su habilidad para convertir materiales poliméricos en productos de alto valor agregado, como combustibles líquidos, gas pirolítico y carbón sólido (char). Este proceso térmico permite el aprovechamiento energético de plásticos que no pueden ser reciclados mecánicamente, como polipropileno (PP), polietileno (PE) asimismo poliestireno (PS), los cuales detallan proporción significativa de desechos generados en Juliaca.



A diferencia del reciclaje mecánico, que requiere plásticos limpios, homogéneos y de baja degradación, la pirólisis permite procesar plásticos mixtos y contaminados sin afectar la eficiencia del proceso. Además, contribuye a reducir la acumulación de residuos en botaderos informales, disminuyendo el impacto ambiental y mitigando contaminación de suelo, agua asimismo aire.

Asimismo, la pirólisis ofrece ventajas económicas al generar combustibles líquidos que pueden utilizarse como fuentes alternativas de energía o como insumos industriales, promoviendo un modelo de economía circular. Esta tecnología ha demostrado ser viable técnica, ambiental y económicamente en diversos estudios recientes, lo cual respalda su implementación en ciudades con altos niveles de contaminación plástica, como Juliaca.

1.5. Hipótesis de estudio

1.5.1. Hipótesis general

El diseño y posterior implementación del prototipo de reactor permitirá la conversión de residuos plásticos en combustible líquido mediante pirolisis.

1.5.2. Hipótesis específica

- Las características de residuos plásticos generados en ciudad de Juliaca, son plástico PET, PEAD, PEBD, PP, PCV.
- El dimensionamiento del prototipo de reactor de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en combustible líquido será en base a referencias bibliográficas.

- Es factible económicamente el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en gasolina.

1.6. Variables

En el análisis se detallan 2 variables

1.6.1. Variable independiente

- ✓ Pirolisis

1.6.2. Variable dependiente

- ✓ Conversión de residuos plásticos en gasolina

1.7. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	ESCALA DE MEDICIÓN
<u>Independiente</u> Pirolisis	Prototipo de reactor de pirolisis	Caudal volumétrico de alimentación ($Q=A*v$)	m ³ /h
		Volumen del reactor ($V=m/\rho$)	m ³
		Presión máxima de trabajo ($P=SEt/(R+0.6t)$)	MPa
		Calor requerido	KW
	Organigrama de procesos del prototipo	Adquisición de la materia prima (plásticos)	Razón
		Pesado	Razón
		Proceso de pirolisis	Razón
		Condensación	Razón
		Combustión	Razón



<u>Dependiente</u> Conversión de residuos plásticos en gasolina	Residuos plásticos	PEAD	Kg
		PEBD	Kg
		PP	Kg
		PVC	Kg
	Rentabilidad económica	Costos del combustible	S/.



CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de la estudio

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En estados unidos Foster et al., (2024), emplearon un catalizador de lodo rojo desarrollado en la Universidad de Chicago para pirolizar catalíticamente neumáticos desechados, produciendo combustibles bajos en azufre. Con el fin de crear combustible bajo en azufre que pueda fraccionarse o utilizarse sin fraccionamiento, esta investigación describe la pirólisis catalítica in situ de WT utilizando una formulación de catalizador de lodo rojo. Utilizando un catalizador de lodo rojo especialmente preparado, la pirólisis catalítica in situ se llevó a cabo a 450-550 °C. Los líquidos de pirólisis tenían un rendimiento del 35-40% en peso. Los hidrocarburos alifáticos de cadena larga y el limoneno eran abundantes en el líquido. Mediante el método de desulfuración por adsorción reactiva, el catalizador eliminó con éxito los compuestos de azufre del aceite. Las especies de azufre quedaron atrapadas en el catalizador tras reaccionar



con hematita, calcita, hidróxido sódico y óxido de zinc para formar sulfuros. El aceite de pirólisis catalítica tenía un nivel mínimo de azufre del 0,38% en peso. El catalizador se reutilizó cuando se restableció su actividad durante la regeneración por combustión en el aire.

En la Universidad Nacional de Singapur de la carrera de Energías renovables, Wenming et al. (2024) evaluaron el beneficio de pirólisis de plásticos empleando catalizadores saturados con Ni-, Fe-, y FeNi- con objetivo de estimar efectos catalíticos contrarrestantes de FeNi- frente a Fe- y Ni- en pirólisis de plásticos para generación de combustible avanzado para reactores. El catalizador FeNi/Y produjo una alta productividad de aceite del 65% en peso, lo que resultó excepcional. El aceite producido tenía un bajo porcentaje de alquenos (13,12% de área) y un alto porcentaje de alcanos (36,24% de área) y aromáticos monocíclicos (35,20% de área), lo que lo hacía ideal para la fabricación de c Después se utilizaron varios soportes, entre ellos carbón activado y cuatro zeolitas (Beta, Y, Mordenite y Socony Mobil-5). FeNi/Y mostró los mejores resultados en términos de rendimiento y calidad del aceite. Se estableció que la temperatura insuperable para el máximo rendimiento de aceite entre las distintas temperaturas de pirólisis (450, 500, 550, 600 y 650 °C) era 550 °C. la capacidad del FeNi/Y para la fabricación de combustible de aviación quedó validado por el porcentaje de rendimiento de aceite constante visualizada en investigaciones de regeneración de catalizador combustible para reactores.



El análisis también mostró que los catalizadores FeNi y los catalizadores simples de Fe o Ni tenían efectos catalíticos bastante diferentes. El FeNi ciclaba e hidrogenaba positivamente los alquenos, mientras que los hidrocarburos aromáticos monocíclicos y policíclicos eran principalmente deciclados por el Fe y el Ni. Su capacidad para extraer iones hidruro, de la que carece el FeNi, puede ser la causa de esta discrepancia.

En Bolivia, La paz (2023) edificó reactor de pirólisis a nivel de laboratorio con el objetivo de generar combustible por medio de los desechos plásticos hechos de polipropileno (PP), polietileno (PE), asimismo poliestireno (PS), con objetivo de conseguir el título de ingeniero ambiental de Universidad Mayor de San Andrés. Se establecieron parámetros para la construcción del reactor para asegurar que la basura plástica se degradara efectivamente. Para ello se utilizó un recipiente a presión de diseño estándar A.S.M.E. Sección VIII División 1; estufa de gas que conserva temperatura requerida para proceso, que es de 460 y 550 °C; dispositivos de medición de temperatura y presión; sistema de condensación de gases; y prototipo, que tiene una capacidad de un kilogramo (1 kg). Para modelar el prototipo se utilizó el programa SolidWorks. Como contribución de la investigación académica al progreso tecnológico, el Instituto (I.I.A.T.) de Facultad de Tecnología establecerá las condiciones requeridas para llevar a cabo prototipo y el comparativo análisis de combustible obtenido y propiedades. Será factible sugerir la transferencia del prototipo de transformación de basura plástica en combustible a organizaciones y empresas responsables del manejo de desechos plásticos para preservación del entorno una vez puesto en



práctica. Sin embargo, la visibilidad del combustible producido por el proceso de conversión permitirá la promoción de operaciones de instrucción y concienciación en la Facultad de Tecnología, que reduzcan el uso de plástico.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Para conseguir grado de ingeniero químico en Universidad Nacional del Callao, Carmona y Espinoza (2024), emplearon un método de pirólisis para generar un combustible líquido por medio del tereftalato de polietileno. Para establecer los parámetros ideales de funcionamiento, tales como temperatura y duración de la reacción de pirólisis, se emplea un enfoque experimental a nivel de laboratorio. Después de que el tereftalato de polietileno se sometiera a un proceso antes de lavado, secado asimismo merma de tamaño, se emplearon varios niveles para determinar la conversión máxima de generación de combustible líquido y la merma en desarrollo de productos gaseosos y desechos sólidos en atmósfera de oxígeno controlada. También se empleó el procedimiento de pesaje para establecer porcentaje de transformación de combustible líquido tras el proceso pirolítico. Con velocidad de gradiente de temperatura de 30°C hasta 35°C por minuto, los resultados demuestran una elevada tasa de conversión de más del 4% a temperaturas de 500°C, 550°C y 600°C. Asimismo, a 550°C y 60 minutos de tiempo de reacción, se alcanzó una tasa de conversión media del 14%. Se determina que la conversión de combustible líquido prevista se produce por el método de



pirólisis efectuado a tereftalato de polietileno bajo parámetros específicos de temperatura asimismo lapso de reacción.

Con el fin de obtener un grado de maestría en gestión estratégica en Pontificia Universidad Católica del Perú, Sálazar et al. (2023) utilizaron basura plástica para producir combustible en Iquitos, reduciendo la contaminación en el caluroso ambiente (Iquitos y Pucallpa). Dado el clima caluroso en Iquitos - Pucallpa, las personas suelen consumir bebidas como refrescos como gaseosas y agua en botellas de plástico de uso único. Esto conlleva la producción de residuos plásticos, que con frecuencia se vierten en las calles o en los ríos y son uno de las primordiales motivos de contaminación de la ciudad, dado que los recipientes no son biodegradables. Dada la problemática social relevante de la polución de los ríos urbanos y amazónicos, se considera factible establecer una fábrica que emplee los desechos plásticos como combustible para la generación de gasolina y gasóleo de 90 mediante la pirólisis. Esto posibilitaría disminuir sustancialmente la contaminación y producir ingresos a través del comercio del combustible producido con estos desechos. En la actualidad, los residuos plásticos se generan a diario como desechos de refrescos, bolsas y otros tipos de envases de plástico. Con la puesta en partida de esta investigación, las ciudades de Iquitos y Pucallpa reducirán 2.190 toneladas de basura plástica al año, contribuyendo a alcanzar finalidad de ODS. "Avalar particularidades sostenibles de producción y consumo". Como este proyecto sólo podrá satisfacer el 0,9% del requerimiento de combustible de ambas localidades, no pretende sustituir su consumo. Su objetivo principal es



disminuir drásticamente la polución de las corrientes peruanas y de las franjas sensibles de la selva.

Con el fin de conseguir título de ingeniero ambiental de la Universidad César Vallejo, Campos & Armas (2023) desarrollaron combustibles FUEL-OIL partiendo de despojos plásticos por pirólisis en Pucallpa-UCayali. Con el fin de establecer propiedades físicas asimismo químicas, el beneficio y las manifestaciones de vapores del combustible derivado de los restos de los tres tipos de plásticos utilizados en la investigación, unidad de análisis fueron desechos de 3 clases diferentes de plásticos, a saber, PP, PS y HDPE, cada uno con peso de 21 kg. Estos materiales fueron recogidos del vertedero de ciudad, que se halla en kilómetro 22 de Pucallpa. A través del proceso de pirólisis, que actuará como origen de operación para realizar la investigación y, en última instancia, identificar el producto con el mayor rendimiento en el uso de este combustible, es posible decidir si de combustibles alcanzado es de mínimo, igual o mayor calidad que Diesel B5. Como resultado, se observó que el fuelóleo fabricado a partir de basuras plásticas de PS era de mayor calidad y funcionaba mejor que el gasóleo B5. En cambio, el fuelóleo obtenido a partir de despojos plásticos de HDPE comparte características físicas y químicas con el gasóleo B5, y su rendimiento es similar al del gasóleo B5. Por su parte, el fuel obtenido a partir de desechos plásticos de PP es el que menos se parece al Diesel B5. Según la investigación, el fuelóleo fabricado con PS es ligeramente mejor que el convencional.



2.1.3. Antecedentes locales

La pirólisis se ofrece como un sustituto viable para la descomposición de desechos de poliestireno y polietileno de alta densidad en materiales de alto valor energético en el estudio de Juliaca Condori & Mamani (2023) sobre el beneficio energético de estos desechos para producir combustibles para la carrera de ingeniería ambiental de Universidad Peruana Unión. Mediante empleo de técnica de pirólisis para producir combustible a partir de polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS), ese estudio se enfoca en la valorización de residuos plásticos. Con una presión máxima de 130 PSI (9 bares) y una destemplanza máxima de 600°C, se utilizó un reactor de tipo discontinuo a partir de un depósito de compresor de aire de 10 litros. Para regular la liberación de contaminantes, también se evaluó el grado de opacidad del combustible pirolítico mientras el vehículo estaba en control estático durante el periodo de aceleración del motor. En el transcurso de 240 minutos, el HDPE y el PS fueron expuestos a temperaturas de 272 y 265°C y presiones de 37,04 y 40,47 PSI, respectivamente. El catalizador en ambos tratamientos fue zeolita. Basándose en su densidad, los combustibles pirolíticos derivados del HDPE y el PS son petróleos crudos extremadamente ligeros y volátiles, con valores caloríficos respectivos de 45,22 y 45,21 MJ/kg. La opacidad de ninguno de los dos combustibles superó los límites máximos permitidos de 3,25 m⁻¹. Una forma eficaz y sostenible de gestionar la basura plástica es valorizar energéticamente los residuos sólidos de HDPE y PS para producir biocombustible pirolítico que esté a la par con el gasóleo.



Utilizando la transesterificación, Puno Pary (2019), produjo biodiésel mediante la lenteja de agua (*Lemna gibba*) para lograr el título de ingeniero químico de Universidad Nacional del Altiplano de Puno. El cultivo de lenteja de agua (*Lemna gibba*) para tratamiento de aguas residuales ha llamado atención recientemente porque se cree que es una fuente de contaminación. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo emplear las lentejas de agua para generar una nueva fuente energética capaz de salvaguardar la biosfera. El estudio se realizó en el Laboratorio para extraer los aceites se utilizó la siguiente metodología: Mediante el método Soxhlet, se extrajo el 5,86% de los lípidos totales; mediante el método Dyer:metanol 1/2, se extrajo el 3,30% de los lípidos no polares; y mediante el método Folch con triclorometano:metanol 2/1, se extrajo el 4,70% de los lípidos no polares. Fue necesario desgomar y neutralizar el aceite para producir biodiésel mediante transesterificación con metanol e hidróxido de sodio. A partir de 730 g de lenteja de agua húmeda, produjimos 1,980 mL de biodiésel crudo, con un rendimiento del 95% de reacción de transesterificación. Estos resultados se optimizaron utilizando el diseño experimental compuesto central: Se obtuvieron los siguientes parámetros con 23 + estrellas: 57 °C, 547 rpm de agitación y 23 minutos fueron necesarios para producir un 103,30% de biodiésel crudo.

Puno Baltazar (2019) optó por cursar la carrera de Ingeniería Agroindustrial en Universidad Nacional del Altiplano de Puno con el fin de elaborar biocombustible sólido de segunda generación con mayor capacidad calorífica, utilizando hojas de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) y tallos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). El proyecto se llevó



a cabo desde enero de 2014 hasta noviembre de 2015, siendo la primera etapa llevada a cabo en un laboratorio y la segunda etapa en los talleres otorgados para este propósito por la compañía Expertos, Consultoría S.A.C. en Juliaca. Con el uso del Método AOAC, 2005, para realizar análisis fisicoquímicos, se estableció el contenido de lignina, celulosa, cenizas, humedad, y grasa en los tallos de quinua y hojas de eucalipto. La meta principal consistió en desarrollar un biocombustible sólido de segunda generación con alto poder calorífico, utilizando estos materiales como combustible alternativa para cubrir las demandas energéticas de los habitantes de nuestra región Puno. Para determinar la potencia calórica de los tallos de quinua y hojarascas de eucalipto, además de la potencia calórica del combustible sólido de segunda producción, fabricado mediante estos componentes y la combinación perfecta, se aplicó la prueba de ebullición para simular un proceso de cocción de alimentos en su etapa inicial. En total, se emplearon 81 unidades experimentales, realizándose 27 tratamientos en tres réplicas a través de una disposición factorial de 33. Comprendido de Cenizas 4,73 y 10,09%, Grasa 1,77 y 12,23%, Lignina 30,21 y 15,29%, Celulosa 63,31 y 31,19%, y Humedad 10,40% y 10,20% fueron los resultados de las Características Químicas. El Poder Calorífico de los Serpollos de Quinua fue de 62,61 kcal/s, mientras que el de las Hojas de Eucalipto fue de 65,45 kcal/s. El Biocombustible Sólido de Segunda Generación producido utilizando la Tecnología de Densificación Húmeda a partir de Tallos de Quínu a y Hojas de Eucalipto tuvo una Capacidad Calorífica de 135,34 kcal/s.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Plásticos

Los plásticos son polímeros que se componen de moléculas de carbono vinculadas mediante enlaces covalentes. Se consiguen a través de métodos de polimerización, a través de procesos aditivos, en los que los monómeros se combinan para crear polímeros lineales asimismo tridimensionales; provienen de petróleo y se particularizan por su sencillez para moldear (Gil, 2019).

2.2.1.1. Clasificación de plásticos

La categorización de plásticos puede organizarse en función de sus propiedades y conducta termo-mecánica, como se puede observar correspondientemente:

Tabla 2

Categorización de plásticos

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

Nota. Obtenido de (Jordan & Zurita, 2015)

Para reconocer la composición y facilitar la clasificación y el reciclado, la compañía de Industria de Plástico otorgó código numérico a cada clase de plástico:



- PET - Polietileno tereftalato
- PEBD. Polietileno de baja densidad
- PEAD. Polietileno de alta densidad
- PVC. Policloruro de vinilo
- PS. Poliestireno
- PP. Polipropileno
- Otros ´

2.2.1.2. Identificación de desechos plásticos

Según Codificación Internacional de Sociedad de Industria del Plástico (SPI), existen siete tipos distintos de plásticos derivados del petróleo (Afanador, Bonilla, Kafarov, León, & Carreño, 2022).

Tabla 3

Clasificación de los plásticos

Símbolo	Flexibilidad	Aplicación Producto	
Polietileno Tereftalato 	No	Envases de aceite, botellas de bebidas,	

<p>Polietileno de alta densidad</p>	Si	Bolsas supermercado s, implementos aseo	
<p>Policloruro de Vinilo</p>	No	Tubos, cables eléctricos, cañerías, envases detergentes.	
<p>Polietileno de baja densidad</p>	Si	Envases: shampoo, crema, bolsas manteles, para basura.	
<p>Polipropileno</p>	Si	Mamaderas, vasos, tapas de botellas.	
<p>Poliestireno</p>	Si	Descartables: cubiertos, platos, vasos. Empaques: helado, yogur y cajas de huevos.	
<p>Otros</p>	Si	Teléfonos, juguetes, artículos médicos, cepillo dental,.	

Nota. Obtenido de (Puño, 2023)

2.2.1.3. Métodos reciclaje para desechos plásticos

Considerando que los termoplásticos pueden ser reciclados, implica la reutilización de polímeros para crear nuevos bienes o sus derivados (Palmay & Vargas, 2021).

2.2.1.4. Reciclaje mecánico

Es una técnica que busca optimizar la utilización y eficacia del material, empleando un procedimiento que abarca diversas actividades como la elaboración del plástico, el lavado, la trituración y la clasificación (Solis, Miranda y Davis, 2020).

