UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Tesis

Aprovechamiento de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena, para la obtención de combustible líquido por pirolisis - 2024

Asesor:

M.Sc. Ing. Mollo Varillas, Valex Raúl

Autores:

Huamanga Huamanga, Darío

Nuñez Gutierrez, Mercedes

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero(a) Ambiental

Cusco - Cusco - Perú

2026

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS NATURALES

Acta N°: 013

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 23 días del mes de setiembre del 2026, siendo las 11:05 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 019-2026-UTEA-FC-EPIARN de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería Ambiental:

Presidente	:	Dra. Farfan Rodriguez, Jessika
Dictaminante	:	Mg. Mattos Yallico, Cesar Antonio
Replicante	:	Mg. Ccopa Ccoto, Oscar

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: Aprovechamiento de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena, para la obtención de combustible líquido por pirolisis - 2024

Desarrollado por los Bachilleres:

Br.: Nuñez Gutierrez, Mercedes
Br.: Huamanga Huamanga Dario

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fueron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Nota	Detalle (**)
Br. Nuñez Gutierrez, Mercedes	15	
Br. Huamanga Huamanga Dario	15	

Siendo las 11:15 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dra. Farfan Rodriguez, Jessika (Firma)

Dictaminante: Mg. Mattos Yallico, Cesar Antonio (Firma)

Replicante: Mg. Ccopa Ccoto, Oscar (Firma)

Nota: **Desaprobado:** 0-10; **Aprobado:** 11-20
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

14% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

12% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
10% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° 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

Datos de los Autores		
Apellidos y nombres	:	Huamanga Huamanga, Dario
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	73218203
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0007-1641-5584
Apellidos y nombres	:	Nuñez Gutierrez, Mercedes
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de documento de identidad	:	75936421
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0000-1237-2598
Datos de la Asesor		
Apellidos y nombres	:	M.Sc. Ing. Mollo Varillas, Valex Raúl
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	47198884
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0002-7895-1469
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en el que se realizó la investigación	:	Enero 2025 – agosto 2026
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	14%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, quienes con su apoyo incondicional y confianza constante hicieron posible que este esfuerzo se concrete. A nuestros docentes, por transmitirnos no solo conocimientos, sino también valores que guiarán nuestro futuro profesional. Finalmente, nos lo dedicamos mutuamente, como un reconocimiento al compromiso compartido y a la perseverancia que nos permitió llegar hasta aquí.

Los autores

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud a las instituciones y personas que hicieron posible este trabajo. A los docentes, por su orientación académica y el ejemplo de profesionalismo; a nuestros compañeros, por la colaboración y el intercambio de ideas; y a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

Expresamos nuestra gratitud a las instituciones y personas que hicieron posible este trabajo. A los docentes, por su orientación académica y el ejemplo de profesionalismo; a nuestros compañeros, por la colaboración y el intercambio de ideas; y a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

Los autores

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el tratamiento óptimo de pirólisis para obtener un alto rendimiento de combustible líquido a partir de guantes de látex usados del Hospital de Contingencia Antonio Lorena, Cusco – 2024. La muestra estuvo constituida por 3600 g (3.6 kg) de guantes de látex hospitalarios, procesados mediante un diseño experimental completamente aleatorizado, evaluándose la influencia de la temperatura (400, 450 y 500 °C) y la velocidad de calentamiento (10, 15 y 20 °C/min), con réplicas por prueba. Los resultados evidenciaron que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento del combustible líquido ($p = 0.0012$), alcanzándose el mayor valor a 500 °C (47.68 %). Asimismo, la velocidad de calentamiento influyó significativamente en el proceso ($p = 0.0041$), obteniéndose el mayor rendimiento a 20 °C/min (48.32 %). La destilación del combustible pirolítico se realizó de acuerdo con la norma ASTM D1160, permitiendo obtener tres fracciones principales: gasolina (33.50 %), diésel (28.00 %) y residuo (38.50 %), con diferencias significativas entre ellas ($p < 0.0001$). La caracterización fisicoquímica de las fracciones se realizó mediante el método del hidrómetro según la norma ASTM D1298, evidenciándose variaciones en densidad y gravedad API: gasolina (0.733 g/cm³; 61.72 °API), diésel (0.850 g/cm³; 35.13 °API) y residuo (0.957 g/cm³; 16.60 °API). Se concluye que las condiciones óptimas de pirólisis fueron 500 °C y 20 °C/min, al maximizar el rendimiento del combustible líquido y generar fracciones con propiedades parcialmente comparables a combustibles comerciales.

Palabras clave: pirólisis, guantes de látex, combustible líquido, residuos hospitalarios.

Abstract

The objective of this research was to determine the optimal pyrolysis treatment to obtain a high yield of liquid fuel from used latex gloves from the Antonio Lorena Contingency Hospital, Cusco - 2024. The sample consisted of 3600 g (3.6 kg) of hospital latex gloves, processed through a completely randomized experimental design, evaluating the influence of temperature (400, 450 and 500 °C) and the heating rate (10, 15 and 20 °C/min), with replicates per treatment. The results showed that temperature had a significant effect on the performance of the liquid fuel ($p = 0.0012$), reaching the highest value at 500 °C (47.68 %). Likewise, the heating speed significantly influenced the process ($p = 0.0041$), with the highest performance being obtained at 20 °C/min (48.32 %). The distillation of the pyrolytic fuel was carried out in accordance with the ASTM D1160 standard, allowing three main fractions to be obtained: gasoline (33.50%), diesel (28.00%) and residue (38.50%), with significant differences between them ($p < 0.0001$). The physicochemical characterization of the fractions was carried out using the hydrometer method according to the ASTM D1298 standard, showing variations in density and API gravity: gasoline (0.733 g/cm³; 61.72 °API), diesel (0.850 g/cm³; 35.13 °API) and residue (0.957 g/cm³; 16.60 °API). It is concluded that the optimal pyrolysis conditions were 500 °C and 20 °C/min, maximizing the yield of the liquid fuel and generating fractions with properties partially comparable to commercial fuels.

Keywords: pyrolysis, latex gloves, liquid fuel, hospital waste.

Índice

Portada i

Acta de sustentación ii

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria v

Agradecimientos vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice ix

Índice de tablas xi

Índice de figuras xiii

Índice de anexos xiv

I. Introducción 15

II. Planteamiento del problema 17

2.1 Descripción y formulación del problema 17

2.2 Objetivos 19

2.2.1 Objetivo general 19

2.2.2 Objetivos específicos 19

2.3 Justificación e importancia 20

2.4 Hipótesis 21

2.5 Variables 22

III. Marco Teórico 25

3.1 Antecedentes 25

3.2 Bases teóricas 32

3.3 Definiciones de términos 50

III. Metodología 52

4.1 Tipo y nivel de investigación 52

4.2 Ámbito temporal y espacial 54

4.3 Población y muestra 54

4.4 Instrumentos 55

4.5 Procedimientos 60

4.6 Análisis de datos 66

4.7 Consideraciones éticas 67

IV. Resultados y Discusión 68

V. Conclusiones 102

VI. Recomendaciones 104

VII. Referencias 105

VIII. Anexos 113

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de Operacionalización de variables 23

Tabla 2 Clasificación y tipología de los residuos sólidos hospitalarios según el MINSA 34

Tabla 3 Comparación de los tipos de pirolisis..... 43

Tabla 4 Fracciones del petróleo y rangos de ebullición según el tipo de destilación..... 48

Tabla 5 Condiciones de presión asociadas al tipo de destilación 48

Tabla 6 Diseño experimental..... 53

Tabla 7 Niveles de los factores..... 53

Tabla 8 Instrumentos y materiales para la destilación del aceite pirolítico..... 56

Tabla 9 Componentes del sistema de pirolisis..... 57

Tabla 10 Componentes del equipo de destilación fraccionada..... 58

Tabla 11 Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos 69

Tabla 12 Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos 70

Tabla 13 Resultados caracterización fisicoquímica (Densidad y Grados API) — Gasolina, Diésel y Residuo..... 72

Tabla 14 Estadística descriptiva del rendimiento (%) de combustible líquido por prueba 74

Tabla 15 ANOVA del modelo factorial para el rendimiento (%) 77

Tabla 16 Prueba de significancia de los efectos (Type III Sums of Squares) 77

Tabla 17 Componentes de varianza y ajuste del modelo..... 78

Tabla 18 Prueba de significancia de los efectos (Type III Sums of Squares) 79

Tabla 19 Estadística descriptiva por fracción de combustible destilado 80

Tabla 20 Test de normalidad para subproductos fraccionados del combustible liquido... 82

Tabla 21 Estadística descriptiva de propiedades fisicoquímicas..... 83

Tabla 22 Test de normalidad - Gravedad específica y grados API 86

Tabla 23 Hipótesis específica 1 – Velocidad de calentamiento 88

Tabla 24 Hipótesis específica 2 – Temperatura de pirólisis 88

Tabla 25 ANOVA % de recuperación de fraccionados 90

Tabla 26 Prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$) para el porcentaje de recuperación entre fracciones 90

Tabla 27 ANOVA - Gravedad especifica 92

Tabla 28 Prueba del rango studentizado de Tukey (HSD) para gravedad especifica 93

Tabla 29 ANOVA - Grados API 94

Tabla 30 Prueba del rango studentizado de Tukey (HSD) para Gravedad_API 95

Tabla 31 Planteamiento de hipótesis general (prueba t-student de una muestra, $\mu 0 = 50\%$) 97

Tabla 32 Valor del rendimiento óptimo obtenido 98

Tabla 33 Prueba t-Student para el rendimiento óptimo del combustible líquido 98

Índice de figuras

Figura 1 Esquema del sistema de pirolisis 40

Figura 2 Esquema del reactor de pirólisis rápida en lecho fijo 44

Figura 3 Reactor batch (discontinuo) 45

Figura 4 Reactor de horno rotatorio / sinfín 45

Figura 5 Reactor tipo fluidizado 46

Figura 6 Equipo pirolítico 57

Figura 7 Equipo de destilación fraccionada 59

Figura 8 Recolección y pesado de las muestras de guantes de látex 61

Figura 9 Destilación del aceite pirolítico y caracterización de los fraccionados 73

Figura 10 Diagrama de cajas del rendimiento (%) del combustible líquido obtenido por pirólisis según cada prueba. 74

Figura 11 Curva de destilación ASTM para cada fracción destilada 81

Figura 12 Densidad media vs densidad comercial por fracción (gasolina, diésel y residuo) 84

Figura 13 Grados API del producto fraccionado vs. grados API comerciales por fracción. 85

Figura 14 Distribución del % de recuperación de fraccionados 91

Figura 15 Distribución de la gravedad especifica por fracción 94

Figura 16 Distribución de los grados API por fracción 96

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de Consistencia 114

Anexo 2 Matriz de Operacionalización de variables..... 116

Anexo 3 Validación del instrumento de investigación..... 118

Anexo 4 Instrumento de investigación..... 119

Anexo 5 Galería de fotografías 121

I. Introducción

La gestión de residuos hospitalarios constituye un tema de creciente interés dentro del campo de la ingeniería ambiental debido al incremento en el uso de materiales descartables y a la necesidad de implementar estrategias que favorezcan una gestión más eficiente de estos residuos. Entre los materiales generados en establecimientos de salud, aquellos de naturaleza polimérica han adquirido relevancia por las posibilidades que ofrecen para el desarrollo de alternativas de tratamiento y aprovechamiento.