2.2.1.5. Reciclaje Químico

En este proceso se realizan las operaciones de gasificación, pirólisis asimismo hidrogenación se incluyen en el reciclaje químico; el proceso de pirólisis es la técnica más crucial. Con esta técnica de reciclaje, se producen productos combustibles aprovechando la química de la basura plástica. Además, las extensas series poliméricas se transforman en cadenas de hidrocarburos más ligeras (Ocampo, 2019).

La siguiente tabla presenta los procesos clave que facilitan el reciclaje químico.

Tabla 4

Comparación de 3 principales procesos de transformación química

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (Mpa)	Catalizador
Pirólisis	380 hasta 530	0.1 hasta 0.5	No requerido
Combustión	700 hasta 1400	>0.1	No requerido



Gasificación	500 hasta 1300	>0.1	No esencial
--------------	----------------	------	-------------

Nota. Obtenido de (Figuroa & Chela, 2021)

a) Reciclaje Energético- Consiste en utilizar el alto poder calorífico de los residuos plásticos para generar energía mediante su combustión o incineración. Sin oxígeno, este procedimiento de reciclado aún puede completarse (Amar, Ardilla, & Barra, 2019). Es importante señalar que este proceso implica oxidación parcial, reducción y pirólisis (Balseca & Carrera, 2022).

Es importante señalar que el esfuerzo actual empleará un procedimiento que implica la descomposición térmica de los plásticos (Balseca, Aquino, Chela, & Figuroa, 2021).

2.2.2. Pirólisis

La gestión de desechos sólidos, que representan un peligro para entorno y salud pública, es uno de los problemas más acuciantes del país. Los residuos de plásticos están contribuyendo a una serie de problemas técnicos, financieros y salud pública. En años últimos, las dificultades se han agravado como consecuencia de la demanda del parque automovilístico (Abril & Ortiz, 2015).

Los residuos plásticos deben ser reclasificados en base de particularidades físicas asimismo químicas para que puedan ser empleados como fuente de materias primas para procesos mecánicos, químicos o termoquímicos que tengan como objetivo la obtención de productos más valiosos que puedan ser utilizados de forma energética (Campos & Arrazola, 2017).



De acuerdo con el estudio de investigación de Chun, Rongcheng y Guangwen (2020) acerca de la revalorización de los desechos plásticos, el proceso de pirólisis resulta ser el método más efectivo para abordar este problema debido a su carácter termoquímico asimismo adaptable, y se aplica tanto a desechos orgánicos como a los generados de petróleo, incluyendo caucho sintético y plásticos. El proceso de pirólisis, utilizado para fabricación de biocombustibles de poder calorífico alto y otros químicos elementos de alto valor monetario (como disolventes, nafta, gasolina, etc.), ha probado un rendimiento excepcional.

2.2.2.1. Proceso de pirólisis

La pirólisis (Czajczynska, Krzyzynska, Jouhara y Spencer, 2017) es el procedimiento termoquímico inalterable de moléculas sólidas o líquidos complejos a elevadas temperaturas en una atmósfera inactiva o sin oxígeno (anaeróbica). El desempeño del proceso de pirólisis se ve influenciado por la temperatura. En este procedimiento, las moléculas alcanzan temperaturas elevadas, causando vibraciones moleculares. Adicionalmente, las moléculas experimentan un tanto de estiramiento y agitación que comienzan a desintegrarse en moléculas de menor tamaño (Dzuhairy, Hamidah, Raja, Muzafar, & Nor, 2020).

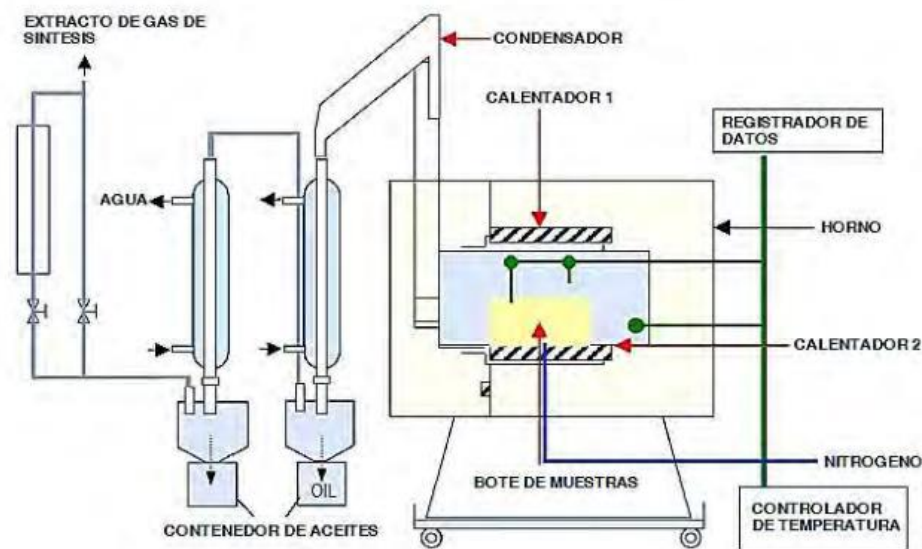
Dado que la palabra latina para el fuego, pyro, indica el contenido de oxígeno y, por ende, de productos intermedios reactivos y oxigenados, la termólisis es notablemente más eficiente que la pirólisis. La termo destilación, también denominada como pirólisis, es tratamiento térmico químico que elimina enlaces a calores que superan los 450 °C y en no

oxidantes ambientes, como es la inerte atmósfera o vacío (Al & Aisha, 2022).

Los resultados de la pirólisis son líquidos nombrados como aceite pirolítico (también llamado como bioaceite o alquitrán), sólidos (carbón vegetal) y gases no condensables. El tipo de material que se manipula (vegetales, plásticos o neumáticos que están por finalizar su vida útil) influye considerablemente en el tipo de producto asimismo las capacidades de productos de pirolisis (Diaz K., 2022).

Figura 1

Unidad pirólisis de lecho fijo



Nota. Obtenido de (Diaz K. , 2022)

2.2.2.2. Tipos de pirólisis

La descomposición térmica de los materiales orgánicos, conocida como pirólisis, comienza a 300 °C y se realiza a elevadas temperaturas sin necesidad de oxígeno. Mediante procesos químicos de craqueo térmico, termólisis y despolimerización, las moléculas se descomponen en



polímeros más pequeños durante el proceso de pirólisis (Martunis, Winanda y Harahap, 2019).

Según Moorthy (2020), el proceso de pirólisis implica una variedad de procesos químicos que dependen de las circunstancias operativas, incluyendo el tipo de reactor a emplear, el gradiente de calentamiento, tiempo retenido, temperatura máxima lograda, aplicación o no de catalizadores, velocidad de refrigeración y la temperatura de la operación.

a) Pirólisis convencional (lenta)

Esa clase de pirólisis generalmente se aplica en conjunto con reactores de lecho fijo (FB) que funcionan con desarrollo semicontinuo que descompone los plásticos a bajas temperaturas. El tiempo de residencia para este tipo de pirólisis es bastante extensa, variando entre 5 y 30 °C/min tanto para etapa sólida como para el vapor (puede tomar 32 horas) (Pinargote y Sánchez, 2023). Con una velocidad de calentamiento modesta, este procedimiento puede alcanzar una temperatura de trabajo ideal de 500 a 600 °C. Tres productos -líquido, sólido y gas- se producen en cantidades notables en estas circunstancias. Según Prurapark (2020), este proceso de pirólisis gradual también se conoce como carbonización.

b) Pirólisis rápida

Consiste en calentar rápidamente el material a altas temperaturas (650°C) sin presencia de oxígeno. Como rendimiento del peso de fracción supera significativamente al de pirólisis tradicional, se utiliza



por primera vez para producir bioaceite. El enfriamiento rápido y un gradiente de calentamiento elevado hacen que la parte líquida se condense sin provocar reacciones de ruptura que harían que los compuestos de gran tamaño molecular se unieran al gas no condensable (Soni, 2021).

El propósito del proceso de pirólisis rápida es conseguir una descomposición inmediata y un periodo de residencia breve, lo que resulta ventajoso para la creación de líquidos. Esto difiere del proceso de pirólisis lenta, conocido por la desintegración térmica a temperaturas superiores y rapidez de calentamiento más rápida. Se sabe que procedimiento de pirólisis rápida es técnica efectiva para transforma el ST en biocombustible con un valor mayor calorífico (CV) y otros compuestos beneficiosos (50-70 % en peso) (Timana, 2022).

c) Pirólisis catalítica

Para influir en la composición o las características de productos específicos y potenciar la eficiencia del producto gaseoso, dispone de catalizador en el interior del reactor. Zeolitas HZSM-5 y HY se emplean en proceso de pirólisis catalítica para producir productos químicos monoaromáticos 33 (benceno, xileno, y tolueno) a temperaturas entre 430 y 600 °C. Al incorporar catalizador a pirólisis, se disminuye temperatura de degradación y se potencia selectividad de algunos productos. La distribución de los productos producidos puede mejorarse, por ejemplo, para producir combustibles de mayor



calidad, seleccionando el catalizador adecuado (Villegas & Zamudio, 2022).

Muchos de estos catalizadores también se emplean actualmente en la manufactura petrolera para el selecto de hidrocarburos, y las zeolitas se encuentran entre los catalizadores más populares (Yadav, 2023).

d) Pirólisis flash o pirólisis ultrarrápida

La pirólisis se denomina ultrarrápida cuando los tiempos de residencia son aún más cortos y la temperatura de este proceso es superior a 1000 °C. En esta situación, la Figura 8 exhibe posiciones de craqueo de molécula de goma en el proceso de desintegración por calor 33. Un rendimiento superior se vincula a los gases. No obstante, un método viable para producir bioaceite es la pirólisis flash (Hewei, 2022). El petróleo crudo puede llegar al 70%. Las características fisicoquímicas propias de aceites -escasa estabilidad térmica, corrosividad asimismo bajo poder calórico los convierten en desafíos para su aplicación en turbinas y motores (Mejía, 2022).

Las condiciones de funcionamiento en los procesos flash de pirólisis pueden ser alteradas para impulsar la generación de líquidos (flash-liquids) o gas (flash-gas) (Peralta & Bermeo, 2018).

e) Proceso pirólisis al vacío

En tal procedimiento de pirólisis sirve para disminuir el punto de ebullición y impedir reacciones químicas desfavorables, la materia



orgánica se calienta al vacío durante todo el proceso de pirólisis. Los altos niveles de rendimiento de combustible primario son consecuencia de la rápida ruptura de los complejos repartimientos poliméricos de la materia prima en los lignocelulósicos provocada por la degradación térmica al vacío. En el procedimiento de pirólisis al vacío, que es lo contrario de las tecnologías de pirólisis rápida, la temperatura se incrementa gradualmente de 2 a 4 °C/min hasta 520 a 550 °C a presión de 6 hasta 15 kPa (Delgado & Kurinthy, 2019).

La pirólisis sin atmosfera ayuda a producir altos rendimientos de elementos de pirólisis líquida mediante materiales a base de carbono. El vacío reduce las reacciones redox, la repolimerización, la recondensación y otras secundarias reacciones como craqueo térmico asimismo catalítico. La eficiencia de líquidos orgánicos, como los aceites de pirólisis, se incrementa en detrimento de los desechos sólidos y los gases si los productos en fase vapor se enfrían rápidamente (Polanco, 2019).

f) **Proceso de Hidro pirolisis**

Cuando las materias orgánicas de mayor peso molecular y elevada complejidad química se mezclan y se calientan a altas temperaturas en un sistema cerrado con presencia de agua, tiene lugar un proceso conocido como desintegración térmica. La hidropirólisis, que se genera cuando materia orgánica se llega a descomponer térmicamente en ausencia parcial de oxígeno, implica conglomerado

de procesos físicos asimismo químicos que ocurren a temperaturas de 250 a 550 °C y presiones de hasta 17,01 atm (Diaz F., 2020).

Tabla 5*Tipos proceso de pirólisis*

Proceso	Tiempo residencia	Velocidad calentamiento	Temperatura (°C)	Productos	Poder calórico [MJ/kg]
Carbonización Convencional	días 60-240 min	muy lenta 5-30 °C/min	400 400-600	Biochar Char, aceite pirolítico y gas	30
Rápida	0.5-5 s	30 °C/min	< 650	Char, aceite pirolítico y gas	30
Flash (líquidos)	< 1 s	rápida	<650	Aceite pirolítico y gas	20
Flash (gas)	< 1 s	rápida	<650	Gas y aceite pirolítico	20
Ultrarrápida	< 0.5 s	muy rápida	1000	Gas y solventes	30
Vacío	2-30 s	rápida	400	Bioaceites	30
Hidropirólisis	< 10 s	rápida	<550	Aceite pirolítico y gas	30
Metano-Pirólisis	< 10 s	rápida	<700	Aceite pirolítico y gas	30

Nota. Obtenido de (Altamirano, 2023)

2.2.2.3. Tipos de reactores para proceso de pirólisis

Raghuram et al. (2018), indica clases de reactores más empleados en las operaciones de pirólisis.

a) Reactor de lecho fijo (FB)



Material reactivo se combina con catalizador o se instala en forma de lecho sobre el reactante. En esta clase de reactores, el lecho de catalizador es inmóvil. Dependiendo de los parámetros que deban mantenerse, los catalizadores pueden colocarse dentro del reactor de diversas maneras. Este reactor, el más popular en las empresas para la fabricación de diferentes productos químicos, es el más básico de todos los tipos de reactores actualmente en desarrollo (Campos & Arrazola, 2017).

b) Reactor de lecho fluidizado (FLB)

Los diversos reactores catalíticos heterogéneos igualmente comprenden reactores de lecho fluidizado. Al hacer pasar un gas a presión mediante lecho catalizador, el catalizador de este reactor se fluidiza, quedando en suspensión y actuando como un fluido. Esto facilita mezclar ampliamente en todas direcciones, lo que mejora la estabilización de la temperatura y acelera la transferencia de masa y las velocidades reactivas. En estos reactores pueden emplear considerables cantidades energía y catalizador. Los principales inconvenientes de este reactor, que se emplea con frecuencia en procesos de craqueo catalítico, son elevados gastos de desarrollo y mantención (Campos y Arrazola, 2017).

c) Reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

Tanto los productos como el flujo interno del reactor son constantes. Puede contener entre 50 y 100 mililitros. En el interior del reactor hay un agitador motorizado o hidráulico. Este agitador mezcla

constantemente los ingredientes y mantiene la uniformidad. Las instalaciones de tratamiento de aguas los emplean con frecuencia (Campos y Arrazola, 2017).

d) Reactor de horno rotatorio (RK)

Un cilindro de manera inclinada con respecto al plano horizontal constituye el reactor del horno rotatorio. El material se suministra desde el extremo superior del recipiente, se procesa y luego se mezcla en el extremo inferior. Reacción de pirólisis suele llevarse a cabo mediante un horno de calentamiento externo (Guevara, 2019).

e) Reactor de lecho con pico cónico

Un buen sustituto del reactor de lecho fluidizado, reactor de lecho cónico con picos facilita procesamiento de la pirólisis fases están garantizadas por la movilidad cíclica de las partículas (Ilbay & Geovanny, 2018).

Los reactores de lecho cónico son superiores a los lechos fluidizados porque permiten una mayor variación del tamaño de las partículas y tamaños de partícula más altos. El diseño del reactor determina el rendimiento del proceso de pirólisis, y trabaja con partículas que tienen texturas irregulares y agregados. También tiene propiedades especiales para transferir calor a la materia prima (Campos & Arrazola, 2017).

La tabla presenta el dimensionamiento de diversos reactores de pirólisis empleados en experimentos de laboratorio.

Tabla 6

Dimensiones de reactores de lecho fijo en experimentales pruebas de pirólisis

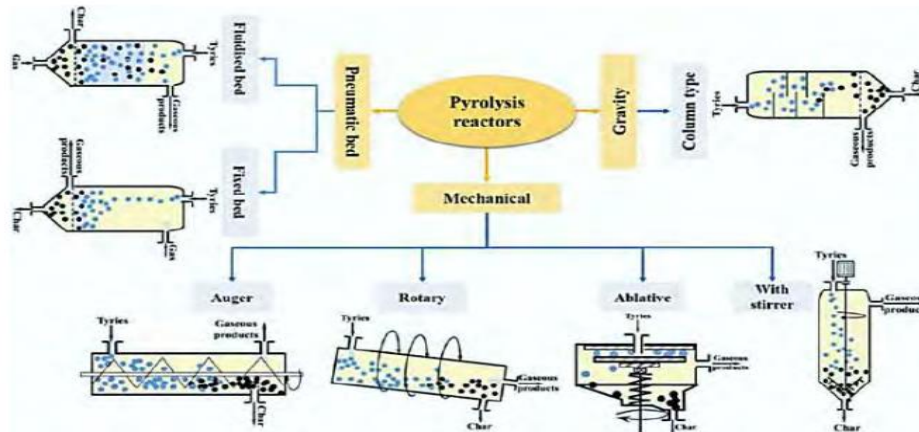
N°	Masa [kg]	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Gradiente calentamiento [°C/min]	Tiempo reacción [min]	Referencia
1	20.00	100.0	400	18	30	Mohammad Abdul et al., (2018)
2	0.75	10.0	400-600	10	50	M. Rofiquil et al., (2008)
3	1.50	10.0	< 650	10	40	Chun, Rongcheng et al., (2020)
4	0.13	5.0	<650	15	60	Golshan, Fatola et al., (2009)
5	0.30	7.0	<650	15	60	Dzuhairy Ab., y otros. (2020)
6	0.065	2.5	1000	5	30	Fernandez-Colino, y otros. (2008)

Nota. Obtenido de (Altamirano, 2023)

En Figura 9 se representan modelos de reactores que generan superior rendimiento de líquido entre el 44,5 y el 55,0% que los demás.

Figura 2

Unidad de pirólisis



Nota. Obtenido de (Jin & Hong, 2018)

Tabla 7

Tecnologías de valorización de pirólisis

Tipo reactor	Modo de calentamiento	Ventaja
Ablativo	95% conducción 4 % convección 1 % radiación	Se aceptan materiales grandes; los carbones de biomasa tienen una abrasión mecánica muy alta; el diseño es compacto; hay dificultades con el suministro de calor; no siempre se necesita gas de transferencia de calor; y no siempre se necesita gas de transporte de partículas.
Lecho fluidizado móvil	80% conducción 19%convección, 1% radiación	El catalizador y la materia prima tienen más interacción en un reactor de lecho fluidizado. Campos y Arrazola (2017) emplearon métodos continuos para mantener su temperatura constante y la transmisión de calor. Plástico fundido se distribuye en finas capas por lecho fluidizado, que sirve como elemento de transferencia de calor.
Lecho fluidizado	90% conducción 9% convección, 1% radiación	Los criterios de excelencia incluyen la transmisión de calor, el suministro de calor al lecho y al gas, la abrasión limitada de carbón, la mezcla ideal de sólidos, el tamaño de partícula de 2 mm en dimensión más baja y un diseño sencillo del reactor.
Transporte de flujo	4% conducción, 95% convección 1% radiación	Bajos índices de transferencia de calor, caudal de admisión, limitación de gas, mezcla de sólidos y restricción de dimensión de partícula de 2 mm.