Dentro de este grupo se encuentran los guantes de látex usados, ampliamente empleados como elemento de protección durante la atención sanitaria. En los últimos años, el avance de tecnologías orientadas a la valorización de residuos ha permitido ampliar el estudio de procesos capaces de transformar este tipo de materiales en productos de interés energético. En este contexto, la pirólisis se presenta como una tecnología termoquímica aplicada al aprovechamiento de residuos poliméricos.

La presente investigación se desarrolló utilizando guantes de látex usados recolectados en el Hospital de Contingencia Antonio Lorena, ubicado en la ciudad del Cusco. Para ello, se empleó un enfoque experimental orientado a evaluar el proceso de pirólisis para la obtención de combustible líquido y a caracterizar las fracciones obtenidas, con la finalidad de generar información técnica sobre el comportamiento del material bajo condiciones de operación controladas.

La investigación se organiza en cinco capítulos. El Capítulo I desarrolla el planteamiento del problema; el Capítulo II presenta el marco teórico; el Capítulo III expone

las hipótesis y variables; el Capítulo IV describe el diseño metodológico; y el Capítulo V presenta los resultados, la contrastación de hipótesis y la discusión. Finalmente, se incluyen las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

A nivel internacional, los residuos hospitalarios representan una de las fracciones más complejas de manejar dentro de los sistemas de gestión de residuos sólidos, debido a su carácter infeccioso, tóxico y su volumen creciente. Se estima que los establecimientos de salud generan entre 0.5 y 2 kg de residuos peligrosos por cama por día, gran parte de ellos no clasificados ni tratados adecuadamente (World Health Organization, 2024). Los guantes de látex usados forman parte de estos residuos, y al no tener un tratamiento eficiente, se convierten en una fuente potencial de contaminación ambiental y riesgo para la salud pública.

El Ministerio de Salud ha reconocido que muchos hospitales aún disponen sus residuos mediante incineración convencional, lo cual genera emisiones de gases contaminantes como dioxinas, furanos y metales pesados (MINSA, 2019). Esta práctica, además de ser costosa, contribuye significativamente a la contaminación atmosférica. En respuesta a esta problemática, diversas investigaciones han explorado procesos alternativos como la pirólisis, una tecnología termoquímica capaz de transformar residuos plásticos y poliméricos en productos con valor energético.

En el hospital de contingencia Antonio Lorena de Cusco, los guantes de látex usados a menudo no se clasifican adecuadamente. Su eliminación mediante incineración conlleva costos elevados, repercute negativamente en el medio ambiente y entraña riesgos para el personal correspondiente. En este contexto, la pirólisis ofrece una vía para reciclar estos residuos transformándolos en combustible líquido. Sin embargo, para este hospital en

particular, aún no se han determinado ni evaluado las condiciones óptimas del proceso (tales como la temperatura y la velocidad de calentamiento).

Si los guantes de látex continúan eliminándose exclusivamente mediante incineración, persistirán los elevados costes de eliminación, las emisiones contaminantes y los riesgos para el personal. Además, se pierde la oportunidad de valorización energética de estos residuos; en consecuencia, se desperdicia un material que podría haberse aprovechado de manera significativa y con un menor impacto ambiental. La ausencia de estudios técnicos para optimizar la pirólisis limita su aplicación práctica y retrasa la implementación de tecnologías más limpias en el contexto hospitalario.

El desarrollo de investigaciones orientadas a optimizar las condiciones del proceso de pirólisis de guantes de látex, evaluando factores como temperatura y velocidad de calentamiento, permitiría establecer un tratamiento técnico-viable para el aprovechamiento de los guantes de látex usados. Asimismo, la caracterización fisicoquímica del combustible líquido obtenido permitiría validar su uso potencial como fuente energética, promoviendo una economía circular dentro del hospital y reduciendo su huella ecológica.

2.1.1 Formulación del problema

2.1.1.1 Problema general

¿Cuál es el tratamiento óptimo de pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco para un alto rendimiento de combustible líquido – 2024?

2.1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la temperatura en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia

Antonio Lorena - 2024?

- ¿Cómo influye la velocidad de calentamiento en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena - 2024?
- ¿Qué porcentaje presenta cada composición de subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024?
- ¿Qué valores presentan las características fisicoquímicas de cada subproducto fraccionado del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Optimizar el proceso de pirólisis de guantes de látex usados del Hospital de Contingencia Antonio Lorena del Cusco, evaluando la influencia de la temperatura y la velocidad de calentamiento sobre el rendimiento del combustible líquido obtenido.

2.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la temperatura en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024.
- Evaluar el efecto de la velocidad de calentamiento en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024.
- Calcular el porcentaje de cada composición de subproductos fraccionados del

combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024.

- Estimar los valores de las características fisicoquímicas de cada subproducto fraccionado del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 Justificación de la investigación

2.3.1.1 Justificación teórica

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de ampliar el conocimiento sobre la valorización energética de residuos hospitalarios, específicamente guantes de látex, mediante procesos termoquímicos como la pirólisis. Este estudio contribuye al desarrollo teórico en el campo de la conversión de residuos en combustibles alternativos, aportando información sobre las condiciones de operación y el comportamiento del material durante su degradación térmica.

2.3.1.2 Justificación práctica

Desde el punto de vista práctico, la investigación permite proponer una alternativa viable para el tratamiento de guantes de látex usados generados en el Hospital de Contingencia Antonio Lorena. La aplicación del proceso de pirólisis posibilita la obtención de combustible líquido, reduciendo los costos asociados a la incineración y mejorando la gestión de residuos sólidos hospitalarios.

2.3.1.3 Justificación metodológica

Metodológicamente, la investigación se sustenta en el uso de un diseño experimental factorial, el cual permite evaluar el efecto de variables como la temperatura y la velocidad

de calentamiento sobre el rendimiento del combustible obtenido. Asimismo, el empleo de análisis estadístico y caracterización fisicoquímica garantiza la validez y confiabilidad de los resultados, aportando un modelo replicable para futuras investigaciones.

2.3.1.4 Justificación social

La investigación tiene relevancia social debido a que contribuye a la reducción del impacto ambiental generado por la disposición inadecuada de residuos hospitalarios. Además, disminuye la exposición del personal a residuos potencialmente contaminados y promueve prácticas más sostenibles en la gestión de residuos en establecimientos de salud.

2.3.2 Importancia de la investigación

La investigación es importante porque propone una alternativa tecnológica para la valorización de residuos hospitalarios mediante la producción de combustible líquido a partir de guantes de látex. Esto no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también genera conocimiento aplicable a otros establecimientos de salud que enfrentan problemáticas similares, fomentando el desarrollo de tecnologías sostenibles en la gestión de residuos.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

El tratamiento óptimo de pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco (2024) permitirá obtener un rendimiento significativo de combustible líquido.

2.4.2 Hipótesis específicas

HE1. La temperatura tiene un efecto significativo en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco - 2024.

HE2. La velocidad de calentamiento tiene un efecto significativo en el rendimiento del combustible líquido obtenido por pirolisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena - 2024.

HE3. Los porcentajes de cada composición de subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco (2024) presentan diferencias significativas.

HE4. Las características fisicoquímicas de los subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados presentan diferencias significativas entre las fracciones evaluadas.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

- Variable independiente: Pirolisis de guantes de látex.

2.5.2 Variable dependiente

- Variable dependiente: Combustible líquido

2.6 Operacionalización de variables

Tabla 1

Matriz de Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Técnica / Instrumento
Independiente: Pirolisis de guantes de látex	Proceso químico que descompone los residuos orgánicos (como guantes de látex) a altas temperaturas, produciendo gases, líquidos y sólidos (Campoverde, 2016).	Proceso realizado en un reactor a 400-500 °C, con velocidad de calentamiento de 10-20 °C/min	Temperatura	Rango térmico aplicado	° C	Mufla
			Velocidad de calentamiento	Gradiente térmico aplicado	°C/min	Termómetro digital / registro

Dependiente: Combustible líquido	Producto obtenido por pirolisis de los guantes de látex usados, con propiedades fisicoquímicas que lo hacen adecuado como fuente de energía (Hall et al., 2009).	Recolección y análisis en laboratorio de propiedades como grado API, gravedad específica, punto de inflamabilidad, composición de productos fraccionados y rendimiento.	Rendimiento	Fracción líquida obtenida respecto a la masa de guantes tratados	%	Balanza digital / hoja de cálculo
			Composición de subproductos fraccionados	% de fracción gasolina (por destilación)	%	Destilación fraccionada sencilla (ASTM D86 adaptada)
				% de fracción diésel (por destilación)	%	
				% de fracción pesada (residuo) (por destilación)	%	
			Características fisicoquímicas	Densidad	kg/m³	Picnómetro
				Gravedad especifica	Valor adimensional	picnómetro
				Grados API	°API	

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 Internacionales

Guillen & Osorio (2021) abordaron la valorización energética de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis, considerando la acumulación de estos materiales como un problema ambiental significativo. Evaluaron los hallazgos científicos sobre la producción de combustible a partir de residuos plásticos e identifica las condiciones óptimas para el proceso de pirólisis mediante el análisis de la literatura existente. Los resultados demostraron que la eficiencia del proceso depende de los parámetros operativos: específicamente, temperaturas en el rango de 200 °C a 900 °C, tiempos de residencia de entre 15 y 180 minutos y el uso de zeolitas como catalizadores. El combustible resultante presentó un punto de inflamación de 30.2–44.0 °C y un poder calorífico de 41.6–49.4 MJ/kg; asimismo, se determinó el contenido de tolueno y los rendimientos del proceso oscilaron entre el 12.8 % y el 97.0 %. Concluyendo que la pirólisis constituye una alternativa viable para la producción de combustible, siempre que se controlen adecuadamente las variables del proceso.

Díaz (2022) investigó la acumulación de residuos plásticos como un problema ambiental agravado por su larga persistencia en el medio ambiente, estimada entre 100 y 1000 años. El estudio analizó el proceso de pirólisis térmica mediante una revisión bibliográfica y estudios de caso. Los resultados mostraron que, a temperaturas de entre 400 °C y 900 °C, se obtuvieron rendimientos de producto líquido del 72 % (para el polietileno de baja densidad) y del 68 % (para el poliestireno). Asimismo, las fracciones líquida y

gaseosa pudieron aprovecharse como fuentes de energía, mientras que la fracción sólida generó coque, el cual presenta potencial para su uso como carbón activado. Por el contrario, el rendimiento para el polipropileno fue de aproximadamente el 47 %; se desaconsejó el uso de PVC debido a la liberación de compuestos tóxicos. El autor concluyó que la pirólisis dependiendo del tipo de material procesado constituye una alternativa viable para la producción de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos.