2.2.2.4. Productos de proceso de pirólisis

Las diversas modalidades de pirólisis generan 2 productos: líquidos, sólidos asimismo gaseosos; el desempeño de cada producto depende del insumo y de diferentes parámetros de operación. De acuerdo con proceso de pirólisis, efectuado en un ambiente anaeróbico, se suelen emplear gases inertes como N_2 , CO_2 , He y Ar . En circunstancias particulares de temperatura, rapidez de calentamiento del material, presión y tamaño de partícula, los gases generarán productos con elevado contenido energético que, después de ser procesados de manera posterior, pueden emplearse como combustibles para generación de calor y electricidad (Sebastián & Urrego, 2019).

Se clasifica en tres categorías fundamentales según su gama de productos y su condición física.

- El carbón, el negro de humo o el carbón vegetal son ejemplos de residuos sólidos que se encuentran en la fase sólida.
- El combustible líquido (hidrocarburos y alquitrán) constituye la fase líquida.
- Los gases condensables y no condensables constituyen la fase gaseosa.

Según él, los productos de pirólisis son económicamente viables debido a su alto contenido calorífico de 30 a 40 MJ/kg (Qureshi & Laine, 2020).

a) Líquidos pirolíticos (fuel oil)

La etapa líquida es resultado más relevante de proceso de pirólisis que Sogancioglu & Esra describieron. Ofrece un análisis exhaustivo de

todos los líquidos de pirólisis logrados a temperaturas de 300, 400, 500, 600 y 700 °C. Además, sostiene que los líquidos producidos por plásticos son una combinación de compuestos orgánicos C₆-C₂₄ y poseen considerable cuantía de elementos aromáticos (54,40-75,70%), compuestos de nitrógeno (2,37-3,40%) y compuestos de oxígeno (2,19-40 4,79%), como:

- Alcanos: octadecano, eicosano, tridecano, dodecano, undecano y decano.
- Alquenos: butadieno, propileno, pentadieno, penteno, y octeno son ejemplos de alquenos.
- Aromáticos: tolueno, Benceno, xileno, etilbenceno, estireno, fenantreno, naftaleno, y antraceno son ejemplos de aromáticos.

Dependiendo de la materia prima, el contenido energético del LPO, o aceite pirolítico, puede oscilar entre 39 y 44 MJ/kg (Tulashie & Dapaah, 2019).

b) El gas

Los querosenos y los compuestos olefínicos con números de carbono comprendidos entre uno y cinco suelen constituir el gas que toque tras recuperación de líquido, también conocido como gas pirolítico o gas de síntesis. Los principales constituyentes de los gases de pirólisis son hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), etano (Etano 2, Etano 3), propano (C_3H_8), Butano (C_4H_{10}), Propeno (C_3H_6), Butenos (C_4H_8), Etano (C_2H_6) y butadieno (C_4H_6), así como una pequeña cantidad de azufre

nitrógeno (NNN_3) y (HH_2SS , CSS_2) La degradación térmica del BR y el SBR es el motivo primordial de existencia de estos gases (Martínez y Rugeles, 2022).

En este punto, sirve como combustible y genera energía utilizable simultáneamente. Un producto que actualmente está ganando popularidad es el hidrógeno, que tiene excelentes perspectivas dado al progreso de pilas de combustible de hidrógeno o células de hidrógeno, que producirán electricidad con una eficiencia energética extremadamente alta en el entorno (Prurapark, 2020).

c) El char

Se utiliza como negro de humo de mínima calidad asimismo puede convertirse en carbón activado como combustible sólido o esgrimir como fuente energética en reactores pirolizadores (Mejía, 2022). El carbón (Char) retiene la mayor cantidad de azufre, mientras que la porción de nafta liviana lo hace en otras situaciones. Los componentes nitrogenados son los siguientes: nitrilos, piridina, derivados alquílicos, anilina, aminas alifáticas, quinonas y benzotiazoles.

Los residuos plásticos pueden convertirse mediante pirólisis en BC pirolítico o char, un sólido rico en carbono. Además de la fracción líquida, la composición, la calidad y el rendimiento del neumático tienen un iposee efecto significativo en viabilidad económica de la pirólisis. La composición del char viene determinada por las circunstancias de la pirólisis. Dependiendo de la composición del neumático, el BC pirolítico puede ser tan bajo como 35-40 por ciento en peso (carbono fijo más cantidad en cenizas) o inclusive más bajo. Como resultado, algunos vapores orgánicos

que se generan durante la pirólisis se llega a absorber en superficie de carbón o se transforman en coque mediante reacciones de desalquilación asimismo deshidrogenación (Sogancioglu & Esra, 2017).

El negro de carbón, también conocido como carbón negro, posee potencial para emplearse en una variedad de productos de caucho, particularmente en la fabricación de nuevos neumáticos (Kalargaris & Tian, 2017).

En el proceso de pirólisis se observan productos sólidos (biocarbón) y líquidos (aceite pirolítico).

Figura 3

Productos obtenidos del proceso de pirólisis



Nota. Obtenido de (Martunis, Winanda, & Harahap, 2019)

2.2.2.5. Ejecución industrial de proceso de pirólisis

En procesos de pirólisis se utilizan diversas técnicas para tratar los residuos plásticos, entre ellas: pirólisis incitada por microondas, pirólisis en tubo de vacío, pirólisis por plasma, pirólisis hidratada, pirólisis en línea, pirólisis en vacío, torrefacción, pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis flash, , pirólisis en lecho fluidizado, pirólisis inducida por microondas, pirólisis en

línea, pirólisis por plasma, pirólisis en tubo de vacío además pirólisis por pulverización ultrasónica (USP) (Figuroa & Chela, 2021).

Según Kalargaris & Tian (2017), otros procedimientos de pirólisis para reciclar plásticos incluyen la carbonización, la destilación seca y destructiva, y la descomposición térmica. El proceso pirolítico se considera una de las formas más prácticas de beneficiar económicamente la basura a gran escala; los productos resultantes son fáciles de manipular, almacenar y transportar.

2.2.3. Parámetros que influyen en proceso de pirólisis

El producto que se obtiene depende de la composición de la sustancia que se va a pirolizar. Las siguientes variables afectan al proceso de pirólisis térmica:

2.2.3.1. Temperatura

Además de afectar a la estabilidad de materias primas entrantes y a la tasa de descomposición térmica, la temperatura también afecta a los productos finales (Díaz F., 2020).

La temperatura a la que se efectúa proceso de pirólisis oscila entre 200°C y 1000°C. Los enlaces de carbono se rompen como resultado de la capacidad de la temperatura para destruir los enlaces químicos de las moléculas. Dentro de la operación de pirólisis se pueden identificar 3 etapas distintas de temperatura (Ramos & Pretell, 2021).



Las cenizas y el coque son los principales sólidos que se producen cuando los polímeros plásticos se descomponen entre 220°C y 330°C (Martunis, Winanda, & Harahap, 2019).

Las fracciones líquidas tienen un alto rendimiento entre 330°C y 450°C, pero la producción de gas se produce en menor cantidad. Los plásticos superan su punto de ebullición a temperaturas de 500°C, y la proporción de mayor producción son los gases (Peralta & Bermeo, 2018)

2.2.3.2. Presión de funcionamiento

Es indicador esencial para edificación de reactor ya que se empleará para establecer el grosor de la vasija de presión, constituyendo una medida esencial para el diseño del reactor (Timana, 2022).

2.2.3.3. Velocidad de calentamiento

La pirólisis, que se divide en etapas lentas y rápidas, está fuertemente influenciada por la temperatura. En pirólisis flash, transmisión de calor dirige proceso de descomposición (favoreciendo creación de líquidos a temperaturas que superan los 400°C y la generación de gases a estas temperaturas), mientras que en pirólisis lenta, con periodos de reacción de días u horas, la reacción dirige degradación (favoreciendo la adquisición de la fracción sólida) (Sebastián & Urrego, 2019).

2.2.4. Variables del proceso de pirolisis

2.2.4.1. Temperatura

Uno de los factores más cruciales a tener en cuenta a lo largo de proceso de pirólisis es temperatura, ya que de ella dependerán productos finales (Guevara, 2019).



2.2.4.2. Presión

Durante el proceso de pirólisis, la temperatura y la presión mantienen una correlación estrecha; esto es, a mayor temperatura, se genera una mayor presión en el reactor y, por ende, se genera un mayor volumen de productos (Guevara, 2019).

2.2.4.3. Tiempo de residencia

Como el tiempo de permanencia determina la clase de reactor a emplear para que el proceso se efectuó de manera normal y los productos a comprar, está directamente vinculado con los productos a adquirir (Guevara, 2019).

2.2.4.4. Tipo de plástico

El tipo empleado en procesamiento es esencial, ya que determina el tipo de producto que se generarán (Guevara, 2019).

2.2.5. Combustibles

Se considera combustible cualquier material que pueda convertir su contenido energético en trabajo y emitir o liberar energía mediante ignición controlada (energía química) o escisión nuclear (energía nuclear). También se refiere a cualquier material que, en circunstancias específicas, puede arder (requerirá comburente y energía de activación (Martinez & Rugeles, 2022).

En base a estado físico, se clasifica en:

Sólido: carbón.

Líquidos: Petróleo y sus derivados



Gases: productos volátiles a la atmósfera.

Sin embargo, Martunis (2019) los categorizan como fuel oil, diesel oil, antracita, lignito, carbón vegetal, fibra textil, hulla y residuos vegetales.

2.2.5.1. Características del combustible:

Según Kalargaris y Tian (2017), el poder calorífico se refiere a la cantidad de calor que puede producir un kg, o un m³, de combustible que puede generar cuando se oxida totalmente.

El vapor de agua será completamente condensable debido a su alta separación de calor, lo que implica que la totalidad de componentes de combustión, incluyendo el combustible y el aire, se mantienen a 0 °C y que productos o gases se transportan a la misma temperatura tras combustión. No obstante, la menor potencia calorífica implica que vapor de agua de gases de combustión no se condensa, lo que implica que solo se podrá aprovechar el calor de oxidación del combustible y no existirá una contribución adicional de calor empleando condensación de vapor de agua (Palmay & Vargas, 2021).

La viscosidad de combustible afecta directamente a procesos de inyección y atomización; un valor más elevado de esta característica resulta un incremento de las tensiones mecánicas y una disminución del desempeño de la atomización. La viscosidad se refiere a la capacidad de flujo que muestra fluido bajo acción de gravedad (Maqsood, 2021).

La densidad, que es la diferencia entre densidad de combustible y densidad de agua en circunstancias de referencia, se expresa frecuentemente como gravedad específica. Mientras que los valores bajos



incluyen niveles mínimos de partículas, un aumento de este valor supondría un consumo significativo de combustible (Lange, 2018).

En circunstancias controladas de laboratorio, la propensión del combustible a combinarse con el aire para generar una mezcla combustible se mide por la temperatura de inflamación, también denominada como medida de inflamación. Los contaminantes del combustible, concretamente los residuos de etanol o metanol residual, pueden ser la causa del cambio de esta característica (Martunis, Winanda, & Harahap, 2019).

Número de cetano de forma similar a como el octano se relaciona con la gasolina, el cetano está vinculado al diésel. Como resultado, en un motor, cuanto mayor sea la cantidad de cetano, inferior será la distancia entre administración y combustión (Martunis, Winanda, & Harahap, 2019).

2.3. Marco normativo

a) Ley N° 1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Reconoce valorización de desechos mediante tecnologías como el reciclaje mecánico, químico y térmico (incluyendo la pirólisis).

b) Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM – Reglamento de Ley N.º 1278

Regula el uso de tecnologías que transformen desechos en insumos o energía. Obliga a poseer Instrumento de Gestión Ambiental (IGA).

c) Ley N° 28611 – Ley General de Ambiente

Establece el derecho a un entorno sano y regula los impactos ambientales de toda actividad industrial.



ISO 18283 – Plásticos:

Métodos de pirólisis para el análisis de composición

ASTM D7544

Estándar para combustibles derivados de residuos plásticos

Ley N° 28832 - Ley para Asegurar Desarrollo Eficiente de Energía

Reglamento de Comercialización de Combustibles Líquidos Supervisado por OSINERGMIN.

Se aplica si el producto se destina a uso o venta como combustible.

Normas Técnicas de INACAL

Control de calidad de combustibles, residuos peligrosos y seguridad industrial.

2.4. Marco conceptual

La basura plástica puede convertirse en productos útiles, incluidos combustibles líquidos, gases combustibles y residuos sólidos carbonosos, mediante un proceso termoquímico denominado pirólisis, que consiste en calentar los materiales plásticos a altas temperaturas sin oxígeno. A la luz de lo anterior, a continuación, se ofrecen algunas definiciones. Esta técnica permite la valorización energética de la basura plástica que no puede ser reciclada mecánicamente, reduciendo la contaminación ambiental y generando fuentes alternativas de energía.

d) Plástico

Los polímeros, que son largas cadenas de moléculas formadas por carbono e hidrógeno, son el principal componente del plástico, una sustancia sintética o



semisintética. El plástico es increíblemente adaptable porque estos polímeros pueden moldearse bajo presión y calor en una amplia gama de formas y texturas (Guevara, 2019).

e) Pirolisis

Es la acción por el cual las moléculas orgánicas se descomponen térmicamente sin oxígeno o con muy poco oxígeno. En este procedimiento se utilizan altas temperaturas, a menudo superiores a 400 °C, para descomponer los compuestos químicos en moléculas más pequeñas. Este proceso produce restos sólidos como carbón o cenizas, líquidos como alquitrán, gasolina o aceites, y gases (Palmay & Vargas, 2021).

f) Temperatura de reacción

Dependiendo de las resinas termosensibles, el proceso de pirólisis propiamente dicho comienza a 300°C. Sin embargo, dependiendo de la temperatura a la que se examine la reacción, los porcentajes de productos gaseosos, líquidos y sólidos pueden ser inferiores (Yadav, 2023).

g) Condensación

Es la etapa en que los productos gaseosos producidos por la desintegración cálida de los materiales se enfrían y pasan de la forma gaseosa a la líquida. Para recuperar aceites o líquidos del proceso, esta etapa es esencial (Sálazar, Ochoa, Virreira, & Trigo, 2023).

h) Rendimiento de reacción de pirólisis

Hace referencia a la cantidad o proporción de gases, líquidos y sólidos generados a partir de la sustancia inicial sometida a pirólisis. El cálculo de este



rendimiento, que suele darse en forma de porcentaje, consiste en dividir la masa de los productos finales por la masa del material inicial y multiplicar el resultado por 100 (Afanador, Bonilla, Kafarov, León y Carreño, 2022).

i) Reactor

Es un dispositivo que altera las características de la materia biológica mediante la aplicación de energía térmica para determinar su potencial calorífico (Martínez & Rugeles, 2022).

j) Catalizador

Es un material que puede introducirse en una reacción para acelerarla sin que se consuma (Delgado & Kurinthy, 2019).

k) Producto obtenido de la pirólisis

Los combustibles en estado sólido (pirocarbón), líquido y gaseoso son los subproductos bien conocidos de la pirólisis de plásticos. El líquido producido por pirólisis se denomina a veces aceite de plástico o combustible de hidrocarburo, dependiendo de su composición física y química.

l) Combustibles

Son materiales que liberan energía en forma de calor durante una reacción de combustión con oxígeno. Las aplicaciones de esta energía incluyen la estufa, la producción de energía y la operación de motores (Jordán y Zurita, 2018).



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION

3.1. Diseño de estudio

Dado que la variable independiente no será modificada intencionalmente, el diseño de estudio para este proyecto es de naturaleza NO EXPERIMENTAL (Hernández & Fernández, 2014).

3.2. Tipo de la estudio

Debido a que aportes conducen a un mejor conocimiento de un tema de la realidad que compete al estudio de una específica disciplina, el tipo de investigación para este proyecto en particular es carácter APLICATIVO (Hernández & Fernández 2015).

3.3. Nivel de estudio

El nivel es **DESCRIPTIVO** es un tipo de estudio que tiene como objetivo caracterizar, detallar y analizar fenómenos, situaciones o procesos sin manipular variables (Hernández & Mendoza, 2018).

3.4. Enfoque de estudio



El método es con el fin de proporcionar hallazgos objetivos asimismo demostrable, enfoque de investigación CUANTITATIVO se predica de recogida, análisis e igualmente presentación de información numérica (Hernández & Mendoza, 2018).

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

Según Hernández y Fernández (2014), es un conjunto de individuos, cosas asimismo otros elementos que poseen en común un conglomerado de particularidades.

Así, la basura plástica producida diariamente en la ciudad de Juliaca sirve como muestra representativa de las personas objeto de este estudio.

3.5.2. Muestra

Es "un segmento de una población considerado como su representación", de acuerdo con Córdova (2018).

Por conveniencia del investigador, se ha tomado en consideración un muestreo no probabilístico; previo a ello, la muestra investigada consistió en 300 kg de basura plástica producida en Juliaca.

3.6. Técnicas e instrumentos de recogida de información

3.6.1. Técnicas

Los procesos y métodos empleados para recopilar, examinar asimismo analizar los datos de un estudio se conocen como metodologías de investigación (Hernández y Fernández, 2014).

- Revisión de la literatura
- Observacional

3.6.2. Instrumentos

Los instrumentos son recursos o medios específicos que se emplean para recolectar datos en un estudio (Hernandez & Fernandez, 2014).

- Software Solidworks Cad

3.7. Materiales y equipos

a) Materiales

- ✓ Materiales de escritorio
- ✓ Software Solidworks Cad

b) Equipos

- ✓ Cámara digital
- ✓ Laptop
- ✓ Impresora

3.8. Localización de zona en análisis

La zona en análisis se encuentra localizada en Juliaca, perteneciente a jurisdicción del distrito de Juliaca, provincia de San Román – Puno; situada en coordenadas geográficas latitud: 15°29'22.20"S, Longitud 70° 8'4.20"O a la altitud de 3830 m.s.n.m.

3.9. Procedimiento metodológico

3.9.1. Determinar las particularidades de desechos plásticos originados en la ciudad de Juliaca.

La municipalidad de Juliaca, encargada de los desechos sólidos en la ciudad, fue el primer lugar que visitamos para recabar información con el fin de desarrollar este objetivo. Allí solicitamos un análisis de determinación de desechos sólidos para conocer con precisión cantidad

de desechos plásticos producidos en la ciudad, así como los tipos de plástico generados.

Para verificar que los plásticos se producen mayoritariamente en la ciudad, se realizó a continuación una visita de campo al vertedero de Juliaca.

3.9.2. Diseñar el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina.

Flujo de trabajo de la miniplanta de pirólisis de plásticos

El flujo de trabajo de la miniplanta de pirólisis propuesta comprende una secuencia de operaciones orientadas a transformar residuos plásticos en combustibles líquidos, gaseosos y sólidos. Este proceso incluye etapas de preparación del material, conversión térmica y recuperación de productos, permitiendo un aprovechamiento energético eficiente de desechos plásticos generados en Juliaca.