Benítez (2023) investigó la viabilidad técnica del reciclaje de residuos plásticos mediante un proceso de pirólisis termocatalítica —utilizando carbón activado en diversas configuraciones como catalizador, con el objetivo de producir combustible líquido y reducir la cantidad de plástico no reciclable. La metodología se basó en un análisis teórico del proceso de pirólisis aplicado a plásticos mixtos, evaluando el desempeño de diferentes formas de catalizador, carbón activado solo, combinado con carbón granulado y con óxido de calcio, así como las temperaturas de reacción; adicionalmente, se examinó el marco legal y la situación de la industria del reciclaje en diversas provincias argentinas. Los resultados evidenciaron rendimientos líquidos de 82.43% con carbón activado, 95.54% con carbón granulado y 75.5% con óxido de calcio. Se concluyó que la pirólisis catalítica de plásticos mixtos resulta técnicamente viable en varias regiones de Argentina, contribuyendo a la reducción de residuos plásticos y a una mejora en la gestión de los residuos sólidos urbanos. Estos aportes son aplicables al aprovechamiento de residuos hospitalarios poliméricos, como los guantes de látex, mediante procesos catalíticos orientados a la producción de combustibles líquidos.

Arthur et al. (2023) evaluaron la posibilidad de obtener combustible líquido tipo diésel a partir de guantes de látex usados mediante un proceso de pirólisis térmica, empleando guantes de examen provenientes de un laboratorio de análisis. La metodología

consistió en la recolección de aproximadamente 4 kg de guantes, los cuales fueron sometidos a pirólisis sin trituración previa en un reactor de acero inoxidable, utilizando cáscara de palma carbonizada como fuente térmica. El proceso se desarrolló en un rango de temperatura entre 350 °C y 550 °C durante 1 hora y 40 minutos, y los gases generados fueron condensados y analizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Los resultados mostraron que el rendimiento de combustible líquido osciló entre 0.40 y 0.78 litros por kilogramo de guantes pirolizados, con una densidad de 0.858 g/cm³. El combustible estaba compuesto principalmente por hidrocarburos aromáticos y alifáticos, con un contenido insignificante de naftenos. El residuo sólido contenía un 36.58 % de carbono e incluía metales como calcio y zinc, así como óxidos de titanio. El estudio concluyó que la pirólisis es una alternativa viable para la valorización energética de guantes de látex y para fomentar prácticas más sostenibles de eliminación de residuos médicos.

En respuesta al aumento del volumen de residuos médicos durante la pandemia de COVID-19, Hardjono y sus colaboradores (2023) desarrollaron un sistema sencillo de pirólisis para convertir guantes médicos desechables en un combustible alternativo. Para ello, construyeron un reactor de acero inoxidable con una capacidad de hasta 3 kg por ciclo de operación. El sistema incorporó tuberías de acero inoxidable 304 (SS-304) con un diámetro de 2 cm y dos condensadores en serie elaborados en acero inoxidable 201 (SS-201), con el propósito de mejorar la eficiencia de condensación del gas pirolítico. El equipo fue sometido a pruebas funcionales para evaluar su desempeño en la descomposición térmica de guantes médicos, sin requerir trituración previa ni el uso de catalizadores. Los resultados demostraron que el sistema permitió convertir eficientemente los guantes médicos en fueloil, evidenciando la viabilidad técnica del proceso. Los autores concluyeron que el equipo de

pirólisis desarrollado representa una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos hospitalarios no biodegradables, al reducir su impacto ambiental y permitir la generación de energía útil a partir de desechos sanitarios.

3.1.2 Nacionales

Ramos et al. (2023) determinaron las condiciones óptimas de temperatura de operación y la proporción catalizador–materia prima que influyen en el rendimiento de combustibles líquidos obtenidos a partir de mascarillas quirúrgicas desechables fabricadas con polipropileno. La metodología se desarrolló a escala de laboratorio, empleando 5000 mascarillas nuevas de tres capas, las cuales fueron caracterizadas física y químicamente mediante análisis próximo, determinación del poder calorífico y espectroscopia infrarroja, además del análisis individual de sus componentes, confirmándose la presencia predominante de polipropileno y nylon 6.6. Se utilizó el catalizador E-Cat, proceso basado demostrablemente en una combinación de craqueo catalítico y pirólisis, llevado a cabo en un reactor tubular de acero inoxidable a temperaturas de entre 500 °C y 700 °C, con una carga de catalizador del 210 %. El líquido combustible (46.7 %) puede utilizarse a temperaturas de hasta 700 °C. Asimismo, se observó que un aumento de la temperatura favorece la degradación de los polímeros, mientras que un exceso de catalizador intensifica la formación de gases. De ello se concluyó que la temperatura y la cantidad de catalizador son parámetros críticos para la valorización energética de los residuos plásticos del sector sanitario.

Tigreros (2021) llevó a cabo un estudio sobre la descomposición térmica (pirólisis) del tereftalato de polietileno (PET) para producir combustible líquido, empleando simulación computacional. Se utilizó el software "Aspen Plus" para analizar el proceso bajo diversas condiciones operativas. Los resultados demostraron la viabilidad de obtener una

fracción líquida del 34.79 % a una temperatura de 550 °C y una presión de 2 atm, confirmando así la viabilidad energética del proceso. No obstante, el análisis económico reveló que los costos de producción superan a los del diésel convencional. El estudio concluyó que la pirólisis de PET representa una alternativa viable para la producción de combustible líquido con una aplicación potencial en la valorización de residuos plásticos, a pesar de enfrentar ciertas limitaciones económicas.

Altamirano y Torres (2019) simularon la descomposición térmica (pirólisis) del polietileno utilizando el software Aspen HYSYS para producir diésel y optimizar las condiciones de operación. El modelo se basó en un caudal de alimentación de polietileno de 100 kg/h e incluyó un análisis de los productos resultantes; los resultados mostraron un rendimiento de 70.07 kg/h de diésel, 2.42 kg/h de residuo (coque) y 27.51 kg/h de gases de combustión, utilizándose estos últimos para precalentar la corriente de alimentación. Asimismo, el rendimiento global de la reacción fue del 70.19 %. Se concluyó que la simulación del proceso de pirólisis de polietileno representa una alternativa viable para la obtención de diésel, permitiendo optimizar las condiciones de operación y obtener productos con propiedades similares a los combustibles convencionales, lo que evidencia el potencial de esta tecnología para la valorización energética de residuos plásticos.

Carmona & Espinoza (2024) evaluaron la acumulación de residuos plásticos, especialmente el tereftalato de polietileno (PET), y su aprovechamiento mediante procesos de pirólisis para la obtención de combustible líquido, con la finalidad de determinar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de reacción. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental a escala de laboratorio, utilizando 500 g de PET en un reactor con atmósfera controlada, en el cual se trabajó con temperaturas de 500 °C, 550 °C y 600 °C, manteniendo un tiempo de reacción de 60 minutos. Los resultados mostraron que el

mayor rendimiento de combustible líquido se obtuvo a 550 °C, alcanzando una conversión aproximada del 14%, con una menor generación de productos gaseosos y sólidos en comparación con las demás condiciones evaluadas. Se concluyó que la pirólisis del PET constituye una alternativa viable para la valorización de residuos plásticos, siendo la temperatura de 550 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos las condiciones más eficientes para maximizar la obtención de combustible líquido. Asimismo, los hallazgos evidencian el potencial de este proceso como referencia para el aprovechamiento energético de residuos hospitalarios, como los guantes de látex, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.

Ramos et al. (2020) desarrollaron una investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura de operación y de la relación catalizador–materia prima sobre el rendimiento de productos líquidos obtenidos a partir de residuos plásticos. El estudio se realizó mediante un enfoque experimental, que incluyó el diseño y la construcción de un sistema de pirólisis a escala de laboratorio, utilizando muestras de polietileno de alta densidad provenientes de residuos sólidos urbanos. Como catalizador se empleó el catalizador de equilibrio (E-Cat) procedente de una unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de una refinería local, y los datos obtenidos fueron analizados mediante un modelo matemático de optimización de variables operativas. Los resultados evidenciaron que las condiciones óptimas correspondieron a una temperatura de 654 °C y una relación catalizador–materia prima de 1.2 %, bajo las cuales se alcanzó un rendimiento de 83.00 % de productos líquidos, 16.98 % de productos gaseosos y 0.02 % de sólidos residuales. Asimismo, el combustible líquido obtenido presentó una composición fraccionada de 9 % de corte tipo gasolina, 36 % de nafta o kerosene, 50 % de corte diésel y 5 % de residuo, lo

que permitió concluir que la pirólisis catalítica del HDPE constituye una alternativa viable para la valorización energética de residuos plásticos.

3.1.3 Regionales o locales

Ayme & Corazao (2023) desarrollaron una investigación experimental orientada a analizar el rendimiento y la composición de los líquidos obtenidos mediante pirólisis térmica de mezclas de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno. La metodología consistió en el uso de un reactor semicontinuo fabricado en acero inoxidable, en el cual se procesaron mezclas de PP y PS en proporciones de 3:1 y 1:3, empleando tamaños de partícula de 5–10 mm y 20–24 mm. Los ensayos se llevaron a cabo a temperaturas controladas de 415 °C y 450 °C, con el fin de evaluar la influencia de estas variables sobre el rendimiento del producto líquido. Los resultados mostraron que el incremento de la temperatura y una mayor proporción de poliestireno favorecieron significativamente la producción de líquido pirolítico, alcanzándose rendimientos de hasta 77 % en las condiciones más eficientes. En conclusión, el estudio ha demostró que la pirólisis térmica de residuos plásticos representa una alternativa viable para producir combustibles líquidos y valorizar estos residuos de manera más sostenible.

El estudio de Vargas (2020) investigó la degradación térmica y catalítica de residuos plásticos como alternativa al reciclaje de materiales. Se analizó la conversión de polipropileno utilizando como catalizadores dos zeolitas derivadas de ceniza del volcán Ubinas (Z1 y Z2) y una zeolita sintética ZSM-5. La metodología consistió en realizar experimentos con cargas de catalizador del 1 % y 2 %, así como en evaluar los productos resultantes como gas, líquido y cera bajo diversas condiciones de operación. Además, se llevaron a cabo pruebas con residuos plásticos reales para simular condiciones más cercanas a la práctica real.. Los resultados evidenciaron que el tipo y la proporción de catalizador

influyeron directamente en la distribución de productos, destacando que la zeolita Z2 al 1 % generó el mayor rendimiento de gases pirolíticos (51.52 ± 5.32 %), mientras que la Z1 al 2 % alcanzó el mayor rendimiento de ceras pirolíticas (21.69 ± 2.21 %) y la Z1 al 1 % produjo la mayor fracción líquida (36.48 ± 5.85 %). Utilizando residuos plásticos reales y un 1 % de zeolita Z2, se obtuvo un rendimiento de gas del 50.29 ± 3.92 %. Los análisis de espectroscopia infrarroja revelaron que los productos obtenidos con zeolitas volcánicas eran similares entre sí, pero diferían de los producidos con zeolita sintética. Se concluyó que las zeolitas volcánicas representan una alternativa viable para la pirólisis catalítica de residuos plásticos; permiten recuperar materiales con potencial energético y fomentan su uso sostenible.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Residuos Hospitalarios

Son materiales generados durante la prestación de servicios de salud que pueden presentarse en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso. Su manejo inadecuado puede provocar infecciones, accidentes e impactos ambientales (Rosales, 2023). Estos residuos requieren segregación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final para prevenir riesgos a pacientes, trabajadores y comunidad (Reyes, 2023).