El flujo de trabajo se detalla a continuación:

a) Recogida y categorización de desechos plásticos

Los residuos plásticos son recogidos y categorizados según tipo (PE, PP, PS).

Se descartan materiales no aptos para pirólisis como PVC y plásticos contaminados con metales o humedad excesiva.

b) Trituración del plástico



El plástico seleccionado se tritura hasta obtener piezas pequeñas (10–20 mm), con el fin de:

- Aumentar la superficie de contacto
- Optimizar transferencia de calor dentro del reactor
- Asegurar una descomposición térmica uniforme

c) Carga del material en el reactor

El plástico triturado se introduce manual o mecánicamente en el reactor, con una capacidad máxima de 300 kg por lote.

El reactor se sella herméticamente para evitar entrada de oxígeno.

d) Calentamiento y proceso de pirólisis

El reactor se calienta externamente mediante resistencias eléctricas o gas, alcanzando la temperatura óptima de 550 °C.

Durante la pirólisis:

- El plástico se descompone en vapores hidrocarbonados
- Se genera gas no condensable
- Se produce un residuo sólido (char)
- Tiempo de residencia: 2–3 horas por lote.

e) Transporte de vapores al sistema de condensación

Los vapores generados fluyen a través de tuberías hacia el condensador.

Este flujo se produce por diferencia de presión y por la expansión térmica de los gases.



f) Condensación y obtención de combustible líquido

En el condensador, los vapores se enfrían a 30–40 °C, convirtiéndose en fracción líquida similar a gasolina.

La eficiencia del sistema de condensación es del 60–65 %, dependiendo del caudal y la temperatura de agua de enfriamiento.

g) Almacenamiento del combustible líquido

El combustible obtenido se acumula en un tanque de almacenamiento, donde puede ser filtrado o decantado según necesidad.

h) Manejo de subproductos

Gas no condensable: Puede reutilizarse como combustible para el calentamiento del reactor.

Char: Se retira del fondo del reactor y puede emplearse como aditivo carbonoso en procesos industriales.

i) Limpieza y preparación para un nuevo ciclo

Una vez finalizado el lote, el reactor se limpia, se evacuan los residuos y se prepara la siguiente carga de plástico.

Para el alcanzar este objetivo se implementaron los siguientes métodos mencionados por Bosa, Torres, & Soler (2024), las cuales se detallan a continuación:

Para que el reactor se caliente y logre las temperaturas necesarias, se elaboraron madera y una malla metálica de combustión continua.



El diseño del prototipo busca su formación compacta, de modo que se pueda montar a escala real y se garantice la facilidad de instalación y colocación. Debe colocarse en una zona preferiblemente abierta o con ventilación por combustión, de forma parecida a las condiciones que pueden darse en una cocina urbana grande o mediana.

Por último, se utilizó el software Solidworks Cad para construir el reactor de pirólisis. Con la ayuda de esta herramienta de automatización del diseño mecánico, los diseñadores pueden esbozar conceptos rápidamente y luego experimentar con características y proporciones para crear modelos y dibujos intrincados.

3.9.3. Determinar factibilidad económica de prototipo de pirolisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en gasolina.

Tras tener en cuenta los gastos fijos y variables en relación con los costes de venta del combustible, se evaluó la viabilidad del reactor de pirólisis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Resultados

4.1.1. Determinar las características de residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca.

Generación de desechos sólidos per cápita en Juliaca se puede observar en el Cuadro 8, con generación per cápita 2024 de 0,62 kg/Hab/día.

Tabla 8

Generación per cápita de desechos sólidos de Juliaca

Nº vivienda	Nº habitantes	PESO DE DESECHOS SÓLIDOS							GPC kg/hab/día.
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
1	5	1.48	1.6	1.08	0.48	1.32	1.68	3.44	0.32
2	4	1.6	0	0.56	0	0.54	0	0.6	0.2
3	3	2.08	0.56	0.32	0.8	0.64	0.64	0	0.28
4	4	0.02	0.24	0.72	0	0	0.64	0	0.1
5	3	1.72	1.68	1.6	2.28	0	0.08	0	0.5
6	2	0	3.36	1.04	3	0.92	1.04	0	0.94



7	4	5.56	2.76	2.84	2.4	2.12	0.2	0.84	0.6
8	3	0	0	0	1.08	0.28	0.24	12.92	1.22
9	6	1.82	0	1.06	0.02	0.48	2.54	0	0.2
10	2	0	0.6	0.48	0	0.2	0.48	1.16	0.3
11	2	0	0	0	0	0	0	0	0
12	4	0	5	1.56	0	1.32	0	2.96	0.68
13	2	0.4	2.24	0.76	0.64	0	0.76	2.56	0.62
14	5	2.84	12.44	2.52	3	0.24	2.96	1.84	0.74
15	5	3.28	1.96	0.92	0.28	0.48	0	1.68	0.28
16	2	0.76	0.44	0.56	0.36	0.6	1.48	1.2	0.38
17	2	0	2.04	1.88	0	0.28	0	1.02	0.66
18	3	2.6	0	2.18	2	0	2.4	0	0.76
19	5	4.2	0	0.28	1.94	0.46	0	1.22	0.32
20	3	2.68	0	0	1.84	2.04	5.08	0	0.98
21	3	0.32	0.16	2.68	3.4	0.88	0	0.24	0.42
22	1	2.04	0	4.4	3.04	0.64	0	0	2.54
23	2	0	1.12	0.48	1.52	1.36	0	0.4	0.48
24	3	0.48	1.2	0	0.48	1.52	0	0	0.3
25	2	0.02	0	4.44	0	0.84	0	2.06	0.92
26	3	2.56	1.72	0.96	1	0.4	0	0	0.44
27	2	0	0	0.76	0	0.6	0.76	0.76	0.36
28	4	0.02	0.48	0	0.64	0.52	0.32	0	0.1
29	2	0.02	0	1	0	0	0	0	0.26
30	4	4.56	6.48	1.08	1.64	1.44	1.96	1.88	0.68
31	3	1.8	0.64	0.72	0.96	1.12	0.24	0.56	0.28
32	4	0.02	1.32	0	1	0.68	0	0	0.18
33	5	1.08	0	1.44	0.2	0.52	0	3.16	0.26
34	2	0.02	1.34	0	1.08	0	2.42	0	0.6
35	4	1.88	0.68	0.44	1.28	0.44	0	0	0.24
36	3	0.02	0	1.2	1.96	0	0.76	0	0.32
37	3	0	9.12	4.04	2.8	7.16	3.92	0	1.8
38	3	1.24	0	3.6	1.18	1.12	0	0	0.6
39	3	0.52	0	0	1.04	1.64	1.32	0.88	0.46
40	3	0.02	0	1.64	0	2.4	0.82	0	0.4
41	4	0	1.52	0.44	0.56	1.64	0	0	0.26
42	6	2.56	0	6.8	0	3.92	2.88	10.6	0.9
43	2	1.12	2.92	4.44	3.2	0	2.52	1.28	1.3
44	5	1.72	0.84	0	1.22	0.74	0	1.24	0.24
45	8	5.36	0	1	1.4	0.68	0.52	1.12	0.22
46	5	0	6.12	0	0.84	3.24	1.72	0	0.6
47	2	2.72	0.56	4.28	6.24	9.24	0.44	0	1.96
48	7	6.16	2.24	0	3.16	1.12	0	3.56	0.46
49	3	7.04	1.24	2	0.68	0	1.08	1.04	0.72
50	2	0.28	0.24	1	0	0	1.56	2.12	0.52



51	4	2.6	0	0.96	2.8	1.24	8.48	0	0.8
52	6	5	1.12	0	2.12	0	1.72	0.54	0.36
53	4	2.32	1.24	1.76	0	2.48	0.64	0	0.42
54	10	0.16	3.8	2.68	2.4	4.08	0	5.68	0.32
55	2	0.02	0	0	1.66	0	0	0	0.42
56	1	0.02	0.76	1.28	1.84	0	0	0	0.98
57	7	1.04	0.52	0	1.22	0.92	0.16	0	0.12
58	6	2	1.76	2.76	1.12	0.64	0	2.32	0.3
59	2	1.48	1	1.24	0.4	1.8	4.56	0.72	0.8
60	4	4	2.88	3.04	4.28	2.24	1.76	1.4	0.7
61	3	1.92	0	0.84	0	1.16	0	2.92	0.58
62	1	0	1.1	2.4	0	1.76	9.84	3.52	3.72
63	4	0	0.46	0.24	0	0.32	1.06	0	0.14
64	3	2.52	0.52	1.4	1.8	0.96	1.96	0.96	0.48
65	2	0	0.88	0	1.24	1	1.62	0	0.6
66	1	0.84	0.92	0.76	0.4	1.96	0.48	0.72	0.86
67	2	9	0.72	2.36	3.04	4.08	0	2.08	1.78
68	5	0	1.34	0.5	0.68	0	1.64	2.6	0.28
69	3	0.02	0	2.52	1.6	2.1	0	0	0.52
70	3	3.08	0	1.68	0	5.28	2.22	0	1.02
71	5	0.12	2.16	0	0.02	1.96	2.46	0	0.26
72	7	0	0	0.84	0	1.76	0.32	0	0.14
73	5	0	1.76	0.56	1.08	3.6	0.44	0	0.3
74	2	2.62	0	0.52	1.32	0.36	0	0.16	0.5
75	5	1.08	0.72	1	1.84	1.28	0	0	0.24
76	3	0.36	0.84	0.32	0.2	0.84	1.24	0	0.22
77	2	0	0	0.32	0.02	0.08	0	0.12	0.06
78	4	1.96	1.26	0.84	0	0	0.94	0.42	0.28
79	1	0.64	0	1.96	0	0.52	0	0.36	0.88
80	2	0	0.72	0	3.16	0.68	1.12	0	0.72
81	4	0	0.44	0	0.48	0.56	0.2	0	0.1
82	4	3.22	1.08	0	0.72	1.22	0	0	0.4
83	2	2.12	0	2.56	0	1.84	1.36	0	0.98
84	5	1.28	0.8	0	1.48	2.96	0	0	0.32
85	3	0.92	1.96	3.4	0	2.84	0	0	0.76
86	4	0	0	0	0	0	0	0	0
87	4	4.48	0	3.52	0.24	0.52	0	0	0.54
88	5	0.96	6.52	0	0.72	1.48	0	0.36	0.4
89	1	2.3	0	0.02	0.42	0	0.92	0	0.92
90	5	0	0	0	1.66	0	0	0	0.34
91	3	3.64	3.2	3.84	0	1.18	2.6	0	0.96
92	4	0.24	0.94	0.16	0	1.12	0	1.34	0.2
93	5	2.7	0.28	0.08	0.32	0.12	1.64	0.4	0.16
94	3	2.26	1.24	2.84	3.16	0	0.56	0	0.68



95	1	1.16	1.52	1.28	0	0.94	0.48	0	1.08
96	2	2.5	0	1.4	0	0.52	0	0.44	0.6
97	2	0	0	1.56	0.56	0	0.6	0	0.46
98	2	0	0	0.44	0.72	0.44	1.72	1.76	0.5
99	1	3.12	1.72	0	0.54	0	0	0	1.8
100	2	0	1.16	0	0.7	0	0.82	5.36	1
101	1	0	1.04	0	3.24	1.96	2.4	0	2.16
102	5	0	0	0	0	0	0	0	0
103	2	0	0.68	0.8	0.36	0	0.88	0.64	0.34
104	1	0	0.68	0	2.4	1.76	0	1.64	1.62
105	1	0	0	7.18	5.68	4.6	0.72	0	4.54
106	2	0	2.36	2.04	1.24	0	1.76	0	0.92
107	5	0.92	0.4	2.44	0.2	0.92	0	0.64	0.18
108	4	0	0	1.2	0	0	1.22	0	0.3
109	5	1.8	2.32	1.6	1.08	0	0	0	0.34
110	1	1.64	1.14	0	1.08	1.24	1.58	0	1.34
111	3	0	0	0	0	0.9	0	0	0.3
112	4	0	1.66	0.7	0.42	1.96	0	2.48	0.36
113	4	0	2.12	1.68	3.04	5.28	2.2	2.4	0.7
GENERACIÓN PER-CÁPITA TOTAL									0.62

PP-Poliestireno (6), PVC-Poliestireno Policlorado (6), HDPE-Polietileno Alta Densidad, LDPE-Polietileno de Baja Densidad, y 11,09% residuos plásticos conforman los desechos sólidos de la ciudad de Juliaca, los cuales están compuestos por 39,39% de residuos orgánicos, 37,03% de residuos no reutilizables, y 23,56% de residuos inorgánicos, según tabla 9. El 9% está compuesto por basura plástica, que incluye HDPE (polietileno alta densidad), LDPE (polietileno baja densidad), PP (poliestireno (6) asimismo PVC (cloruro de vinilo). Cada forma de plástico puede recuperarse y utilizarse para fabricar combustibles alternativos, como gasolina líquida, mediante pirólisis.



Tabla 9

Composición de desechos sólidos de la ciudad de Juliaca

Clase de desecho sólido	Composición porcentaje
1. Residuos aprovechables	62.97%
1.1. Residuos orgánicos	39.39%
Residuos de alimentos (restos comida, cáscaras, restos frutas, verduras, hortalizas y otros semejantes)	33.71%
Residuos maleza y poda (restos flores, hojas, tallos, grass, otros semejantes)	1.19%
Otros orgánicos (estiércol animales menores, huesos y semejantes)	4.49%
1.2. Residuos inorgánicos	23.56%
1.2.1. Papel	1.37%
Blanco	0.81%
Periódico	0.18%
Mixto (páginas cuadernos, revistas, otros semejantes)	0.38%
1.2.2. Cartón	4.90%
Blanco (liso y cartulina)	2.14%
Marrón (Corrugado)	2.69%
Mixto (tapas cuaderno, revistas, otros semejantes)	0.07%
1.2.3 Vidrio	1.13%
Transparente	0.59%
Otros colores (marrón-ámbar, verde, azul, entre otros)	0.40%
Otros (vidrio ventana)	0.14%
1.2.4. Plástico	11.09%
PET-Tereftalato de polietileno (1) (aceite y botellas de bebidas y agua, otros semejantes)	4.89%
PEAD-Polietileno de alta densidad (2) (botellas lácteos, detergente líquido, shampoo, suavizante)	0.84%
PEBD-Polietileno de baja densidad (4) (empaques alimentos, empaques plástico papel higiénico, empaques detergente, empaque film)	2.37%
PP-Poliestireno (6) (tapas cristalinas Cds, micas, vasos yogurt, cubetas helado, envases lavavajilla)	1.75%
PVC-Policloruro de vinilo (3) (Tuberías agua, desagüe y eléctricas)	1.24%
1.2.5. Tetra brik (envases multicapa)	0.00%
1.2.6. Metales	5.07%
Latas-hojalata (latas de leche, atún, entre otros)	2.94%
Acero	0.00%



Fierro	1.69%
Aluminio	0.34%
Otros Metales	0.10%
1.2.7. Textiles	0.00%
1.2.8. Caucho sintético	0.36%
2. Residuos no re-aprovechables	37.03%
Bolsas plásticas de un único uso	6.92%
Residuos sanitarios (Papel higiénico/Toallas sanitarias Pañales, deposiciones de mascotas)	10.22%
Pilas	1.76%
Tecnopor (poliestireno expandido)	0.35%
Desechos inertes	11.88%
Restos medicamentos	0.99%
Envolturas snack, galletas, caramelos, entre otros	0.92%
Otros desechos no categorizados.	3.99%
TOTAL	100.00%

Las particularidades de los desechos de plásticos producidos en Juliaca se muestran en la Tabla 10, donde 398,25 kg equivalen a residuos de PET-Tereftalato de Polietileno (1) (botellas de aceite, bebidas, agua, entre otros similares); 327,48 kg equivalen a residuos de HDPE-Polietileno de Alta Densidad (2) (botellas de lácteos, detergente líquido, champú, suavizante); 282. kg equivalen a residuos de LDPE-Polietileno de Baja Densidad (3) (envases de alimentos, envases plásticos papel higiénico, envases detergente, envases de film). 31 kg equivalen a residuos de PEBD-Polietileno de Baja Densidad (4) (envases alimentarios, envases plástico papel higiénico, envases de detergente, envases de film); 286,82 kg equivalen a residuos de PP-Poliestireno (6) (tapas de CD cristalinas, mica, tarrinas helado, vasos de yogur, recipientes de lavavajillas, etc.); y, por último, 356,83 kg equivalen a residuos de PVC-Policloruro de Vinilo (3) (tuberías de agua, desagüe y eléctricas).

Tabla 10*Características de desechos plásticos originados en Juliaca*

Descripción	Cantidad (kg)	Cantidad (%)
PET-Tereftalato de polietileno (1) (aceite y botellas de bebidas y agua, entre otros similares)	398.25	24.11%
PEAD-Polietileno de alta densidad (2) (botellas de lácteos, shampoo, detergente líquido, suavizante)	327.48	19.83%
PEBD-Polietileno de baja densidad (4) (empaques de alimentos, empaques de plástico de papel higiénico, empaques de detergente, empaque film)	282.31	17.09%
PP-Poliestireno (6) (tapas cristalinas de Cds, micas, vasos de yogurt, cubetas de helado, envases de lavavajilla)	286.82	17.37%
PVC-Policloruro de vinilo (3) (Tuberías de agua, desagüe y eléctricas)	356.83	21.60%
TOTAL	1651.69	100%

Parámetros de la miniplanta de pirólisis

Los parámetros de diseño y operación de la miniplanta de pirólisis fueron establecidos considerando la naturaleza de desechos plásticos disponibles en Juliaca, además de criterios termodinámicos, de transferencia de calor y de eficiencia energética. Estos parámetros permiten garantizar la descomposición térmica adecuada del material y la obtención de combustible líquido en condiciones controladas.

a) Parámetros de operación

Temperatura de pirólisis: 550 °C, identificada como la temperatura óptima para maximizar la producción de fracción líquida según estudios previos.



Presión de trabajo: Presión atmosférica.

Tiempo de residencia: 2 a 3 horas por lote de producción.

Velocidad de calentamiento: Entre 10 y 20 °C/min.

Cantidad de plástico a procesar: 300 kg de plástico triturado por lote.

b) Parámetros del reactor

Tipo de reactor: Cilíndrico vertical.

Material: Acero inoxidable AISI 304, resistente a corrosión y temperaturas superiores a 600 °C.

Volumen útil: 0.33 m³.

Diámetro: 0.648 m.

Altura: 1.00 m.

Espesor de pared: 3.048 mm.

Sistema de calentamiento: Externo mediante resistencias eléctricas o quemador a gas.

c) Parámetros del sistema de condensación

Configuración: Condensador tipo serpentín.

Temperatura de salida: 30 a 40 °C.

Método de intercambio térmico: Enfriamiento indirecto por agua.

Eficiencia del sistema de condensación: 60 a 65 %.



d) Parámetros del proceso de conversión

Rendimiento esperado de combustible líquido: 50 a 60 % del peso del plástico alimentado.

Rendimiento de gas no condensable: 20 a 25 %.

Rendimiento de char: 10 a 15 %.

Eficiencia térmica global estimada: 70 a 80 %.

e) Parámetros energéticos

Poder calorífico del plástico (PE/PP): 40 a 46 MJ/kg.

Requerimiento energético del reactor: Entre 8 y 12 kWh por lote.

Aprovechamiento energético: El gas pirolítico puede emplearse como combustible complementario para el calentamiento del reactor.

4.1.2. Dimensionar prototipo de reactor de pirolisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en combustible líquido.

En el primer caso, se determinaron las características principales del aparato y la disposición de cada uno de los componentes que constituyen el sistema. Por consiguiente; se eligió un material que satisficiera las necesidades particulares del proceso, tomando en consideración grados de temperatura a los que se efectúa y propiedades de resistencia a corrosión que debía alcanzar material de partes que se encuentran en contacto con biomasa o gas originado.

Selección del material: Se estableció que el acero inoxidable es el material más adecuado para la edificación del reactor debido a los requisitos



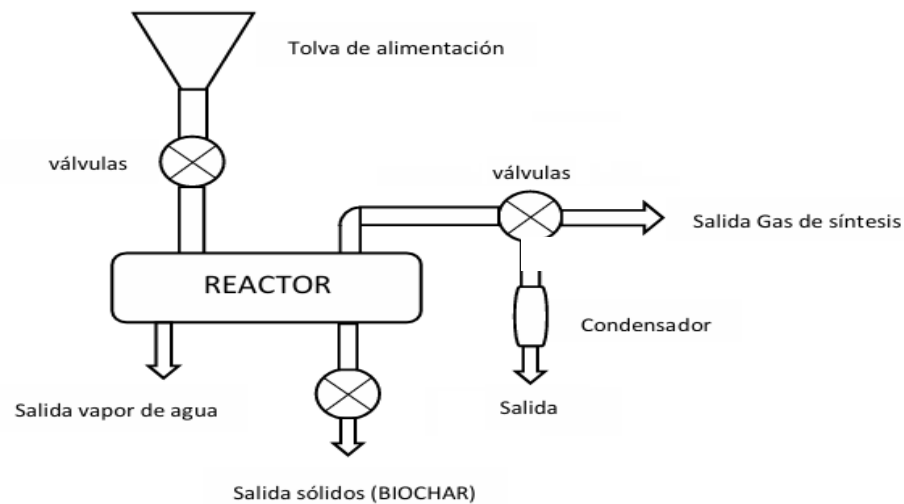
inherentes al proceso. Esta aleación de hierro, que tiene un nivel de cromo de al menos el 10,5% y un contenido de carbono inferior al 1,2%, es necesaria para garantizar una capa pasiva una capa protectora superficial autorregenerable que resista la corrosión. Los aceros inoxidable ferríticos, martensíticos y austeníticos son los tres tipos que se utilizan con más frecuencia por su diversa gama de cualidades.

El acero inoxidable austenítico de tipo 304 es el más empleado; otras variedades de aceros austeníticos se fabrican rebajando o añadiendo componentes que alteran la composición química del producto. Estos procedimientos pueden emplearse para aumentar las cualidades mecánicas del material, su soldabilidad, su capacidad frente a la corrosión y su resistencia a las elevadas temperaturas. El material utilizado debía ser resistente a corrosión y temperaturas altas. El acero inoxidable de tipo 304 se combinó con Cr y Ni para crear los tipos 309, 309S, 310 y 310S, que tienen estas características.

El acero inoxidable 310S es el material escogido para los componentes del equipo que se presenten expuestos a altas temperaturas y que interactúan con la biomasa. Este tipo de acero ofrece la mayor eficiencia, resistencia a corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.

Figura 4

Modelo del reactor de pirolisis a diseñar



Zona de alimentación del reactor-. para el cálculo de la zona de alimentación, se realiza mediante el cálculo volumétrico, la cual se obtiene dividiendo la capacidad del reactor entre la densidad aparente del material:

$$V_f = \frac{m_r}{\rho}$$

Donde:

V_f : Caudal volumétrico de alimentación [m³/h]

m_r : Flujo másico requerido por el reactor [kg/h]

ρ : Densidad aparente del material [900kg/m³]

Indicando que la cantidad de desechos plásticos derivados en la ciudad de Juliaca es de 1651.69kg, sin embargo, para efectos del diseño se empleará una cantidad de 300kg de residuos plásticos; por ende, el flujo por 8 horas de trabajo será 34.5kg/hora de residuos plásticos.



Reemplazando:

$$V_f = \frac{37.5}{900}$$

$$V_f = 0.042 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tolva de alimentación- La tolva debe almacenar suficiente material para garantizar un flujo constante. Se dimensiona considerando:

$$V_{tolva} = V_f * t_{reserva}$$

Donde:

$t_{reserva}$: Tiempo de operación sin recarga [8horas]

Reemplazando:

$$V_{tolva} = 0.042 * 8$$

$$V_{tolva} = 0.336 \text{ m}^3$$

Cálculo del transportador o alimentador- El tipo de transportador depende del material; en este caso será de material granulado, por ello es recomendable un tornillo sin fin; para ello el flujo volumétrico será:

$$Q = A * v$$

Donde:

Q : Flujo volumétrico [m³/s]

A : Área de sección de tornillo [m²]

v : Velocidad de giro [m/s]

El área del tornillo se obtiene con:

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

En este caso se usará un tornillo de 20 cm de diámetro (D=0.2m) con un caudal de 0.042 m³/h (0.0000167m³/s); donde el área será de:

$$A = \frac{\pi}{4} * 0.2^2$$

$$A = 0.0314m^2$$

Despejamos la velocidad de giro:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0.0000167}{0.0314}$$

$$v = 0.000532m/s$$

Si el tornillo gira a 30 rpm, la velocidad lineal será de:

$$v = \frac{\pi DN}{60}$$

$$v = \frac{\pi * 0.2 * 30}{60}$$

$$v = 0.31m/s$$

Como $0.31 > 0.000532$, la velocidad es suficiente para el caudal deseado

Figura 5

Modelado tornillo sin fin propuesto





Seguidamente se calcula el volumen del reactor.

Volumen del reactor: Para conocer el volumen tentativo del recipiente del reactor se requiere conocer la densidad de la materia prima (residuos plásticos); siendo en promedio 900kg/m³ (granular).

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

V: Volumen [m³]

m: Masa [300kg de residuos plásticos]

ρ: Densidad [900kg/m³]

Reemplazando:

$$V = \frac{300kg}{900kg/m^3}$$

$$V = 0.33m^3$$

El volumen requerido del reactor será de 0.33m³

Así mismo para lograr **dimensiones** de reactor, utilizó siguiente fórmula para hallar:

$$V = A * h$$

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

En la cual:

A: Área base de reactor [m²]

h: Altura de reactor [1m]

d: Diámetro del reactor [m]

Reemplazando:

$$0.33 = \frac{\pi * d^2}{4} * 1$$

$$d = 0.648m = 64.80cm$$

Estos datos recolectados nos proporcionan una mejor visión del tamaño que debe tener el reactor.

$$\text{Volumen} = 0.33m^3$$

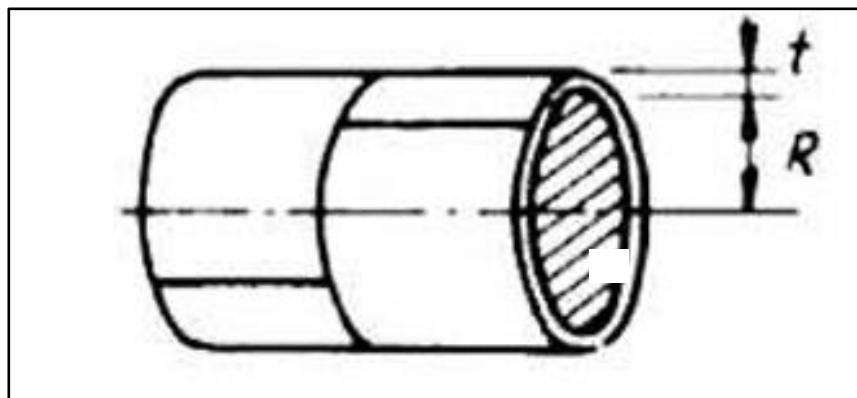
$$\text{Diámetro} = 0.648m$$

$$\text{Altura} = 1.00 m$$

Estructura del cuerpo del reactor: Se utilizan las expresiones para esfuerzos circunferenciales en el diseño del cuerpo cilíndrico de un reactor (Junta longitudinal).

Figura 6

Modelado tornillo sin fin propuesto



En específico para hallar el **espesor de la pared del reactor** se aplicó la siguiente ecuación:

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



Donde:

t: Espesor mínimo de pared. in [mm]

P: Presión interna diseño. Psi [MPa]

R: Radio interno. In [mm]

S: Esfuerzo máximo de material a temperatura requerida. Psi [MPa]

E: Eficiencia de junta.

Despejando:

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

Datos:

El reactor se someterá a una temperatura máxima de 550 °C y a una presión de diseño es 0.3861 MPa, esos valores se detallan en base a Zhang *et al.* (2024), por otro lado, se consideró la junta a tope 100% radiografiado; especificando los datos

$$S = 12,9 \text{ MPa}$$

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

$$E = 1$$

$$H = 300 \text{ mm}$$

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

$$R = 100 \text{ mm.}$$

Reemplazando:

$$t = \frac{0.3861(100)}{12.9(1) - 0.6(0.3861)}$$

$$t = 3.048 \text{ mm}$$



El espesor de la pared del reactor idea, para mantener una presión de 0.3861Mpa, con un máximo esfuerzo de material a temperatura requerida es 3.048mm Después de estimado espesor ideal, se agregará coeficiente de seguridad para que reactor no se halle trabajando a límite (100%) asimismo brindar sobre espesor de corrosión, efectos climáticos, erosión, etc. Factor que se recomienda entre 5 a 10% como máximo espesor estimado; por lo cual espesor real es:

$$tr = 1.1(t)$$

$$tr = 1.1(3.048)$$

$$tr = 3.353mm$$

Entonces el espesor nominal será de 3.353mm, para efectos de materiales comerciales se asume un espesor real de 4mm. Ante ello presión máxima de trabajo se determino empleando ecuación.

$$P = SEt R + 0.6t$$

$$P = 12.9(1)(4) 100 + 0.6(4)$$

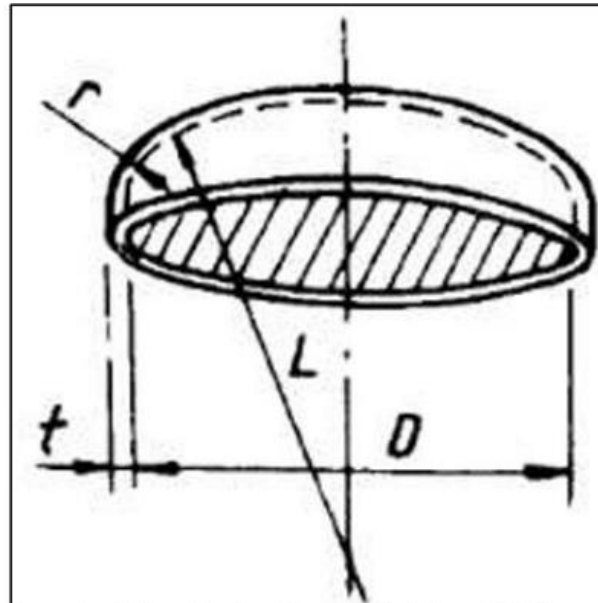
$$P = 0.503Mpa$$

Presión máxima de trabajo es 0.503Mpa

Diseño de las tapas: Para efectos del análisis s tomará en consideración tapas toriesférica asimismo plana; que se localiza en parte superior empleando junta bridada, la vinculación se halla dada por:

Figura 7

Diseño de tapa toriesférica



Fuente: Obtenido de (Rana y Kalnins, 2000)

Condiciones diseño:

Para análisis se debe tomar en consideración:

L: radio interior de corona (no debe ser superior a diámetro) [mm]

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

M: factor de forma de domo toriesférico

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

$$t_{toriesf} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$$

$$t_{toriesf} = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$$

$$P = \frac{SEt}{0.855L + 0.1t}$$

$$t_{toriesf} = \frac{2SEt}{LM - 0.2t}$$

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

Se va a efectuar diseño con tapas toriesféricas ASME no estándar, ya que espesor es menor a estándar, por lo cual: $L = 175$ mm, debe ser inferior o



equivalente a diámetro interior $D = 200\text{mm}$ Para señalar factor de forma de domo toriesférico M , se efectúa empleando constante correspondiente:

$$M = 1.25$$

$$L/r = 4$$

$$r = 43.75\text{mm}$$

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$$

$$t_{\text{toriesf}} = \frac{0.3861 * 175 * 1.25}{2 * 12.9 * 1 - 0.2 * 0.3861}$$

$$t_{\text{toriesf}} = 3.283\text{MM}$$

Se añade factor de seguridad para ese espesor de 5 hasta 10 % como máximo, por lo cual:

$$tr = 1.1(t_{\text{toriesf}})$$

$$tr = 1.1(3.283)$$

$$tr = 3.611\text{mm}$$

En efecto espesor nominal o estándar es:

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

Presión máxima de trabajo:

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$$

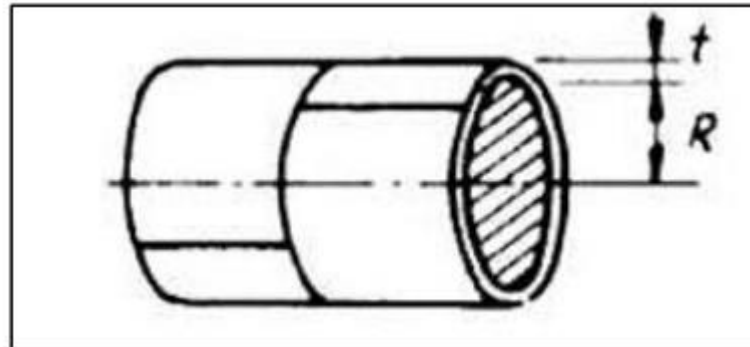
$$P = \frac{2 * 12.9 * 1 * 4}{175 * 1.25 + 0.2 * 4}$$

$$P = 0.47\text{Mpa}$$

Tapa plana- Como tapa plana circular, va a ubicarse en parte superior empleando junta bridada, la vinculación se halla dada por:

Figura 8

Modelo de una tapa plana para el reactor



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

D: Diámetro. in [mm]

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

P: Presión de diseño. Psi [MPa]

S: Esfuerzo máximo de material a temperatura requerida. Psi [MPa]

E: Eficiencia de Junta. Si no se presenta soldaduras longitudinales valor es 1.

t: Espesor de tapa. in [mm]



Datos:

$$S = 12,9 \text{ MPa}$$

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

$$D = 300 \text{ mm}$$

Entonces reemplazando:

$$t = 300 * \sqrt{\frac{0.162 * 0.3861}{12.9 * 1}}$$

$$t = 20.59 \text{ mm}$$

Se añade factor de seguridad de 5 % para ese espesor por efectos de corrosión asimismo circunstancias del ambiente:

$$tr = 21.62 \text{ mm}$$

El espesor nominal será de: 22.00mm

Por lo cual, presión máxima de trabajo es:

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

$$P = \frac{22^2 * 12.9 * 1}{300^2 * 0.162}$$

$$P = 0.964 \text{ Mpa}$$

Diseño de pernos: Se diseñaron pernos de brida principal; y para ello se necesita indicar carga efectuada a pernos, empleando la correspondiente expresión:



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

Donde:

P_i : Presión Interna del recipiente [MPa]

F : Fuerza ejercida sobre los pernos [N]

A : Área Interna del recipiente [mm²]

Datos:

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

$$D = 650\text{mm}$$

Despejamos la fuerza ejercida sobre los pernos

$$F = P_i * A$$

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

$$F = 0,3861 * \frac{\pi * 650^2}{4}$$

$$F = 128119.84\text{K} = 12.81\text{KN}$$

Como recipiente se halla sometido a presión interna, por lo cual empleará análisis a tracción primaria.

Entonces: Se va asumir 6 pernos paso grueso, M14x2 asimismo grado 5.8. Las propiedades y particularidades de pernos que se detallan correspondientemente fueron consideradas de (Dzuhairy et al. 2020).

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

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

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

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



En la cual:

At: Área a tensión [mm²]

p: Paso [mm]

Sp: Resistencia de prueba

Sy: Resistencia a fluencia

La fuerza aplicada a cada perno es:

$$F_i = \frac{F}{\#pernos}$$

$$F_i = \frac{12.81}{6}$$

$$F_i = 2.135KN$$

Como no se presenta tracción secundaria, entonces carga en perno es: ***Fi''=0***

$$P = F_i + F_i''$$

$$P = 2.135KN$$

Se calculó pretensión o precarga de perno, considerando junta reutilizable:

$$F_i = 0.75 * 380 * 115$$

$$F_i = 32775N = 32.775KN$$

Para indicar diámetro menor de perno se efectuó empleando ecuación: ***dr = d***

$$- 1.226869p$$

$$r = 14 - 1.226869 * 2.135$$

$$dr = 11.38mm$$

Correspondientemente, se indica diámetro de paso empleando ecuación: ***dp =***

$$d - 0.649519p$$

$$dp = 14 - 0.649519 * 2.135$$

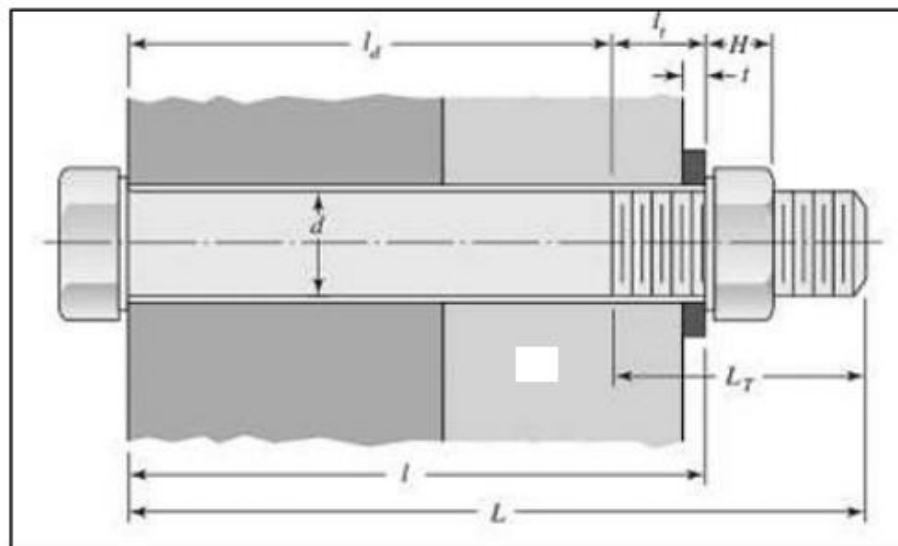
$$dp = 12.61mm$$

Dimensiones del perno- Para conseguir agarre de perno o conexión "I" se suma espesor 2,8 mm de arandela M14 estrecha (Martunis, Winanda y Harahap 2019), la suma de 2 espesores de material y espesor de 2.3 mm de empaque. Se consigue:

$$I = 13.1 \text{ mm}$$

Figura 9

Referencia para indicar rigidez de sujetador



Información de arandela M14:

$$D_{int.} = 15.25 \text{ mm } D$$

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

Se efectúa cálculo de Longitud de sujetador "L"

$H = 9.25 \text{ mm}$; donde H es altura de terna hexagonal. De figura 08 se llega a deducir las correspondientes expresiones:

$$L > I + H$$

$$L > 13.1 + 9.25$$

$$L > 22.35 \text{ mm}$$



$$L = 40mm$$

La longitud roscada se consigue partiendo de ecuación:

$$L_t = 2d + 6mm$$

$$L \leq 125mm$$

$$d \leq 48mm$$

$$L_t = 2(14) + 6mm$$

$$L_t = 34mm$$

$$l_d = L - L_t$$

$$l_d = 40 - 34$$

$$l_d = 6mm$$

Longitud roscada útil:

$$l_t = L - l_d$$

$$l_t = 40 - 6$$

$$l_t = 34mm$$

Rigidez efectiva del perno- Se determina con la siguiente expresión:

$$K_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d I_t + A_t I_d}$$

Dónde:

K_b: Rigidez efectiva de material [MPa.m]

A_t: Área de esfuerzo que se sometió a tensión [mm²]

I_t: Longitud de parte roscada de agarre [mm]

A_d: Área de diámetro mayor de sujetador [mm²]

I_d: Longitud de parte que no posee rosca [mm]

E = 206 GPa



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

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

$$A_d = 153.938mm$$

Entonces:

$$K_b = \frac{153.938 * 115 * 206000}{153.938 * 7.1 + 115 * 6}$$

$$K_b = 2045358.073 MPa. mm$$

$$K_b = 2045.358 MPa. m$$

Cálculo de rigidez de elementos a sujetar.- Primeramente, se determinará el análisis de arandela en km en correspondencia de diámetro exterior de arandela y diámetro de perno como se detalla correspondientemente.