A nivel global, la OMS informa que aproximadamente el 15 % de los residuos sanitarios es peligroso, mientras que el 85 % restante corresponde a residuos comunes. La generación de residuos hospitalarios aumenta debido a la demanda de servicios sanitarios y al uso masivo de insumos descartables, situación que se acentúa en picos de pandemia, como ocurrió con COVID-19 (OMS, 2024).

En el Perú, los establecimientos de salud generan alrededor de 20 000 toneladas anuales de residuos biocontaminados, concentrándose el 75 % en Lima (Jiménez y otros, 2022). Sin embargo, menos del 3 % recibe tratamiento adecuado, evidenciando una brecha significativa en la gestión sanitaria (Andina, 2017). En Lima, los hospitales, clínicas y laboratorios producen aproximadamente 56 575 toneladas anuales de residuos, de los cuales solo entre el 15 % y 20 % llega a rellenos sanitarios formales, mientras que el resto se dispone en vertederos informales o se incinera sin control (Pierre, 2014).

Esta situación constituye un problema crítico de salud pública, ya que la presencia de agentes biológicos, químicos y punzocortantes aumenta el riesgo de infecciones, accidentes laborales y contaminación ambiental, especialmente en personal de enfermería y limpieza (Abarca, 2024). La gestión adecuada de estos residuos requiere capacitación continua, protocolos claros y supervisión constante.

3.2.1.1 Clasificación y tipología de residuos hospitalarios

De acuerdo con el Ministerio de Salud del Perú (MINSA), los residuos sólidos hospitalarios se clasifican en Clase A, Clase B y Clase C, conforme a lo establecido en la Norma Técnica de Salud para la Gestión Integral y Manejo de Residuos Sólidos en Establecimientos de Salud (NTS N° 144-MINSA/2018/DIGESA) que fue aprobada por la Resolución Ministerial N° 1295-2018/MINSA, la cual orienta su manejo considerando la naturaleza y el nivel de peligrosidad de los residuos generados en los establecimientos de salud (MINSA, 2019). A continuación, en la **Tabla 2** se muestra la clasificación y tipología de los residuos sólidos hospitalarios.

Tabla 2

Clasificación y tipología de los residuos sólidos hospitalarios según el MINSA

Categoría	Caracterización general	Tipología	Residuos comprendidos
Clase A	Incluye desechos provenientes de actividades médicas que están en contacto con agentes biológicos patógenos, lo que representa un riesgo sanitario.	**Infecciosos**: Materiales contaminados con fluidos corporales. **Punzocortantes**: Objetos que pueden causar lesiones o infecciones. **Anatómicos o patológicos**: Restos de tejidos u órganos humanos.	Gasas, guantes, mascarillas, jeringas, bisturíes, restos orgánicos de cirugías o autopsias.
Clase B	Comprende residuos generados por sustancias químicas, radiactivas o farmacéuticas, que requieren manejo especial debido a su toxicidad o peligrosidad.	**Químicos**: Sustancias con propiedades corrosivas o inflamables. **Farmacéuticos**: Medicamentos caducados o deteriorados. **Radiactivos**: Materiales generados en áreas de diagnóstico por imagen o tratamiento nuclear.	Reactivos de laboratorio, medicamentos vencidos, termómetros con mercurio, residuos radiactivos de unidades de radiología.
Clase C	Se refiere a desechos de bajo riesgo sanitario, similares a los residuos domésticos, generados principalmente en áreas no clínicas.	**Orgánicos**: Restos alimenticios. **Inorgánicos reciclables**: Materiales aptos para reciclaje. **Inorgánicos no reciclables**: Descartables no reciclables.	Restos de comida, papel, cartón, plásticos, botellas, latas, envases.

Nota. Norma Técnica de Salud del Ministerio de Salud del Perú (MINSA, 2018).

3.2.1.2 Legislación vigente para la gestión de residuos hospitalarios

En el Perú, la gestión y tratamiento de residuos se rigen por normas orientadas a proteger la salud pública y reducir los impactos ambientales. En el caso de los residuos hospitalarios, existen disposiciones específicas que establecen lineamientos para su manejo adecuado desde la generación hasta su disposición final, promoviendo prácticas seguras y ambientalmente responsables. Entre las principales normas aplicables se encuentran:

- Ley N.° 28611 – Ley General del Ambiente establece los principios generales que orientan la gestión ambiental en el país, destacando la prevención de la contaminación, la protección del ambiente y el aprovechamiento sostenible de los recursos (Congreso de la República del Perú, 2005).

- Norma Técnica de Salud N° 096-MINSA/DIGESA-V.01: norma técnica nacional para la "Gestión y Manejo de Residuos Sólidos en Establecimientos de Salud y Servicios Médicos de Apoyo". Define obligaciones para hospitales y centros de salud públicos y privados, con el fin de prevenir riesgos sanitarios y ambientales mediante un manejo adecuado de residuos.

- Resolución Ministerial N° 217-2004/MINSA — "Procedimientos para el manejo de residuos sólidos hospitalarios" —: norma histórica y normativa operativa para hospitales, que regula la segregación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos hospitalarios. Se mantiene vigente como marco normativo.

- Decreto Legislativo N° 1278 — "Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos": Ley general que regula la gestión de residuos sólidos en el país, incluyendo los de establecimientos de salud. Establece responsabilidades del Estado, entidades y

generadores de residuos, y norma la gestión integral.

- Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM: Reglamento del Decreto Legislativo 1278, detalla las normas operativas para la gestión de residuos sólidos en todo el país. Es un complemento normativo esencial que mantiene vigencia desde 2017 (MINSA, 2019).

- Estas normas obligan a los establecimientos de salud a implementar sistemas de gestión integral, clasificar los residuos según su tipo (peligrosos, químicos, punzocortantes, comunes) y garantizar la supervisión por parte de DIGESA, lo que respalda la necesidad de evaluar las prácticas reales de manejo de residuos hospitalarios.

3.2.2 Guantes de látex como residuo hospitalario

El látex natural está compuesto principalmente por poli(cis-1.4-isopreno), un caucho natural obtenido del árbol Hevea brasiliensis. En su fabricación se incorporan aditivos como antioxidantes y agentes vulcanizantes (azufre), mientras que los guantes de látex sintético pueden estar elaborados a partir de nitrilo, neopreno o vinilo, derivados del petróleo (Raquez et al., 2010). Estos materiales se encuentran entre los residuos hospitalarios más comunes y, tras su uso, pueden contener fluidos biológicos o sustancias químicas, lo que los clasifica como residuos potencialmente peligrosos. Su disposición inadecuada mediante vertederos o incineración sin control puede generar emisiones contaminantes y afectar el suelo, aire y agua (World Health Organization, 2024).

3.2.2.1 Propiedades fisicoquímicas del látex natural

El caucho natural presenta bajo contenido de humedad y cenizas, así como una alta proporción de carbono fijo y materia volátil, características que favorecen su

descomposición térmica y la formación de fracciones líquidas y gaseosas. Asimismo, el análisis elemental evidencia un predominio de carbono e hidrógeno y bajas concentraciones de nitrógeno y azufre, condiciones asociadas con un mayor potencial energético del material (Myhre et al., 2012; Chittella et al., 2025). Estas propiedades se deben a su naturaleza elastomérica y estructura parcialmente reticulada, lo que determina su comportamiento durante la degradación térmica. En este sentido, el látex natural difiere de los polímeros termoplásticos por su estructura molecular y mecanismos de degradación, afectando la distribución de productos en la pirólisis.

3.2.2.2 Generación de guantes de látex usados en el Hospital de Contingencia Antonio Lorena – Cusco

Los guantes de látex utilizados en los hospitales constituyen una parte importante de los residuos biocontaminados generados durante la atención médica, debido a su uso generalizado en procedimientos clínicos y de enfermería. En el Hospital de Contingencia Antonio Lorena, Cusco, estudios previos han reportado que aproximadamente el 66 % de los residuos sólidos hospitalarios corresponden a residuos biocontaminados (Clase A), mientras que un 1 % son residuos especiales (Clase B) y cerca del 33 % residuos comunes (Clase C) (Soria, 2018).

Con base en el registro diario de generación de residuos sólidos hospitalarios del Hospital Antonio Lorena, se estimó una producción semanal aproximada de 1 946.70 kg de residuos biocontaminados. Dentro de este grupo, los guantes de látex constituyen una fracción relevante debido a su uso continuo en procedimientos clínicos, actividades asistenciales y labores de bioseguridad. Considerando la frecuencia de uso y su condición de material descartable, se estima de manera referencial que los guantes podrían representar

entre el 10 % y el 20 % de los residuos biocontaminados, lo que equivale aproximadamente a 195–390 kg por semana en el establecimiento de salud.

El manejo adecuado de este tipo de residuo resulta fundamental para reducir riesgos de contaminación y accidentes ocupacionales. Asimismo, su cuantificación permite explorar alternativas de gestión orientadas a la valorización, tales como el reciclaje especializado, la valorización energética o el aprovechamiento controlado para la producción de nuevos materiales, en concordancia con los principios de la economía circular y las directrices de gestión ambiental aplicables al sector salud.

3.2.2.3 Alternativas de valorización de guantes de látex usados

Los guantes de látex usados, considerados residuos hospitalarios, pueden ser valorizados mediante diferentes estrategias. Entre las principales alternativas se encuentran:

- **Reciclaje mecánico:** consiste en triturar y moler los guantes de látex para incorporarlos como materia prima en la fabricación de nuevos productos de caucho, pavimentos, suelas de calzado o mezclas con plásticos. Este método permite reutilizar el polímero, reduciendo la cantidad de desechos enviados a rellenos sanitarios (Chittella et al., 2021).
- **Reciclaje químico**: Consiste en transformar los guantes usados mediante procesos químicos que rompen los enlaces del polímero o devulcanizan el material, permitiendo reutilizarlos como materia prima para nuevos productos o energía. Este método facilita la reincorporación del látex a la cadena productiva y contribuye a reducir residuos hospitalarios y promover la economía circular (Myhre et al., 2012).
- **Valorización energética directa**: además de la pirólisis, los guantes de látex pueden ser empleados como combustible en incineradores industriales o cementeras, aprovechando su poder calorífico para generar energía térmica, aunque requiere

control de emisiones y sistemas de tratamiento de gases (Aguado et al., 2006).

- **Compostaje en combinación con biomateriales:** El látex natural puede degradarse parcialmente con microorganismos, especialmente al mezclarse con biomateriales, pero la degradación es lenta y limitada en guantes vulcanizados, por lo que su aplicación práctica es aún experimental (Rakmak et al, 2018).
- **Producción de nano materiales y aditivos**: los residuos de látex pueden ser utilizados para fabricar partículas de carbono, nano materiales o aditivos para hormigón y plásticos, aprovechando sus propiedades elásticas y químicas (Hazan & Chan, 2021). La elección de la alternativa depende de factores como volumen de residuos**,** infraestructura disponible**,** costos operativos**, y** normativa ambiental. En todos los casos, el objetivo es reducir el impacto ambiental de los guantes de látex usados, disminuir la cantidad de residuos enviados a disposición final y recuperar valor mediante energía o materiales útiles.