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

$$K_{m1} = \frac{\pi(28^2 - 14^2)207000}{4 * 13.1}$$

$$K_{m1} = 7297368.157MPa. mm$$

$$K_{m1} = 7297368 MPa. m$$

Análisis de empaque:

Easbesto = 480 MPa

Dfinal(emp) = 290 mm

Temp = 2,3 mm

Se indicará área efectiva con correspondiente expresión:



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

Además, se localizó rigidez efectiva del empaque con la expresión:

$$K_{m2} = K_g = \frac{A_g * E_g}{t}$$

$$K_{m2} = \frac{5618.738 * 480}{2.3}$$

$$K_{m2} = 1172606.191MPa.mm$$

$$K_{m2} = 1172.606MPa.m$$

La rigidez combinada de junta con empaque es:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_{m1}} + \frac{1}{K_{m3}}$$

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{7297.368} + \frac{1}{1172.606}$$

$$K_m = 1010.267Mpa.m$$

Por lo cual, la constante de rigidez de junta se halla indicada por ecuación:

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$$

$$C = \frac{2045.358}{2045.358 + 1010.267}$$

$$C = 0.66937$$

Cargas en la junta- La carga que resiste perno

$$P_b = CP$$

$$P_b = 0.66937 * 2.022$$

$$P_b = 1.353KN$$



Carga que resiste material

$$Pm = (1 - C)P$$

$$Pm = (1 - 0.66937)(2.022KN)$$

$$Pm = 0.669KN$$

Carga total en perno

$$Fb = Fi + Pb$$

$$Fb = 32.775KN + 1.353KN$$

$$Fb = 34.128KN$$

Carga total en material

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t}$$

$$\sigma_b = \frac{34128N}{115} * \frac{1000^2}{1}$$

$$\sigma_b = 296.765MPa$$

La carga requerida para separar junta bridada es:

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

$$P_0 = \frac{32775KN}{(1 - 0.66937)}$$

$$P_0 = 99.13KN$$

Para culminar, el factor de seguridad frente a separación de junta es:

$$n_{separacion} = \frac{P_0}{P}$$

$$n_{separacion} = \frac{99.13}{2.022}$$



$$n_{separacion} = 49$$

Pernos de abastecimiento- Para pernos de abastecimiento, se acata el mismo proceso efectuado previamente.

Información:

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

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

En instancia primera, se necesita indicar carga efectuada a pernos, empleando la correspondiente expresión:

$$F = 1805.74$$

Como recipiente se halla sometido a presión interna, entonces se efectuará análisis a tracción primaria. Se llegará a asumir 6 pernos paso grueso, M8x1,25 y grado 5.8. A_t : 36.6 mm²

$$p: 1.25\text{mm}$$

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

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

La fuerza ejecutada a cada perno es:

$$F_i = 284.29\text{N}$$

Como no se presenta tracción secundaria, la carga en un perno es:

$$F_i'': 0$$

$$P = 284.29\text{N}$$

Se va a estimar pretensión o precarga del perno, considerando junta reutilizable:

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



Indicar diámetro menor de perno:

$$dr = 6466mm$$

Correspondientemente, se va establece diámetro de paso:

$$dp = 7188mm$$

Dimensiones del perno- Para conseguir agarre del perno o conexión "I" se efectúa la suma de espesor 2,3 mm de arandela M8 estrecha, suma de 2 espesores de material y espesor de 2.3 mm de empaque. Se consigue:

$$I = 16.6mm$$

Los datos de arandela M14:

$$Dint = 8,9 mm$$

$$Dext = 18,8 mm$$

Se detalla el cálculo de Longitud de sujetador "L" H =5,68 mm, en la cual H es altura de terca hexagonal.

Por lo cual: $L = 30 mm$

La longitud roscada:

$$ld = 8mm$$

Longitud roscada útil: $lt = 8.6mm$

Rigidez efectiva del perno-

$$Ad = 50.265mm$$

$$Kb = 522.641MPa. m$$

Cálculo de rigidez de elementos a sujetar.

Eacero = **207 GPa**

$$Km1 = 2834.723 MPa. m$$

Análisis de empaque:

Easbesto = 480 MPa



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

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

Se indica área efectiva:

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

Rigidez efectiva de empaque:

$$K_{m2} = 262.254 \text{ MPa} \cdot \text{m}$$

Rigidez combinada de junta con empaque es

$$K_m = 240,05 \text{ MPa} \cdot \text{m}$$

Entonces, constante de rigidez de junta:

$$C = 0,685$$

Análisis en las tuberías de transporte de gases

Cálculo de temperatura superficial de tubería-. Primero, se elige tubería con referencia de que diámetro interior de tubería no llegue a acceder a 16,928 mm a diámetro de toma vapores. Por lo cual:

En el cual

Tubería cedula 40

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

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

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

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

$$T_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (valor considerado de bibliografía)}$$

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

$$T_s = \text{¿}$$



En el cual:

De: diámetro exterior de tubería [mm]

Di: diámetro interior de tubería [mm]

L: longitud de tubería [mm]

T1: temperatura de entrada a tubería [°C]

T2: temperatura de salida entrada a tubería [°C]

Ts: temperatura superficial de tubería [°C]

Para conseguir propiedades del fluido que se mueve por la tubería, se establece la estimación de temperatura medio.

$$T_b = \frac{400 - 380}{2} = 390^{\circ}C$$

Propiedades

El gas estudiado es CO₂, propiedades son:

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

$$C_p = 1106,8 \text{ J Kg.}^{\circ}C$$

$$k = 0,044129 \text{ W m.}^{\circ}C$$

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

$$Pr = 0,74572$$

Simulación del prototipo del reactor de pirolisis

Análisis térmico del prototipo-. Para análisis térmico se llegan a tomar en consideración los correspondientes elementos: recipiente a presión que se



encarga del almacenamiento de desechos plásticos, aislante térmico y chaqueta delgada de acero inoxidable.

Pre-proceso- Se detallarán parámetros de configuración como: material, geometría, cargas térmicas de diseño asimismo designación de mallado.

Material- Para sistema térmico llegan a intervenir los correspondientes materiales que se detallan la pertinente tabla:

Tabla 11

Propiedades térmicas de materiales

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

Para modelar el sistema térmico se utilizó una extensión de Solid Works compatible con ANSYS Workbench (.step). Se realizó un análisis en 2D utilizando el método axisimétrico, que se suele emplear para sólidos de rotación, con el fin de simplificar la investigación en ANSYS y obtener mallas de calidad superior. En consecuencia, la figura 18 muestra este sistema térmico en tres dimensiones, así como el perfil transversal de sistema térmico en dos dimensiones (superficies planas).

Figura 10

Modelado del sistema térmico



Variables térmicas de diseño- Las variables de temperatura se establecieron previamente en cálculos del diseño.

Tabla 12

Cargas térmicas de sistema

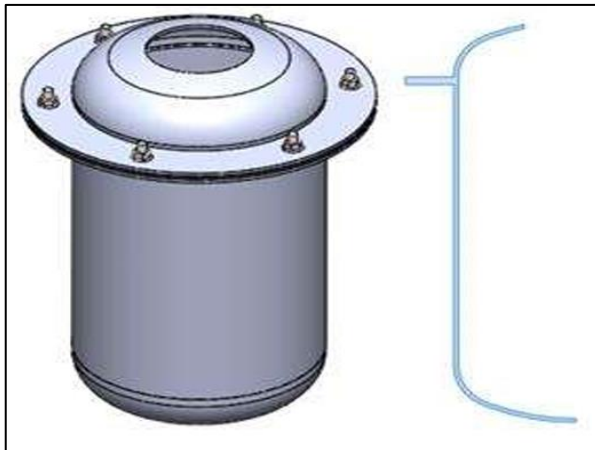
Variable	Valor
Temperatura interna del recipiente	550 °C
Flujo de calor radial	8600 W
Temperatura convectiva del aire	20 °C
Coefficiente convectivo del aire	20 W/m ² °C

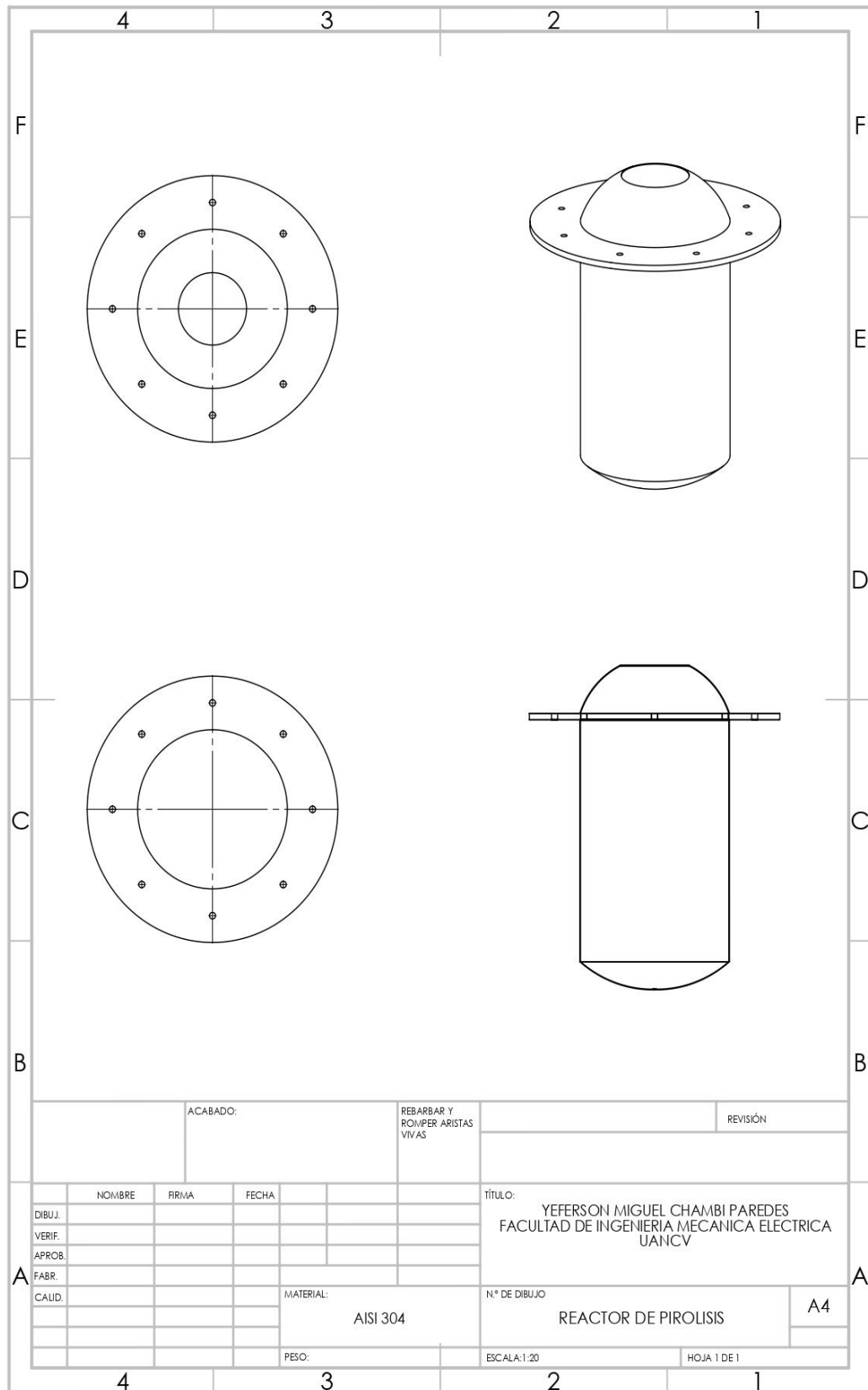
Geometría- Para modelizar el recipiente a presión se utilizó una extensión de Solid Works concurrente con ANSYS Workbench (.step). Para facilitar la investigación en ANSYS y producir mallas de superior calidad, empleó análisis en 2D que emplea enfoque axisimétrico, usado habitualmente para los sólidos de rotación. Como resultado, la figura 8 muestra esta geometría en tres

dimensiones y la forma de sección transversal del contenedor a presión en dos dimensiones (superficie plana).

Figura 11

Geometría 3D del reactor de pirolisis



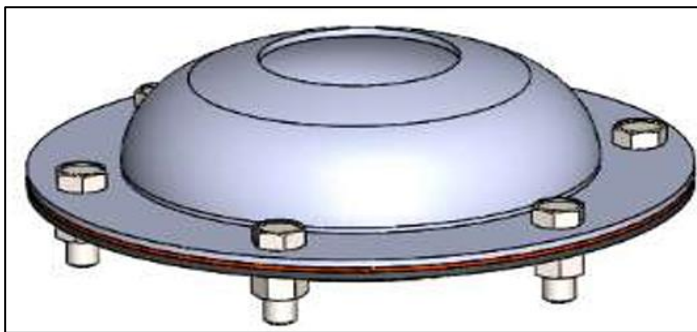


Plano Del Reactor De Pirolisis Extraida Del Programa Solidworks elaborado por el tesista.

El modelo se creó utilizando el programa Solid Works y una extensión compatible con ANSYS Workbench (.step). Para la investigación ANSYS se realizará análisis 3D, cuyo propósito es establecer el factor de seguridad de pernos. Así, la geometría de los pernos se representa en la figura 9.

Figura 12

Conjunto de brida y pernos

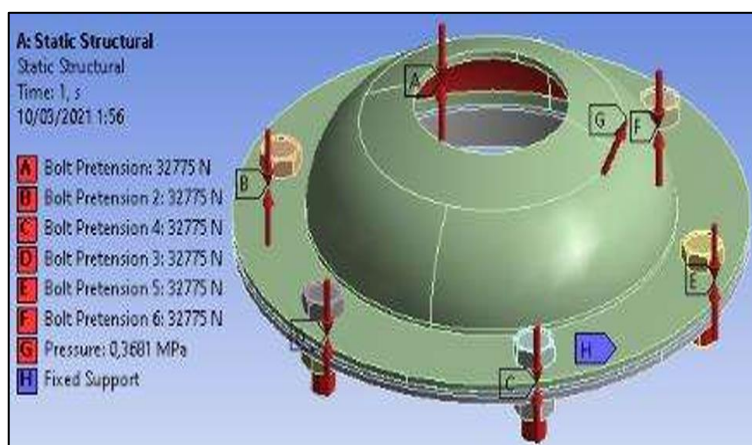


Soportes- Para evaluar la condición más vital de los pernos, se sitúa soporte firme en brida inferior, conocida como el cuerpo cilíndrico de reactor.

Se distribuyeron el soporte y las cargas aplicadas, tal como se detalla en figura 10.

Figura 13

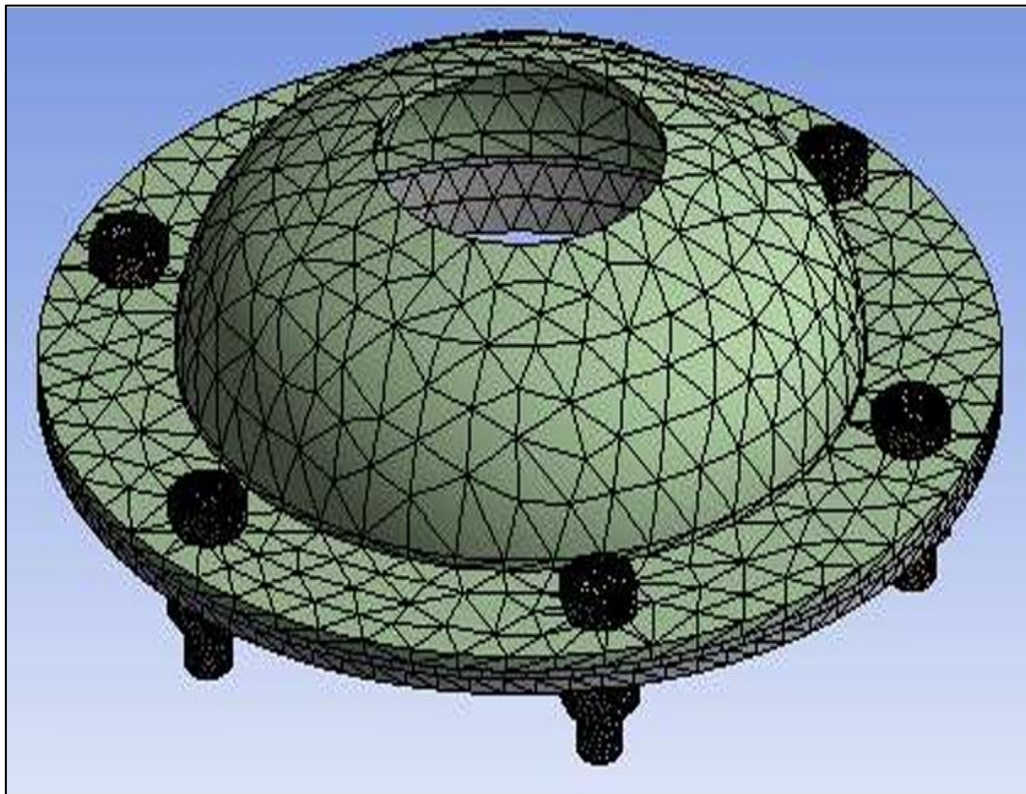
Conjunto de brida y pernos



Mallado- Para realizar el análisis se utilizará el evaluador de calidad de elementos, que establece que las calidades de malla iguales o cercanas a 1 dan los mejores resultados. Por el contrario, los resultados de valores cercanos a 0 no son fiables.