3.2.3 Pirólisis

Es un proceso termoquímico que convierte los residuos plásticos en productos útiles como combustibles líquidos y gaseosos, al ser descompuestos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este proceso reduce el volumen de los plásticos y genera productos energéticos, cuya composición depende de las condiciones operativas, como la temperatura y la presión (Amar & Ardila & Barrera, 2019).

La pirólisis se aplica a diversos tipos de plásticos, incluyendo PVC (policloruro de vinilo), PET (tereftalato de polietileno), PE (polietileno de baja y alta densidad, LDPE y HDPE), PP (polipropileno) y PS (poliestireno). Cada tipo de plástico produce diferentes proporciones de líquidos, gases y sólidos, y sus propiedades químicas influyen en la calidad del combustible obtenido. El uso de modelos computacionales, como Aspen Plus, permite

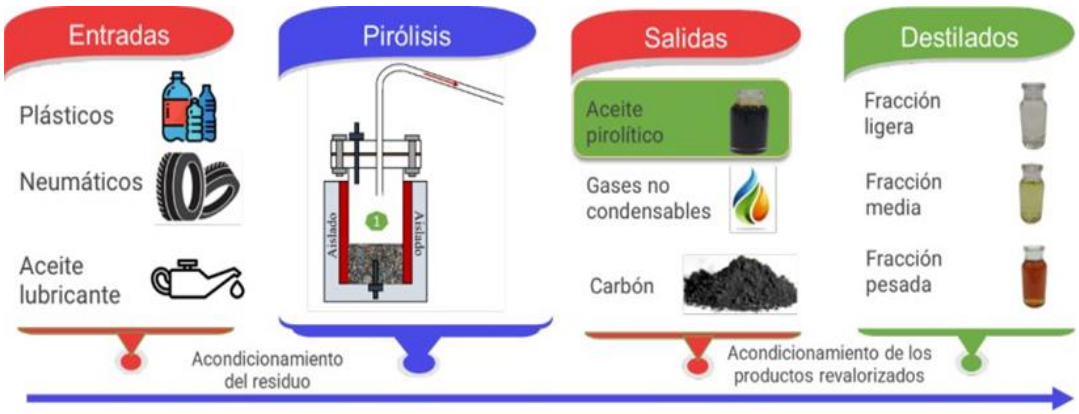
simular y optimizar el proceso de pirolisis, evaluando cómo las variables operativas y la composición del plástico afectan la eficiencia y los productos resultantes (Amar, Ardila & Barrera, 2019).

3.2.3.1 Mecanismo de pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone residuos plásticos en aceite pirolítico, gases y carbón en ausencia de oxígeno. Se desarrolla en etapas: secado y des volatilización, descomposición primaria de las cadenas poliméricas, craqueo de productos y condensación de vapores. Parámetros como temperatura, tiempo de residencia, presión, velocidad de calentamiento y tipo de plástico influyen en la proporción y calidad de los productos obtenidos: Temperaturas moderadas y tiempos controlados favorecen la producción de aceite, mientras que temperaturas altas y tiempos prolongados aumentan gases y carbón (Amar, Ardila & Barrera, 2019) (Flores et al., 2022). La **Figura 1** esquematiza el proceso de pirolisis:

Figura 1

Esquema del sistema de pirolisis



Nota. De “Proceso generalizado de pirólisis” por Flores et al. (2022).

Para comprender la formación de los productos obtenidos, es necesario analizar el mecanismo de reacción que ocurre durante la pirólisis de los polímeros. Desde el punto de

vista químico, este proceso implica la ruptura térmica de enlaces covalentes mediante mecanismos de radicales libres, principalmente escisión aleatoria (*random scission*) y despolimerización (AGUADO y otros, 2006). De forma general, la pirólisis puede representarse como:

$$(C_{\Pi}H_n)_x \xrightarrow{\Delta} hidrocarburos\ lıquidos + gases + residuos\ solidos\ (char) \quad (1)$$

Donde $(C_{\Pi}H_n)_x$ representa el polímero, Δ indica la aplicación de calor y los productos corresponden a hidrocarburos en diferentes fases.

En polímeros como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), predominan reacciones de escisión aleatoria que generan radicales libres:

$$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2- \xrightarrow{\Delta} -CH_2\cdot + \cdot CH_2-CH_2- \quad (2)$$

Donde · indica la presencia de un radical libre.

Estos radicales sufren reacciones secundarias como β-scission, produciendo olefinas y parafinas:

$$R-CH_2-CH_2\cdot \rightarrow R-CH_2=CH_2+H\cdot \quad (3)$$

Donde R representa una cadena hidrocarbonada.

En el caso del poliestireno (PS), el mecanismo dominante es la despolimerización, generando principalmente monómero de estireno:

$$(C_8H_8)_n \xrightarrow{\Delta} n(C_8H_8) \quad (4)$$

Estas rutas de reacción explican la formación de productos líquidos (aceite pirolítico), gases ligeros (CH_4, C_2H_4, H_2) y residuos carbonosos, cuya distribución depende

de las condiciones operativas como la temperatura y el tiempo de residencia (Aguado, Serrano & Escola, 2006; Sharuddin et al., 2016).

3.2.3.2 Productos de pirolisis

La pirólisis de residuos plásticos genera tres tipos principales de productos:

- **Producto gaseoso:** El gas generado en la pirólisis está compuesto principalmente por hidrocarburos ligeros como metano, etano, propano y butano, además de gases como CO, CO_2 y H_2. Este gas es combustible y puede emplearse para alimentar el propio reactor o para generar energía térmica. Su proporción aumenta al incrementar la temperatura y el tiempo de residencia de los residuos (Flores et al.,2022)
- **Producto condensable o líquido (aceite pirolítico):** El aceite pirolítico es una mezcla de hidrocarburos líquidos con propiedades similares a la gasolina o el diésel. Su rendimiento y composición dependen del tipo de plástico procesado, la temperatura y el tiempo de residencia durante la pirólisis. Este producto constituye la principal fuente energética del proceso y puede refinarse o emplearse directamente como combustible alternativo (Amar et al., 2019).
- **Producto sólido (residuo carbonoso o carbón):** El residuo sólido resultante es un material carbonoso con bajo contenido energético, producto de la descomposición incompleta de los polímeros. Puede utilizarse como combustible sólido o como material adsorbente en procesos industriales. La cantidad de residuo sólido tiende a aumentar con temperaturas elevadas y tiempos prolongados de residencia (Amar et al., 2019).

En conjunto, la pirólisis permite recuperar energía y materiales de los residuos plásticos, optimizando la proporción de cada producto mediante el control de parámetros operativos y el tipo de plástico empleado (Amar et al., 2019; Fierro, 2021).

3.2.3.3 Tipos de pirólisis

Campoverde (2016) menciona que, desde un aspecto operativo, los tipos de pirólisis se dividen en tres grupos principales según las condiciones de operación, especialmente la temperatura (la cual no debe superar los 800 °C) el tiempo de reacción. Estos grupos son: pirólisis lenta, media y rápida. La pirólisis lenta se lleva a cabo a temperaturas bajas (por debajo de 400 °C) y con un tiempo de calentamiento prolongado. Este proceso tiene como objetivo obtener productos sólidos, como biocombustibles, y es conocido como carbonización. La pirólisis media, realizada entre 400ºC y 600 °C, genera principalmente gases como metano y otros hidrocarburos, siendo el proceso intermedio entre la lenta y la rápida (Ordoñez et al., 2023). Por otro lado, la pirólisis rápida se realiza a temperaturas superiores a 600 °C, con tiempos de reacción más cortos y una alta velocidad de calentamiento. Este tipo de pirólisis se enfoca en la producción de biocombustibles líquidos. La **tabla 3** resume los tres tipos de pirolisis mencionados.

Tabla 3

Comparación de los tipos de pirolisis

Pirolisis	Temperatura °C	Velocidad de calentamiento, (°C/s)	Tiempo de residencia (s)	Producto mayoritario
Lenta	< 400	~2 °C/s	Gases 5 s	Char (sólido) + líquidos y gases
Media	400 a 600	> 2 °C/s	Gases: <2 s	Líquidos condensables (bio-oil) + gases y char
Rápida	> 600	> 200 °C/s	Gases: < 0.5 s	Gases e hidrocarburos ligeros + líquidos y char

Nota. De “Comparación de los procesos de pirolisis” por Campoverde, 2016.

Las diferencias entre estos tres tipos de pirólisis dependen principalmente de la temperatura utilizada y el tiempo de retención de los materiales en el proceso, lo que determina los productos finales obtenidos (Ordoñez et al.., 2023)

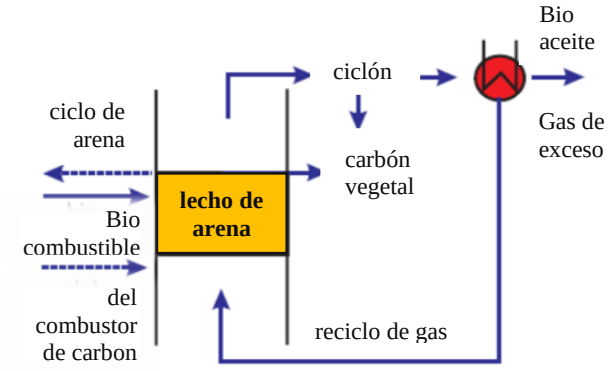
3.2.3.4 Tipos de reactores pirolíticos

Los reactores pirolíticos se diferencian por su diseño, régimen de operación y por cómo gestionan la materia prima; entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- **Reactor de lecho fijo (fixed-bed):** este diseño dispone la materia prima (plásticos, caucho, residuos) en un lecho estático que se calienta externamente; no hay movimiento de sólidos dentro del reactor. Es frecuente en laboratorios o escalas pequeñas, debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de operación (Wang & Choi, 2024).

Figura 2

Esquema del reactor de pirólisis rápida en lecho fijo



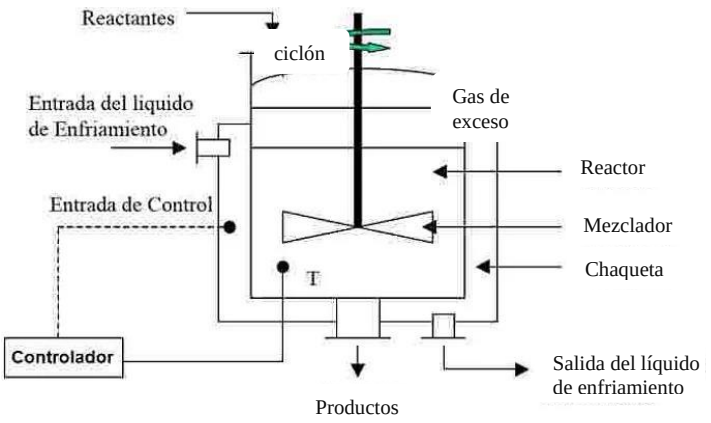
Nota. Adaptado de “Pirólisis rápida de biomasa” (Montoya et al., 2014).