Figura 14

Mallado de los pernos y sección de interés

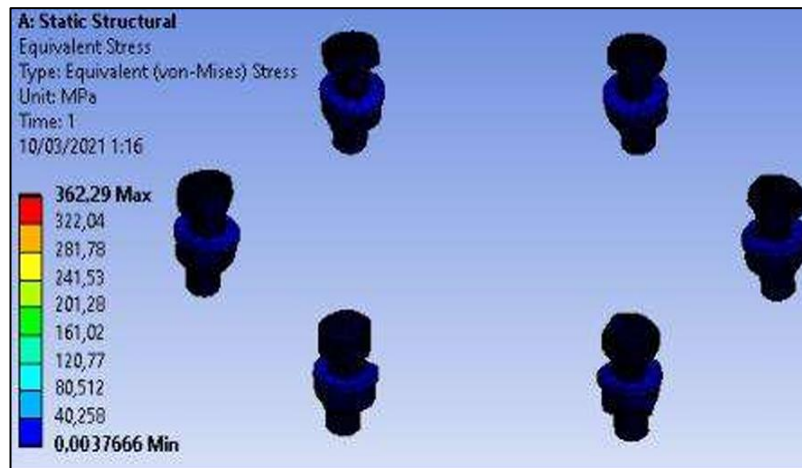


Post proceso- Analizando la malla en varios grados se obtuvieron resultados para los parámetros de interés. Ocultamos los demás componentes para que se vieran claramente los efectos de los pernos.

Análisis con un tamaño de "Pernos y tuercas" de 2 mm. En este análisis, la calidad de la malla es de 0,77867.

Figura 15

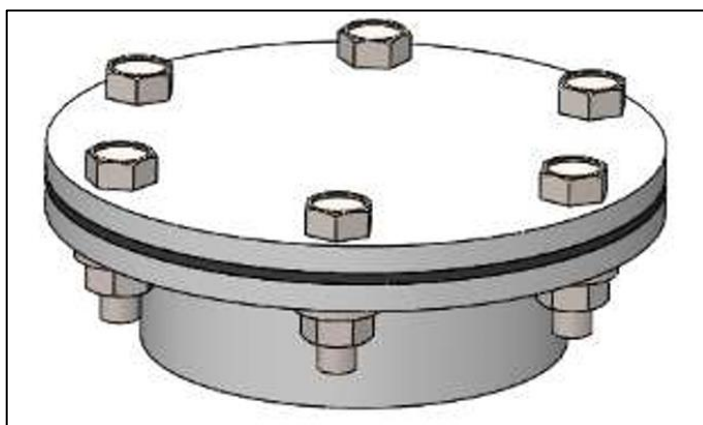
Resultados de esfuerzos en los pernos "Sizing 2 mm"



Geometría- El modelo se creó utilizando el programa Solid Works y una extensión que se alinea con ANSYS Workbench (.step). Para estudio ANSYS se llevará a cabo en 3D, cuyo propósito es establecer factor de seguridad mínimo de conjunto. Por lo tanto, en figura 13 se muestra la geometría.

Figura 16

Conjunto abastecimiento plástico

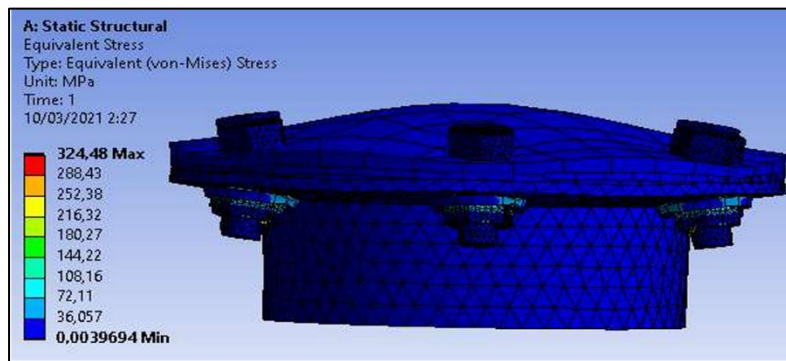


Post proceso-. Al analizar la malla con distintas calidades se lograron resultados para los parámetros de interés.

Evaluación de "Pernos y tuercas" con un tamaño de 1,5 mm En este análisis, la calidad de la malla es de 0,80244.

Figura 17

Resultados de esfuerzos en alimentación "Sizing 1,5 mm"



Sistema de condensación- El método de condensación en un reactor de pirólisis convierte los vapores pirolíticos en combustible líquido. Para diseñarlo, se deben calcular:

Cálculo del flujo de gases generados- El caudal másico de los gases pirolíticos (m_g) depende del conjunto de materiales y su conversión en productos pirolíticos.

$$m_g = m_t * Y_g$$

Donde:

m_g : Flujo de gases [kg/h]

m_t : Flujo de alimentación de materia prima [kg/h]

Y_g : Rendimiento en gases (% del peso de la materia prima)

Conociendo que el reactor procesa 37.5kg/h de residuos plasticos con un rendimiento asumido del 60% en vapores pirolíticos:

$$m_g = 37.5 * 0.6$$



$$m_g = 22.5 \text{ kg/h}$$

Cálculo de la carga térmica del condensador-. La energía que debe disipar el condensador se calcula con:

$$Q = m_g * C_p * \Delta T$$

Donde:

Q : Energía a disipa [kW]

C_p : Calor específico de los gases [kJ/kg*K]

ΔT : Diferencia de temperatura entre gases de entrada y salida [°C]

Valores típicos:

C_p de gases pirolíticos = 1.2 kJ/kg*K

T°entrada = 500°C; T°salida = 50°C

$$\Delta T = 500 - 50 = 450^\circ\text{C} = 450\text{K}$$

Reemplazando:

$$Q = 22.5 * 1.2 * 450$$

$$Q = 12150 \text{ kJ/h}$$

$$Q = 45 \text{ kW}$$

Cálculo del área de intercambio de calor-. Usamos la ecuación de transferencia de calor:

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

Despejamos el área del condensador:

$$A = \frac{Q}{U * \Delta Tm}$$

Donde:

U : Coeficiente transferencia de calor (W/m²*K)

ΔTm : Diferencia de logarítmica media

Para un condensador de tubo y coraza, $U = 100\text{W/m}^2\text{K}$.

Si el refrigerante entra a **20°C** y sale a **40°C**, se calcula ΔTm :



$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_g - T_{c1}) - (T_g - T_{c2})}{\ln \frac{(T_g - T_{c1})}{(T_g - T_{c2})}}$$
$$\Delta T_{lm} = \frac{(500 - 20) - (50 - 40)}{\ln \frac{(500 - 20)}{(50 - 40)}}$$
$$\Delta T_{lm} = \frac{480 - 10}{\ln \frac{480}{10}} = \frac{470}{\ln 48} = 121.4K$$

Sustituyendo valores:

$$A = \frac{45000}{100 * 121.4}$$

$$A = 3.7m^2$$

Modelado del sistema mecánico- Una vez determinado los elementos requeridos para la construcción de reactor de pirólisis térmica, se efectúa su modelización mediante el programa Solid Works, tal y como se ilustra en figura 15:

Figura 18

Modelado de Reactor en SolidWorks



4.1.3. Determinar factibilidad económica de prototipo de pirólisis para procesar desechos plásticos y convertirlos en gasolina.

Con el proceso de pirólisis totalmente construido, es necesario emplear principios que permitan clasificar los costes para determinar la viabilidad económica de producir combustible líquido a partir de basura plástica, como se observa a continuación.

Dado que el contenedor a presión debe construirse de acuerdo con las normas de diseño establecidas, se lleva a cabo un examen exhaustivo del recipiente con el fin de estimar su coste, como se ve a continuación.

Coste del recipiente a presión. Al construir el contenedor a presión de acero ASTM SA 516 Gr 70, se debe considerar el peso del recipiente:

Tabla 11

Costo neto de recipiente a presión

Insumos	Coste unidad(S./.)	por	Coste (S./.)	Total
Plancha (1000x2200x4) mm	51		102	
Costo Mano de Obra (S./kg)	2.50		32.5	
Consumibles (S./kg)	1.25		16.25	
Pintura	50.75		50.75	
Total			201.50	

El equipo, los electrodos y la energía eléctrica son ejemplos de costes consumibles. Se calcula el coste por hora de equipo y luego se multiplica por diario rendimiento en kilogramos para estimar el coste por kilogramo.

Materia prima directa. Las siguientes tablas muestran los costes de los materiales que están directamente relacionados con la edificación y la operación del equipo y se dividió en dos sistemas: mecánico y eléctrico.

Tabla 12

Costos del sistema mecánico

Pieza	Cantidad	Detalle	Costo (S./.)
Recipiente a presión	1	De acero SA 516 Gr 70	201.50
Manta fibra de cerámica	1	7200x610 (2" espesor)	105



Tubo estructural Cuadrado	2	20x20x2	21.46
Tubo acero inoxidable 304	1	1/2" Ced 40	15.63
Plancha Acero inoxidable 304	1	1220x2440 (2mm espesor)	170
Llave de paso	1	1/2"	8
Válvula de alivio	1	1/2"	48,80
Manómetro	1	1/2"	15
Termopar tipo K	1	Sonda de acero Inoxidable	15
Pernos y Arandelas	6	M14- M10- M8	10
Codo de acero inoxidable	1	1/2"	4.25
Cruz hembra de acero inoxidable	1	1/2"	4.25
Empaque de presión	2	2.3 mm de espesor	15
Total			633.89

Tabla 13

Costos del sistema eléctrico

Pieza	Cantidad	Descripción	Costo (S/.)
Resistencia Eléctrica	1	CBB 205 254	420
Arduino uno	1	R3 Dip Atmega 328	10
Pantalla Display	1	LCD 20x4	9.50
Interruptor	1	Botonera On/Off	5.40
Cable conductor eléctrico	5m	1,5 mm ²	4.20
Puente Rectificador	1	Plano 50 un. KBL406 4A600V	11.39
Optoacoplador	1	50pcs Pc817 EI817c ltv817 pc817-1 Dip-4	1.51
Micro Switch Pulsador	2	100pcs, Pulsador 6 * 6 * 5 Mm	1.24
Triac	1	600 V TO-220 5PCS BTA16-600B 16	1.25
Total			464.49



Materia prima indirecta- Son aquellos materiales básicos que no se utilizan directamente. El Cuadro 28 muestra los precios previstos de los componentes e insumos que forman parte del equipo, pero interfieren indirectamente en su fabricación.

Tabla 14

Estimación de materia prima indirecta

Pieza	Cantidad	Detalle	Costo (S/.)
Discos de corte para acero	5	ABREK 4 ½	5.50
Disco de pulido de acero	1	Bases O Disco con Velcro	8
Brocas para Acero	1	Juego de brocas	20
Flexómetro	1	5 m	3.10
Mano de obra Indirecta		Para procesos de soldadura y revisión del proyecto	100
Imprevistos			100
Total			236.6

Tabla 15

Costo total

Tipos sistema	Costo (S/.)
Sistema Mecánico	633.89
Sistema Eléctrico	464.49
Costos Indirectos	236.60
Total	1334.98



Sin tener en cuenta los gastos de diseño, se prevé que la construcción del reactor de pirólisis costará 1334,98 soles.

Se comparan los costes de producción. Para evaluar la viabilidad de producir energía a partir de la recolección y utilización de basura plástica, es necesario analizar la habilidad para rivalizar con costes de comercialización de otras clases de combustible.

Costo de producción del combustible. El principal producto del reactor de pirolisis será el combustible de desechos plásticos, que comparte características con el gasoil y puede ser utilizado en hornos, calderas y centrales eléctricas en los estados mencionados.

Costo de los plásticos- Se calcula el precio de compra de desechos de llantas en la ciudad de Juliaca para establecer el costo de elaboración de un litro de combustible a partir de la basura plástica; en este caso, es de tres soles por kilogramo.

Costo de la electricidad -. Se necesitarán 5.9 kWh de electricidad para alcanzar la temperatura necesaria en nuestro ejemplo de 550°C, según la tarifa de electro puno para la ciudad de Juliaca, que es de 64.32 céntimos de sol por kWh.

Costo de la energía eléctrica

$$= \text{potencia} * \text{tiempo de funcion.} * \text{Precio/kwh}$$

$$\text{Costo de la energía eléctrica} = 5.9 * 0.5 * 0.6432$$

$$\text{Costo de la energía eléctrica} = 5.9 * 0.5 * 0.6432$$



$$\text{Costo de la energía eléctrica} = 1.89 \text{ Soles/kg}$$

Entonces el costo del combustible del proceso de pirólisis será:

$$\text{Costo del combustible} = \text{costo de NFU} + \text{Costo de la energía eléctrica}$$

$$\text{Costo del combustible} = 3 \text{ S/.} * 1.89 \text{ Soles/kg}$$

$$\text{Costo del combustible} = 4.89 \frac{\text{Soles}}{\text{kg}} \text{ de combustible} = 4.89 \text{ soles/litro}$$

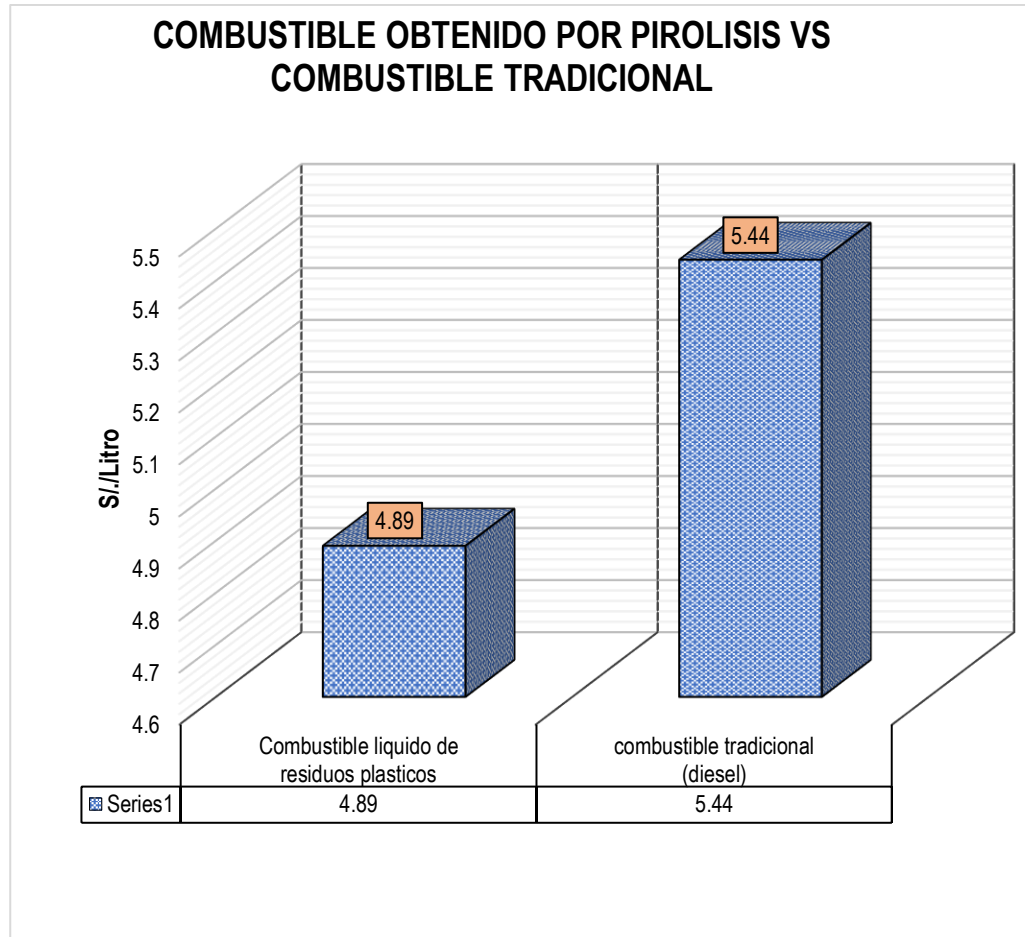
La comparación directa de los precios de venta de los dos tipos se debe a que las cualidades químicas de combustible derivado de proceso de pirólisis de los desechos plásticos competirán con las del carburante (gasóleo).

La gasolina diésel se vende a 5,44 soles el litro, según OSINERGIM.

Es posible obtener combustible líquido a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis, y para incrementar su rentabilidad es necesario implementar normativas y políticas de reciclaje que permitan ignorar estos elementos, rivalizando de esta manera a los combustibles convencionales. Según se ha comprobado, el precio de venta del combustible líquido a partir de desechos plásticos, considerando costes de adquisición de desechos plásticos, es inferior a de combustible líquido proporcionado por el estado.

Figura 19

Comparación de precios de venta del combustible líquido obtenido por pirolisis vs. el combustible tradicional (diésel)





4.2. DISCUSIÓN

Según los hallazgos, se ha desarrollado un prototipo de reactor de pirólisis con el objetivo de generar combustible líquido a partir de desechos plásticos., en donde será de acero inoxidable, contemplando un volumen de 0.33m^3 , para almacenar 300kg de plásticos en forma triturada, con un diámetro de 0.648m^2 , de 1.00metros de altura con un espesor de la pared del reactor de 3.048mm.

Existen algunas similitudes entre estos resultados y el estudio de Wenming et al. (2024), en el que demostró que el proceso de pirólisis producía un rendimiento ideal de combustible líquido, indicando que $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ era la temperatura óptima para obtener el máximo rendimiento de combustible entre las distintas temperaturas de pirólisis (450, 500, 550, 550, 600 y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$); En cuanto al estudio de Acosta & Castro (2021), diseñaron un reactor de pirólisis para procesar 1.123,92 toneladas de desechos sólidos al mes. El uso de los desechos sólidos municipales de esta manera demostró ser una alternativa fiable desde el enfoque técnico, social asimismo ambiental, disminuyendo efecto ambiental de residuos y las dificultades sociales que emergen en torno a vertederos convencionales de residuos sólidos. Además, Foster et al. (2024) demostraron que la utilización de lodos rojos preparados por pirólisis catalítica de neumáticos usados es un método exitoso para crear combustibles líquidos bajos en azufre. Además de ayudar a gestionar los neumáticos usados de forma sostenible, la técnica proporciona una fuente de combustible alternativa que puede utilizarse en aplicaciones como el



gasóleo marino o los combustibles Jet A debido a su composición favorable y su alto valor calorífico.