- **Reactor batch (discontinuo):** en este régimen se carga una cantidad limitada de material, se cierra el reactor, se realiza la pirolisis y luego se descarga el residuo y los productos. Es útil para pruebas, experimentación o plantas pequeñas, donde se

privilegia el control del proceso sobre la producción continua (Sharuddin et al., 2016).

Figura 3

Reactor batch (discontinuo)

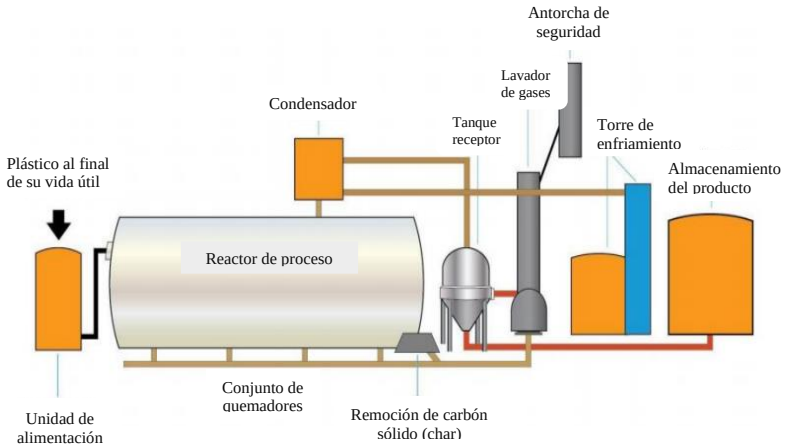


Nota. Reactores intermitentes o reactores batch Adaptado de Sharuddin et al. (2016).

- **Reactor de horno rotatorio / sinfín**: este diseño permite procesar materia prima heterogénea o en volumen mayor, moviendo los residuos dentro de un cilindro giratorio o mediante un tornillo que transporta el material ideal para residuos voluminosos. Funciona en forma continua o semi-continua(Soliman et al., 2025).

Figura 4

Reactor de horno rotatorio / sinfín

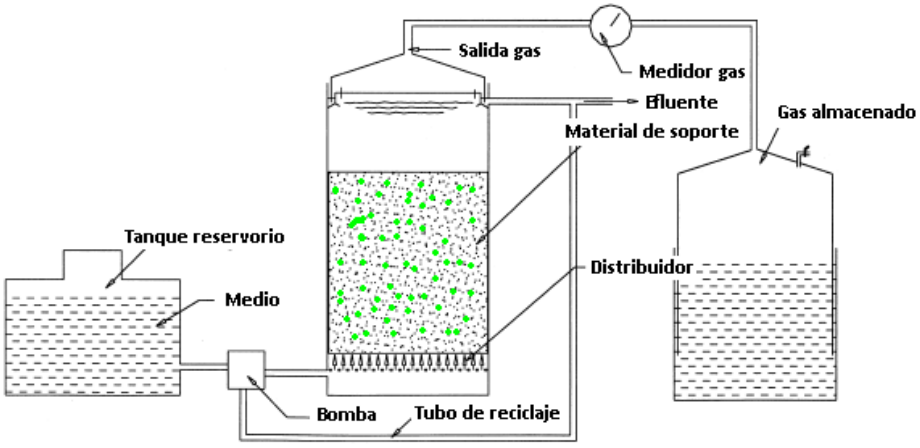


Nota. Adaptado de Pyrolysis of Plastic Waste to Environmentally Friendly Products (Pandey, 2020).

- **Reactor de Lecho Fluidizado (FBR):** (Fluidized Bed Reactor) es un tipo de reactor químico en el cual un fluido (gas o líquido) fluye verticalmente hacia arriba a través de un lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para suspenderlas y ponerlas en estado de fluidización. En estas condiciones, el sólido se comporta de manera similar a un fluido, lo que mejora significativamente la transferencia de calor y masa, la mezcla y el control de la temperatura, permitiendo reacciones altamente eficientes. Este tipo de reactor es ampliamente utilizado en la industria petroquímica, el tratamiento de aguas, la producción de polímeros y procesos catalíticos y termoquímicos como la pirólisis (Kunii & Levenspiel, 2013)

Figura 5

Reactor tipo fluidizado



Nota. Esquema de un reactor de lecho fluidizado. Adaptado de Rajeshwari et al. (2000). En un biorreactor de este tipo, empleando gel como material de soporte y un tiempo de retención hidráulica (HRT) (Show et al., 2008).

La selección del tipo de reactor pirolítico depende de la escala de operación, el tipo y la homogeneidad de los residuos, así como del objetivo del proceso. Mientras los reactores de lecho fijo y batch son adecuados para pequeñas cantidades y experimentación, los

reactores fluidizados y de horno rotatorio permiten un procesamiento más eficiente y continuo de materiales heterogéneos, optimizando la recuperación de productos energéticos y sólidos útiles.

3.2.3.5 Fraccionamiento del aceite pirolítico

Después de la pirolisis, el aceite bruto obtenido es normalmente sometido a destilación fraccionada para separar las distintas fracciones como: gasolina, diésel y residuos pesados, según sus puntos de ebullición. Este fraccionamiento permite mejorar la calidad del combustible obtenido, ajustándolo a las especificaciones de combustibles convencionales. Una de las alternativas es mediante destilación al vacío por el cual sea logrado obtener cortes con características similares a diésel comercial, gasolina liviana y residuos pesados, con rendimientos importantes (Jahirul et al., 2023).

La destilación de aceite pirolítico se realiza utilizando columnas de destilación al vacío, con cortes definidos según la temperatura de ebullición. Por ejemplo, <170 °C para fracción liviana (gasolina/naphtha), 170–380 °C para diésel, y >380 °C para residuos pesados o residuos carbonosos. Para estos cortes de temperatura, las presiones de vacío típicas son de aproximadamente 1-10 torr para la fracción liviana, 10-50 torr para el diésel y 50-100 torr para los residuos pesados (Gurram et al., 2024). El proceso es altamente sensible al control de temperatura, presión de vacío y reflujo, ya que estos parámetros determinan la pureza y el rendimiento de cada fracción obtenida.

3.2.3.5.1 Rangos de temperatura de ebullición por fracción según tipo de destilación

Según Speight (2006), la temperatura de ebullición de las fracciones del petróleo depende de la presión de operación del proceso de destilación. Al disminuir la presión, las

fracciones hierven a temperaturas reales menores, manteniendo equivalencias con los rangos atmosféricos. La **tabla 4 y 5** muestran el fraccionamiento de petróleo.

Tabla 4

Fracciones del petróleo y rangos de ebullición según el tipo de destilación

Fracción	Destilación atmosférica (ASTM D86) (°C)	Destilación fraccionada de crudo (ASTM D2892) (°C)	Destilación al vacío (ASTM D1160) (°C)
Gases livianos	< 30	< 30	—
Nafta liviana / gasolina	30 – 70	30 – 70	10 – 50
Nafta media	70 – 100	70 – 100	50 – 80
Nafta pesada	100 – 150	100 – 150	80 – 110
Kerosene liviano	150 – 200	150 – 200	110 – 150
Kerosene pesado	200 – 240	200 – 240	150 – 170
Gasoil (diésel)	240 – 350	240 – 350	170 – 250
Aceites pesados	> 350	> 350	250 – 380
Alquitranes / residuos	—	—	> 380

***Nota*.** Obtenido de *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure (ASTM D86); Standard Test Method for Distillation of Crude Petroleum (ASTM D2892); Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure (ASTM D1160)* (ASTM International, 2018).

Tabla 5

Condiciones de presión asociadas al tipo de destilación

Fracción de combustible	Tipo de destilación	Presión típica (atm)
Gasolina	Atmosférica	≈ 1
Diésel	Atmosférica / vacío	1 – 0.01
Aceites pesados	Vacío (ASTM D1160)	0.01 – 0.001
Residuo	Vacío	< 0.01

Nota. Obtenido de *Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure (ASTM D86); Standard Test Method for Distillation of Crude Petroleum (ASTM D2892); Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure (ASTM D1160)* (ASTM International, 2018).

Los rangos de ebullición de las fracciones del petróleo varían en función del tipo de destilación y de la presión de operación. Mientras que en destilación atmosférica las separaciones se producen a temperaturas elevadas, la aplicación de vacío permite reducir la temperatura real de ebullición, favoreciendo la recuperación de fracciones pesadas sin degradación térmica. Estas diferencias resultan fundamentales para la selección del proceso de destilación y la interpretación de las curvas de destilación conforme a las normas ASTM.

3.2.3.6 Potencial de toxicidad de los productos de pirólisis del látex

La pirólisis del caucho natural y residuos de látex se considera una alternativa de valorización dentro del reciclaje químico, ya que permite la obtención de aceites, gases combustibles y residuos carbonosos (Fazli & Rodrigue, 2020; Myhre et al., 2012). Sin embargo, la literatura reporta que este proceso puede generar compuestos orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y especies sulfuradas asociadas a la degradación de caucho vulcanizado, particularmente en presencia de aditivos como acelerantes y compuestos con azufre (Reddy & Quinn, 1997; Chandra & Rustgi, 1998).

La generación de estos subproductos depende de variables operativas como la temperatura, el tiempo de residencia y la atmósfera de reacción, factores que condicionan la composición final de los productos obtenidos (Oury, Limasset, & Protois, 1997). La pirólisis, aunque se reconoce como una tecnología de valorización, requiere ser evaluada de manera integral en términos de rendimiento y posibles implicancias ambientales asociadas (Fazli & Rodrigue, 2020).

3.3 Definiciones de términos

- **Pirólisis:** Es un proceso térmico sin oxígeno que descompone materiales orgánicos en líquidos, sólidos y gases. Se compone de tres etapas: alimentación, conversión y obtención de productos (Timaná, 2024).
- **Guantes de látex:** Son utilizados en hospitales para proteger contra riesgos biológicos y químicos. Se deben elegir según la tarea, existiendo guantes para examen/tratamiento y quirúrgicos. Un uso incorrecto puede comprometer la seguridad (Mazón & Orriols, 2018).
- **Temperatura:** Magnitud física que indica el nivel térmico al que se somete un sistema durante un proceso, la cual influye directamente en la evaporación, separación de fracciones y estabilidad térmica de los compuestos tratados (Gurram et al., 2024).
- **Velocidad de calentamiento**: Tasa a la cual se incrementa la temperatura de un material por unidad de tiempo durante un proceso térmico, expresada generalmente en °C/min, determinando la cinética de evaporación y la formación de productos (Gurram et al., 2024).
- **Rendimiento**: Relación cuantitativa entre la cantidad de producto obtenido y la cantidad de materia prima procesada, expresada en porcentaje o fracción, utilizada para evaluar la eficiencia del proceso (Campoverde, 2016).
- **Productos fraccionados**: Conjunto de corrientes o fracciones separadas durante un proceso de destilación, diferenciadas según sus rangos de ebullición, composición y propiedades físicas (Gurram et al., 2024).
- **Características fisicoquímicas:** Propiedades físicas y químicas que describen el comportamiento de una sustancia, tales como densidad, viscosidad, punto de

ebullición, composición y estabilidad, empleadas para su identificación y evaluación de calidad (Gurram et al., 2024).