En cuanto al estudio de Oludare et al. (2020), también reveló que el sistema es comercialmente viable, lo que indica que el combustible de pirólisis de neumáticos puede ser capaz de sustituir a los inflamables convencionales en motores de combustión interna y que el método de recirculación gases de escape (EGR) puede ser capaz de abordar el problema del alto contenido de HC en la corriente de escape; además, el sistema es menos costoso que los combustibles convencionales como el diésel; en una línea similar, Altamirano & Mamani (2024) descubrieron que el diseño del reactor de pirólisis producía un mayor porcentaje de combustibles líquidos al generar un rendimiento de la fracción líquida (52,87%); un rendimiento máximo del 44,06% para la fracción sólida a 600°C; y un rendimiento máximo del 11,60% para el producto gaseoso.

Por último, pero no menos importante, el estudio de Cajusol & Carrión (2023) diseñó un horno pirolítico para residuos sólidos, el cual utiliza principalmente residuos orgánicos o sólidos urbanos como fuente primaria para generar combustible nitrogenado a través de la degradación térmica de moléculas sin oxígeno. Este proyecto es relevante para la ciudad de Trujillo debido a que en la ciudad se recogen de forma diaria superior a 400 toneladas de desechos sólidos que son llevados al vertedero de Pampas de Reque sin considerar regulaciones y procesos de gestión de manejo de desechos. Otro método para manejar este volumen de



desechos sólidos es transformarlos en insumos para fuentes de energía como hidrógeno.

Finalmente, con respecto a Altamirano & Mamani (2024), indica en sus resultados obtenidos en términos de rendimiento y calidad del combustible líquido sugieren que la pirólisis de NFU en reactor de lecho fijo podría ser una opción factible desde el aspecto económico. La eficiencia en la productividad de aceite pirolítico y su potencial uso como combustible alternativo podrían contribuir a la rentabilidad del proceso. Además, se indica que la pirólisis de neumáticos puede generar una ganancia neta de aproximadamente \$71 por tonelada procesada, con un período de recupero de la inversión de menos de un año y una tasa interna a retornar (TIR) del 99.87%, con un costo de procesamiento de una tonelada de neumáticos mediante pirólisis es de alrededor de \$200, mientras que los ingresos generados pueden alcanzar los \$222 por tonelada, lo que resulta en un margen de beneficio modesto de \$22 por tonelada ., además con respecto a la viabilidad económica de la pirólisis de neumáticos poseen dependencia de varios elementos, considerando la escala de planta, costos operativos, precio de comercialización del aceite pirolítico y demanda del mercado. Además, la utilización de subproductos como el negro de carbono y el gas pirolítico puede mejorar la rentabilidad del proceso.

Ante todo, lo mencionado la pirólisis de residuos plásticos representa una alternativa tecnológica clave para la obtención de insumos útiles en la obtención de combustibles, ya que permite transformar plásticos de



desecho en productos como aceites pirolíticos, gases y carbón sólido (char), los cuales pueden ser utilizados como materias primas en la industria del caucho. El char, rico en carbono, puede emplearse como sustituto parcial del negro de humo, un aditivo esencial en la elaboración de neumáticos, mientras que los aceites pirolíticos pueden refinarse para producir compuestos químicos que se integran en procesos industriales.



CONCLUSIONES

PRIMERA: Se concluye que la generación de un prototipo de reactor de pirólisis, es factible por que se garantiza conversión de desechos plásticos en combustible líquido, además este prototipo contribuirá a una solución tecnológica sostenible frente a creciente problemática de contaminación por plásticos, ofreciendo una alternativa viable para originar energía partiendo de desechos.

SEGUNDA: Se concluye que las particularidades de desechos plásticos originados en Juliaca, equivalen a 398.25kg de desechos de PET-Tereftalato de polietileno (1) (aceite asimismo botellas de bebidas y agua, entre otros semejantes); asimismo 327.48kg corresponde a residuos de PEAD-Polietileno de densidad alta (2) (botellas de shampoo, lácteos, suavizante, detergente líquido), de igual forma 282.31kg corresponde a residuos de PEBD-Polietileno de densidad baja (4) (empaques alimentos, de papel higiénico, de detergente, de film), así mismo 286.82kg corresponde a PP-Poliestireno (6) (tapas cristalinas de Cds, vasos de yogurt, micas, de lavavajilla, cubetas de helado, envases), y finalmente 356.83kg de residuos de PVC-Policloruro de vinilo (3) (Tuberías de desagüe, agua asimismo eléctricas)

TERCERA: Se concluye que el diseño del prototipo de reactor de pirólisis para conseguir combustible líquido partiendo de desechos plásticos, será de acero inoxidable, con un volumen de 0.33m³, para almacenar 300kg de plásticos en forma triturada, con un diámetro de 0.648m²,



de 1.00metros de altura con un espesor de la pared del reactor de 3.048mm, la cual soportará una presión de 0.3861 MPa y 550 °C de temperatura, con una tapa asegurada con 6 pernos. Todo ello realizado en base a los cálculos.

CUARTA: Se concluye que el costo del prototipo de reactor de pirolisis asciende a S/. 1334,98, consiguiendo un precio accesible relativamente para usuario y competitivo en mercado, además el procedimiento de pirólisis será beneficioso, cotejado con el precio de comercialización de combustible de parecidas propiedades químicas "diésel", ya que el coste por litro de combustible de gasolina diésel es S/. 5.44 mientras que para el combustible derivado de residuos plásticos es de S/. 4.89, siendo inferior al combustible disponible en el mercado.



RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Se recomienda incorporar un enfoque multidisciplinario en el diseño de prototipo de reactor de pirólisis, considerando aspectos termodinámicos, cinéticos y de seguridad operativa. Además, se sugiere realizar pruebas piloto con diferentes tipos de residuos plásticos para optimizar parámetros como temperatura, tiempo de residencia y atmósfera inerte, con el fin de efectuar maximización del rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido.
- SEGUNDA:** Se brinda como recomendación construir el reactor de pirólisis con superior capacidad para poseer un conocimiento más exhaustivo de cómo contribuirá a merma de desechos plásticos mediante la producción de útiles productos.
- TERCERA:** Se brinda como recomendación implementar un reactor de pirólisis de plásticos fuera de uso en la ciudad de Juliaca, debido a su abundancia en la generación de estos residuos actualmente, para generar nuevos productos como es el combustible líquido garantizando su factibilidad por los costos relativamente bajos encontrados.
- CUARTA:** Se recomienda tomar en consideración este estudio como punto de inicio para futuros proyectos, en donde no únicamente se consiga combustible líquido de los plásticos usados, sino más productos como los neumáticos, Tecnopor, cauchos, entre otros.



BIBLIOGRAFÍA

- Abril, E., & Ortiz, S. (2015). *Evaluación del efecto del tamaño de partícula y la temperatura en las características físicas y químicas del sólido carbonoso resultante de la pirólisis de caucho de llantas usadas en el reactor de arrastre*. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Acosta, D., & Castro, L. (2021). *Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos*. Bogotá: Fundacion Universidad de America.
- Afanador, J., Bonilla, I., Kafarov, V., León, A., & Carreño, L. (2022). Plastic waste to energy, technology solutions based on sustainability criteria for medium size city in Latin America, considering COVID-19 Pandemic. *Chemical Engineering Transactions*.
- Al, R., & Aisha, E. (2022). pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. , 5-6.
- Alfonso, C., & Coronado, J. (2022). *Evaluación y diseño de tecnologías basadas en la pirólisis a pequeña escala, como alternativa para el aprovechamiento y disposición final de residuos plásticos en zonas rurales del país*. Bogotá: Universidad Antonio Nariño.
- Altamirano, J. M. (2023). *Evaluación del rendimiento del reactor de pirolisis de lecho fijo, para la obtención de combustibles a partir de neumáticos fuera de uso*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.



- Amar, S., Ardilla, A., & Barra, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 306-326.
- Angulo, M., & Torres, R. (2023). *Obtención de combustible líquido, mediante el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.
- Balseca, J., & Carrera, D. (2022). *Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Balseca, O., Aquino, S., Chela, S., & Figueroa, J. (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*, 394-425.
- Bosa, A., Torres, J., & Soler, J. (2024). *Obtención de diésel y gasolina a partir de la transformación de polietileno de baja densidad por medio de la degradación térmica conocida como pirolisis*. Bogotá: Facultad De Ingeniería, Universidad EAN.
- Cajusol, D., & Carrion, A. (2023). *Diseño de un horno pirolítico de residuos sólidos para la obtención de hidrógeno, en la ciudad de Chiclayo*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.



- Campos, C., & Armas, F. (2023). *Combustibles FUEL-OIL obtenidos de residuos plásticos mediante pirólisis, Pucallpa – Ucayali*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Campos, G., & Arrazola, F. (2017). *Estudio Preliminar de la Pirólisis Catalítica de Desechos Plásticos para la Obtención de Combustibles*. .
- Carmona, Y., & Espinoza, J. (2024). *Obtención de combustible líquido a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis*. El Callao: Universidad Nacional del Callao.
- Chun, Z., Rongcheng, W., & Guangwen, X. (2020). Coal Pyrolysis for High-Quality Tar in a Fixed-Bed Pyrolyzer Enhanced with Internals. *Energy & Fuels*, 1-9.
- Córdova Baldeón, I. (2018). *"Instrumentos de investigación"*. Lima: San Marcos de Aníbal Jesús Paredes Galván.
- Czajczynska, D., Krzyzynska, R., Jouhara, R., & Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel. . *Revista Energy*, 1121-1131.
- Delgado, M., & Kurinthy, S. (2019). *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado*. Chimborazo: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Diaz, F. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la* . Cuenca: Universidad Autónoma de Occidente.
- Diaz, K. (2022). *Análisis del proceso de pirolisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos*. Bogota: Universidad Antonio Nariño. .



- Dzuhairy, A., Hamidah, H., Raja, D., Muzafar, Z., & Nor, K. (2020). Insights into pyrolysis of waste tire in fixed bed reactor: Thermal behavior. *ELSEVIER*,, 2-9.
- Figueroa, J., & Chela, S. (2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir del PP, PE, Y PS*. Riobamba: Escuela Superior Politecnica del Chimborazo.
- Gil, A. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Scielo*, 1 - 23. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/>.http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306
- Guevara, C. P. (2019). Diseño de un Reactor de Pirólisis experimental para pruebas de biomasa agroforestal. 45-60.
- Hernandez, R., & Fernandez, C. (2014). *Metodología de la Investigacion*. Mexico: McGrawHill Education.
- Hewei, J. (2022). *Predicción y evaluación de propiedades de combustibles y características de pirólisis de residuos sólidos industriales combustibles*. China: Revista del Instituto de Energía.
- Ilbay, P., & Geovanny, O. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno*. Chimborazo: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



- Jin, Z., & Hong, L. (2018). *Molten waste plastic pyrolysis in a vertical falling film reactor and the influence of temperature on the pyrolysis products*. Chinese: Chinese Journal of Chemical Engineering .
- Jordan, W., & Zurita, P. (2015). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH*. Cuenca: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. .
- Jordán, W., & Zurita, P. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH*. Riobamba: Escuela Superior Politecnica del Chimborazo.
- Kalargaris, L., & Tian, G. G. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 108-115.
- Lange, G. (2018). *Análisis multitemporal de la deforestación y cambio de la cobertura del suelo de la ciudad de puerto Ayora – Santa Cruz mediante el uso de la teledetección y sistemas de información geográfica*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Maqsood, T. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159 - 201.
- Martinez, M., & Rugeles, L. (2022). *Diseño de un reactor de pirólisis rápida en la producción de combustible a base de plástico PET para la implementación*



en los laboratorios de la Universidad de América. Bogotá: Fundación Universidad de América.

Martunis, M., Winanda, E., & Harahap, A. (2019). Thermal pyrolysis of polypropylene plastic waste into liquid fuel: reactor performance evaluation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 20 - 41.

Mejía, A. (2022). *Obtención de biocombustible mediante pirólisis con base en el aprovechamiento de residuos*. Colombia: Universidad de América.

Moorthy, K. (2020). Review of catalyst materials in achieving the liquid hydrocarbon fuels from municipal mixed plastic waste (MMPW). *Materials Today Communications*, 1 - 23.

Moreno, C. (2021). *Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos*. Bogotá: Fundación Universidad de América.

Ocampo, S. (2019). Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño-Colombia. *Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*, 64-75.

Palmy, P. M., & Vargas, K. (2021). Pirólisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 2463-2476.

Peralta, M., & Bermeo, C. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis de combustión lenta con una capacidad de 10 kg a escala de laboratorio*



para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables. Ginebra:
Universidad de Ginebra.

Pinargote, L., & Sanchez, A. (2023). *Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis.* Calceta: Escuela superior politecnica agropecuaria de Manabi.

Pinargote, L., & Sanchez, A. (2023). Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis. . *Universidad de Ginebra*, 1 - 23.

Polanco, D. (2019). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de fuel oil a partir de residuos plásticos mediante un proceso pirolítico en Arequipa.* Arequipa: Universidad de San Agustin de Arequipa.

Prurapark, R. (2020). Effect of temperature on pyrolysis oil using high-Density polyethylene and polyethylene terephthalate sources from mobile pyrolysis plant. *frontiers in energy research*, 1 - 11.

Puño, X. (2023). *Construcción de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de combustible a partir de desechos plásticos.* La Paz: Universidad Mayor de San Andres.

Qureshi, M., & Laine, Y. (2020). *Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.

Raghuram, K., Hemanth, B., & Shijo, T. (2018). Scope of Pyrolysis Process as a Sustainable Method to Dispose Waste Tires. *School of Nano Science and Technology*, 2-15.



- Ramos, W., & Pretell, V. (2020). *Obtención de combustibles líquidos mediante pirólisis catalítica de residuos plásticos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Obtención de Combustibles Líquidos a Partir de Residuos de Polietileno de Alta Densidad. *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1 - 8.
- Rodríguez, J., & Tunjacipa, M. (2023). *Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados*. Bogotá: Fundación Universidad de América.
- Rosha, P. (2022). *Análisis de sensibilidad de la pirólisis de biomasa para la producción de combustibles renovables utilizando Aspen Plus*. Canada: Elsevier,.
- Sálazar, E., Ochoa, J., Virreira, J., & Trigoso, L. (2023). *Reducción de la Contaminación por Residuos Plásticos Mediante su Aprovechamiento para Producción de Combustibles en Iquitos*. Iquitos: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Sebastián, W., & Urrego, P. (2019). *Análisis de Ciclo de Vida de la Pirólisis como alternativa de gestión de residuos de llantas*. Una revisión.
- Sogancioglu, M., & Esra, E. (2017). *A Comparative Study on Waste Plastics Pyrolysis Liquid Products Quantity and Energy Recovery Potential*. Energy Procedia.



- Solís, H., Miranda, B., & Davis, M. (2020). Valorización de residuos de parafinas provenientes de la pirólisis de plásticos por craqueo catalítico. *Ciencia en Desarrollo*, 81-99.
- Soni, V. (2021). Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis. A Review. *American Chemical Society Energy and Fuels*, 1 - 35.
- Timana, J. (2022). Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. Latin American and Caribbean Consortium of* , 1 - 26.
- Tulashie, S., & Dapaah, S. (2019). *Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana*. Thermal Science and Engineering Progress.
- Vaca, H. (2023). *Implementación de un reactor de obtención de biochar mediante pirólisis para su uso como combustible en plantas de generación eléctrica*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Villegas, E., & Zamudio, V. (2022). *Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido*. EPS.
- Yadav, G. (2023). *Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste*. Energy & Environmental Science.



ANEXOS



Anexo 1. Matriz de consistencia

<u>PROBLEMA</u>	<u>OBJETIVO</u>	<u>HIPÓTESIS</u>	<u>VARIABLES</u>	<u>DIMENSIONES</u>	<u>INDICADOR</u>	<u>ESCALA DE MEDICIÓN</u>	<u>METODOLOGIA</u>
<p>General</p> <p>¿Sera posible diseñar una miniplanta prototipo para la conversión de residuos plásticos en gasolina mediante pirolisis en la ciudad de Juliaca?</p>	<p>General</p> <p>Diseñar una miniplanta prototipo para la conversión de residuos plásticos en gasolina mediante pirolisis en la ciudad de Juliaca</p>	<p>Hipótesis Alterna</p> <p>El diseño y posterior implementación de una miniplanta prototipo permitirá la conversión de residuos plásticos en gasolina mediante pirolisis en la ciudad de Juliaca</p>	<p>Independiente</p> <p>Pirolisis</p>	<p>Prototipo de reactor de pirolisis</p>	Caudal volumétrico de alimentación ($Q=A \cdot v$)	m ³ /h	<p>Tipo de investigación</p> <p>Aplicativo</p> <p>Diseño de investigación</p> <p>No experimental</p>
					Volumen del reactor ($V=m/\rho$)	m ³	
					Presión máxima de trabajo ($P=SEt/(R+0.6t)$)	MPa	
					Calor requerido	KW	
				<p>Organigrama de procesos del prototipo</p>	Adquisición de la materia prima (plásticos)	Razón	
					Pesado	Razón	
					Proceso de pirolisis	Razón	
					Condensación	Razón	
					Combustión	Razón	
						Razón	
<p>Específicas</p> <p>¿Cuáles son las características de los residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca?</p> <p>¿Cómo es el diseño del prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina?</p> <p>¿Cuánto es la rentabilidad del prototipo de pirolisis a para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina?</p>	<p>Específicas</p> <p>Determinar las características de los residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca.</p> <p>Diseñar el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina.</p> <p>Determinar la rentabilidad del prototipo de pirolisis a para procesar residuos plásticos para convertirlos en gasolina.</p>	<p>Hipótesis Nula</p> <p>Las características de los residuos plásticos generados en la ciudad de Juliaca, son plástico PET, PEAD, PEBD, PP, PCV</p> <p>El dimensionamiento del prototipo de reactor de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en combustible líquido será en base a referencias bibliográficas.</p> <p>Es factible económicamente el prototipo de pirolisis para procesar residuos plásticos y convertirlos en gasolina.</p>	<p>Dependiente</p> <p>Conversión de residuos plásticos en gasolina</p>	<p>Residuos plásticos</p>	PET	kg	
					PEAD	kg	
					PEBD	kg	
					PP	kg	
					PCV	kg	
<p>Rentabilidad económica</p> <p>Costos del combustible</p>	S/.						



ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 10/12/2025

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: YEFERSON MIGUEL CHAMBI PAREDES

Dirección: Jr. Mariano Melgar # 448 Barrio Manco Cápac – Juliaca

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 74461975

Teléfono: 974293084 email: chambiparedesy@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____

Dirección: _____

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____

Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Título o Grado Académico a optar: INGENIERO MECÁNICA ELECTRICISTA

Asesor: MGTR. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional Trabajo Académico

Título: DISEÑO DE UNA MINIPLANTA PROTOTIPO DE PIRÓLISIS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN GASOLINA EN LA CIUDAD DE JULIACA

Palabras claves, (3 a 5 términos): Prototipo De Pirolisis, Residuos Plásticos, Gasolina, Factibilidad

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1,2}?

2

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

- Bachiller
- Título
- 2da Especialidad
- Maestría
- Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- Sí autorizo
- No autorizo



Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: TECNOLOGIA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18

Firma de Autor



huella digital

10 de diciembre de 2025

Fecha