- **Grados API:** Los grados API (American Petroleum Institute gravity) son una medida utilizada en la industria petrolera para expresar la densidad relativa del petróleo respecto al agua, indicando si un crudo es liviano o pesado. Un mayor valor de grados API indica un petróleo menos denso y, por tanto, de mayor valor comercial (Speight, 2006).
- **Gravedad específica:** Es una magnitud adimensional que representa la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de una sustancia de referencia, generalmente el agua a 4 °C para líquidos (Cengel & Cimbala, 2013).
- **Densidad:** Es una propiedad física fundamental que describe la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. Es una propiedad intensiva que no depende de la cantidad de materia presente (Cengel & Cimbala, 2013).

III. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es aplicativo, el cual se centrará en la utilización de los conocimientos adquiridos a través de la investigación, ello con la finalidad de resolver problemas prácticos o mejorar procesos en contextos específicos. En este tipo de investigación, los resultados obtenidos tienen una aplicación directa y concreta, en la cual se busca un impacto real en la solución de situaciones o la mejora de condiciones en el ámbito de estudio (Hernández et al., 2003). En la presente investigación se aplicó el conocimiento científico y técnico con el propósito de resolver un problema práctico, orientado a la valorización de guantes de látex del Hospital Contingencia Antonio Lorena mediante la obtención de combustible líquido por pirólisis.

Es de nivel explicativo. Los estudios explicativos buscan identificar las causas de los fenómenos o eventos, más allá de simplemente describirlos o establecer relaciones entre conceptos. Su objetivo es explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones, así como la razón de la relación entre varias variables (Hernández et al., 2003). La presente tesis tuvo como finalidad optimizar la pirólisis de guantes de látex usados provenientes del Hospital de Contingencia Antonio Lorena, enfocándose en analizar cómo la temperatura y la velocidad de calentamiento influyeron en el rendimiento del combustible líquido obtenido. El objetivo fue optimizar la eficiencia del proceso y reducir los costos operativos, ofreciendo así una alternativa sostenible para el manejo de residuos hospitalarios.

4.1.1 Diseño de investigación

Se estableció un diseño experimental para investigar la pirólisis bajo diversas combinaciones de temperatura (400, 450 y 500 °C) y velocidad de calentamiento (10, 15 y 20 °C/min). Cada condición experimental se llevó a cabo mediante réplicas independientes, lo que resultó en un total de 18 ensayos experimentales. Este planteamiento permitió analizar la reproducibilidad del proceso, así como la consistencia del rendimiento de combustible líquido. Los detalles relativos al diseño experimental se presentan en la **Tabla 6.**

Tabla 6

Diseño experimental

Prueba	Prueba	Temperatura (°C)	Réplica	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Rendimiento (%)
1	T450_V15	450	1	15	-
2	T400_V10	400	1	10	-
3	T500_V10	500	1	10	-
4	T400_V20	400	1	20	-
5	T500_V20	500	1	20	-
6	T450_V15	450	1	15	-
7	T450_V15	450	2	15	-
8	T400_V10	400	2	10	-
9	T500_V10	500	2	10	-
10	T400_V20	400	2	20	-
11	T500_V20	500	2	20	-
12	T450_V15	450	2	15	-
13	T450_V15	450	3	15	-
14	T400_V10	400	3	10	-
15	T500_V10	500	3	10	-
16	T400_V20	400	3	20	-
17	T500_V20	500	3	20	-
18	T450_V15	450	3	15	-

Tabla 7

Niveles de los factores

Nivel	Temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)
Superior (+1)	500	20
Central (0)	450	15
Inferior (−1)	400	10

Las **tablas 6 y 7** presentan el diseño experimental empleado para evaluar la influencia de la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento en el rendimiento (%) del combustible obtenido. Se consideraron tres niveles para cada factor: bajo (400 °C y 10 °C/min), medio (450 °C y 15 °C/min) y alto (500 °C y 20 °C/min). Cada combinación experimental fue repetida dos veces con el fin de asegurar la reproducibilidad de los resultados y reducir la variabilidad experimental.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1 Ámbito temporal

Temporalmente el estudio abarcó desde el mes de mayo del 2024 hasta setiembre del 2025, periodo en el cual se recolectaron, procesaron y evaluaron los guantes de látex usados provenientes del Hospital de Contingencia Antonio Lorena.

4.2.2 Ámbito espacial

La presente investigación se desarrolló en el laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Aire de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Tecnológica de los Andes (UTEA), sede Cusco, donde se llevaron a cabo tanto las pruebas experimentales de pirólisis como los análisis fisicoquímicos del combustible líquido obtenido.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población de estudio estuvo conformada por guantes de látex usados y desechados como residuos hospitalarios generados en el Hospital de Contingencia Antonio Lorena. Estos corresponden a materiales de un solo uso, generalmente clasificados como no reciclables mediante métodos convencionales debido a su posible contaminación biológica y a su composición polimérica.

Estos residuos se encontraron dentro del flujo de residuos hospitalarios que, desde una perspectiva de valorización de materiales, son susceptibles de ser aprovechados mediante procesos termoquímicos como la pirólisis.

4.3.2 Muestra

La muestra de estudio estuvo constituida por 3600 g de guantes de látex usados del Hospital de Contingencia Antonio Lorena, los cuales fueron recolectados al azar y por conveniencia. Esa cantidad fue distribuida para los 18 ensayos experimentales de pirolisis, en cada ensayo (prueba) se emplearon 200 g de guantes de látex.

4.3.3 Muestreo

La muestra de estudio estuvo constituida por 3600 g de guantes de látex usados provenientes del Hospital de Contingencia Antonio Lorena, los cuales fueron recolectados de manera aleatoria dentro del flujo de residuos hospitalarios disponibles.

La masa total fue distribuida en 18 ensayos experimentales de pirólisis, empleándose 200 g de material por cada prueba. Esta cantidad fue establecida en función de la capacidad operativa del reactor utilizado a escala de laboratorio, así como para asegurar una adecuada transferencia de calor, homogeneidad del material y condiciones reproducibles durante el proceso termoquímico. De esta manera, el tamaño de muestra por ensayo se mantuvo constante en todas las pruebas experimentales, garantizando la comparabilidad de los resultados obtenidos.

4.4 Instrumentos

Las técnicas e instrumentos para la recolección de datos fueron esenciales en esta investigación, ya que permitieron obtener información precisa y confiable.

En la presente investigación se emplearon las siguientes técnicas:

- **Observación directa**, utilizada durante el desarrollo de los ensayos de pirólisis para registrar el comportamiento del proceso y las condiciones operativas.
- **Experimentación**, aplicada en el proceso de pirólisis de guantes de látex bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad de calentamiento.
- **Análisis de laboratorio**, empleado para determinar las propiedades fisicoquímicas del combustible líquido obtenido.

A continuación, en la **Tabla 8** se describen los instrumentos y materiales utilizados en la investigación:

Tabla 8

Instrumentos y materiales para la destilación del aceite pirolítico

Instrumentos de medición		
Instrumentos	**Descripción**	**Función específica en el proceso**
Probetas graduadas	Recipientes de medición volumétrica con escala calibrada	Cuantificar volúmenes de combustible y fracciones destiladas
Balanza de precisión(Marca: AND)	Instrumento digital de alta sensibilidad para medición de masa	Determinar la masa de guantes y de los productos obtenidos
Termómetros de alta precisión	Serie de calibración: LFB-3883-2025; sensores térmicos analógicos	Monitorear las temperaturas durante las etapas de pirólisis y destilación
Higrómetro	Instrumento para medir la humedad relativa del ambiente	Controlar las condiciones ambientales del laboratorio, que pueden influir en la reproducibilidad del proceso
Cronómetros	Dispositivos digitales de medición temporal	Controlar los tiempos de calentamiento y la duración de cada etapa del proceso
Mufla eléctrica digital con controlador PID	Equipo de calentamiento con control programable de temperatura y tiempo	Generación y control de las condiciones térmicas del proceso de pirólisis

4.4.1.1 Equipos de pirolisis y equipo de destilación fraccionada

A continuación, en la **Tabla 9 y Figura 6** se detalla los componentes del equipo de pirolisis:

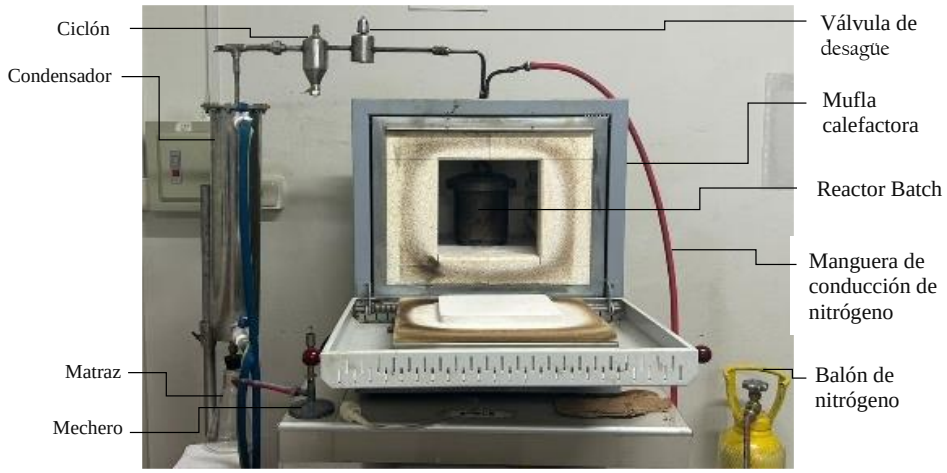
Tabla 9

Componentes del sistema de pirolisis

Componente	Descripción
Reactor	Reactor cilíndrico de acero inoxidable, herméticamente sellado, con volumen útil de 2 litros.
Sistema de calefacción	Mufla eléctrica digital con controlador PID para temperatura y tiempo.
Condensador	Serpentín metálico en espiral, sumergido en recipiente con agua fría (baño de condensación).
Campana extractora	Dispositivo de extracción de gases ubicado sobre la mufla, para evacuar vapores no condensados.

Figura 6

Equipo pirolítico



***Nota*:** Montaje experimental de pirólisis, conformado por una mufla que actúa como recámara térmica donde se ubica el reactor con látex, conectado a un sistema de condensación para la recuperación de combustibles líquidos y a una salida de gases no condensables.

Para realizar la separación de las fracciones del combustible líquido obtenido por pirólisis, se utilizó un sistema de destilación fraccionada operado a presión reducida. El montaje experimental estuvo compuesto por diferentes equipos e instrumentos que permitieron controlar la temperatura, la presión y la condensación de los vapores generados durante el proceso. En la **Tabla 10** se describen

los principales componentes que conformaron el sistema experimental mientras que en la **Figura 7** se muestra el equipo de destilación utilizado.

Tabla 10

Componentes del equipo de destilación fraccionada

Componente	Descripción
Matraz de destilación	Recipiente de vidrio resistente al calor donde **se colocó** la muestra de combustible líquido para su calentamiento y posterior separación de fracciones según su punto de ebullición.
Termómetro	Instrumento **utilizado** para medir y monitorear la temperatura del vapor durante el proceso de destilación, lo que **permitió identificar** los rangos de ebullición de cada fracción.
Condensador tipo serpentín	Dispositivo de vidrio por el cual **circuló** agua de enfriamiento, lo que **permitió condensar** los vapores generados durante la destilación y **transformarlos** nuevamente en fase líquida.
Matraz recolector del destilado	Recipiente donde **se recogió** el líquido condensado proveniente del condensador, correspondiente a las diferentes fracciones del combustible destilado.
Baño térmico (aceite)	Sistema de calentamiento indirecto que **utilizó** aceite como medio térmico para **distribuir** el calor de manera uniforme al matraz de destilación.
Placa calefactora	Equipo eléctrico que **proporcionó** la energía térmica necesaria para **calentar** el baño de aceite y **mantener** la temperatura del proceso de destilación.
Bomba de vacío	Dispositivo que **redujo** la presión del sistema para **realizar** la destilación a presión reducida, lo que **permitió disminuir** las temperaturas de ebullición de los compuestos.
Manómetros de vacío	Instrumentos de medición **utilizados** para **monitorear** la presión dentro del sistema de destilación y **asegurar** que el proceso se realizara bajo condiciones controladas de vacío.

Figura 7

Equipo de destilación fraccionada



4.4.2 Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación

La validez de los instrumentos utilizados en la presente investigación se garantizó mediante el uso de equipos de laboratorio adecuados para el tipo de mediciones realizadas, tales como balanza de precisión, termómetros y material volumétrico. Estos equipos cuentan con especificaciones técnicas de precisión definidas por el fabricante y fueron verificados antes de su uso para asegurar su adecuado funcionamiento dentro de las condiciones experimentales. Asimismo, se consideraron criterios de trazabilidad indirecta mediante el uso de equipos calibrados de fábrica y procedimientos estándar de medición, lo que permitió asegurar la consistencia de los datos obtenidos.

La confiabilidad de los resultados se reforzó mediante la repetición de los ensayos en triplicado bajo condiciones operativas controladas, manteniendo constantes las variables de proceso. Esto permitió reducir la variabilidad experimental y garantizar la reproducibilidad de los datos obtenidos.

4.5 Procedimientos

La presente investigación tuvo como finalidad obtener combustible líquido a partir de guantes de látex usados mediante pirólisis. A continuación, se describe de manera secuencial, sistemática y detallada el procedimiento experimental desarrollado.

4.5.1 Recolección y preparación de guantes de látex usados

El material de estudio consistió en guantes de látex usados, recolectados del Hospital de Con El material de estudio estuvo constituido por guantes de látex usados, recolectados en el Hospital de Contingencia Antonio Lorena, ubicado en la ciudad de Cusco. La selección del material se realizó manualmente, descartándose aquellos guantes que presentaban signos visibles de fluidos biológicos, restos orgánicos o contaminantes peligrosos, de acuerdo con la Norma Técnica de Salud N.° 144-MINSA/DIGESA (2018) para la gestión de residuos sólidos en establecimientos de salud.

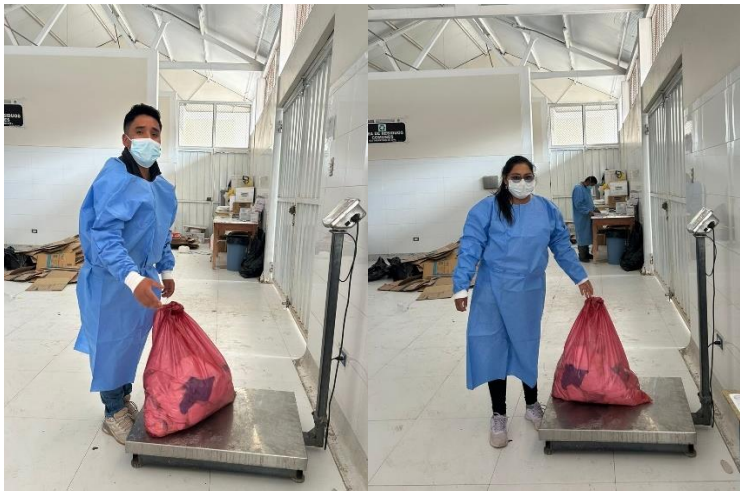
La recolección y manipulación del material se efectuaron bajo estrictos protocolos de bioseguridad, empleando equipos de protección personal adecuados, tales como guantes nuevos, bata de laboratorio y mascarilla, conforme a las directrices de clasificación, segregación y almacenamiento preliminar establecidas en la normativa sanitaria vigente.

Con el objetivo de garantizar la inactivación microbiológica y minimizar el riesgo biológico asociado al manejo del residuo, los guantes seleccionados fueron sometidos a un proceso de autolavado previo. Dicho procedimiento se realizó en una autoclave de laboratorio, utilizando vapor de agua saturado a 121 °C, una presión aproximada de 15 psi y un tiempo de exposición de 20 minutos, condiciones estándar para la esterilización de residuos hospitalarios no punzocortantes.

Finalizado el ciclo de autolavado, el material fue enfriado a temperatura ambiente, secado y almacenado en recipientes limpios y herméticos hasta su utilización en los ensayos de pirólisis, asegurando condiciones seguras y homogéneas para el desarrollo experimental.

Figura 8

Recolección y pesado de las muestras de guantes de látex



Los guantes fueron fragmentados en piezas de aproximadamente 2 × 2 cm para facilitar su procesamiento en la pirólisis, en línea con prácticas comunes de valorización de residuos de látex (Cuevas et al., 2024).

4.5.2 Procedimiento de pruebas de pirolisis

En cada ensayo se emplearon 200 g de guantes de látex usados secos. Una vez ingresado el material en el reactor, se cerró herméticamente para evitar fugas de vapor, y posteriormente se programaron los parámetros de operación en la mufla, de acuerdo con las condiciones definidas en el diseño experimental: temperatura de 400, 450 o 500 °C, velocidades de calentamiento de 10, 15 o 20 °C/min y el tiempo de residencia fue 40 min para cada prueba o prueba.

Durante el proceso, los vapores generados fueron conducidos a través de un tubo de tipo serpentín refrigerado con agua para permitir su condensación y, finalmente, el producto líquido obtenido fue recolectado en frascos de vidrio previamente acondicionados con sistema de enfriamiento (el matraz recolector de combustible líquido se colocó en un recipiente con hielo para permitir su enfriamiento del combustible). Al finalizar cada ensayo, el sistema se dejó enfriar de manera natural antes de proceder a la apertura del reactor, y

posteriormente se efectuó la limpieza respectiva, con el fin de asegurar la reproducibilidad de los experimentos en las pruebas sucesivas.

4.5.3 Cálculo del rendimiento (%)

El rendimiento del combustible líquido pirolítico obtenido durante el proceso de pirolisis se evaluó mediante un método gravimétrico, calculándose como la relación porcentual entre la masa del producto obtenido (combustible líquido) y la masa inicial del material (guantes de látex) alimentado al proceso.

Este procedimiento se fundamentó en el balance de masa del sistema y correspondió a una práctica técnica común en estudios de pirólisis y fraccionamiento de combustibles, la cual no se encuentra regulada por una norma ASTM específica, sino que se sustenta en criterios de ingeniería de procesos (Bridgwater, 2012; Gurram et al., 2024).

El rendimiento se calculó empleando la siguiente expresión:

$$R = \frac{m_p}{m_i} \times 100\% \quad (5)$$

Donde:

R: Rendimiento porcentual (%)

m_p: masa de producto obtenido (g)

m_i: masa inicial de materia prima (g)

4.5.4 Optimización del rendimiento

La evaluación del rendimiento del combustible líquido obtenido por pirólisis se realizó mediante el análisis del modelo de regresión ajustado, con el fin de identificar las condiciones operativas asociadas al mayor rendimiento dentro del rango experimental estudiado.

El modelo empleado corresponde a una ecuación empírica de primer orden con interacción, expresada como:

$$Y = \beta 0 + \beta 1T + \beta 2V + \beta 12(T \cdot V) \quad (6)$$

Dónde:

Y es el rendimiento del combustible líquido (%),

T es la temperatura de reacción (°C),

V es la velocidad de calentamiento (°C/min),

β0, β1, β2, β12 son los coeficientes obtenidos a partir del ajuste del modelo experimental.

La identificación de las condiciones de mayor respuesta se realizó mediante evaluación directa del modelo dentro de los niveles experimentales establecidos, considerando los límites operativos de 400–500 °C y 10–20 °C/min. En este contexto, la herramienta Solver de Microsoft Excel se utilizó únicamente como apoyo numérico para la verificación de la combinación de factores asociada al mayor valor estimado del modelo.

Finalmente, se comparó el rendimiento estimado del modelo con los valores experimentales obtenidos, observándose diferencias no significativas ($p > 0.05$), lo que indica consistencia entre el comportamiento del modelo y los datos experimentales dentro del rango estudiado.

4.5.5 Procedimiento de fraccionamiento del combustible líquido de pirolisis

Después de obtener el combustible líquido pirolítico, este fue sometido a un proceso de fraccionamiento mediante destilación al vacío, con el objetivo de separar sus componentes según sus rangos de temperaturas de ebullición. El destilado recolectado se transfirió a un matraz de destilación y se montó el sistema experimental, conformado por una columna corta, un termómetro ubicado en la parte superior, un condensador de serpentín, un recipiente colector y un sistema de generación de vacío, asegurando el sellado adecuado de todas las uniones como se observa en la **Figura 7**.

El procedimiento se desarrolló tomando como referencia la norma ASTM D1160 (Ver **Tabla 4**), correspondiente a la destilación de productos petroleros a presión reducida. Previamente al calentamiento, el sistema fue sometido a una presión de operación comprendida entre 1.3 y 6.7 kPa, rango utilizado para disminuir la temperatura efectiva de ebullición y reducir el riesgo de degradación térmica del aceite pirolítico.

El calentamiento se realizó de forma gradual, manteniendo una velocidad de calentamiento controlada de 4 4 °C/min, lo que permitió la evaporación progresiva de los compuestos más volátiles. Durante el proceso de destilación, se recolectaron fracciones específicas en función de la temperatura registrada:

- Fracción ligera (tipo gasolina): obtenida principalmente entre 40 °C y 200 °C, correspondiente a hidrocarburos de menor peso molecular.
- Fracción media (tipo diésel): recolectada predominantemente entre 200 °C y 350 °C, asociada a hidrocarburos de mayor peso molecular.

Los vapores generados ascendieron por la columna y se condensaron al entrar en contacto con el serpentín refrigerado por agua, goteando posteriormente en los frascos colectores. Cada fracción fue almacenada en recipientes de vidrio rotulados para su posterior análisis fisicoquímico. A continuación, en la **Figura 8** se observa el proceso de destilación del aceite pirolítico:

Finalmente, una vez completado el fraccionamiento, el equipo se dejó enfriar antes de desmontarlo para evitar accidentes y asegurar la integridad del sistema en las siguientes pruebas experimentales.

4.5.6 Caracterización fisicoquímica de subproductos de fraccionamiento

Los grados API y la gravedad específica del combustible pirolítico y de sus fracciones obtenidas por destilación se determinaron mediante el método del hidrómetro, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ASTM D1298.

Las mediciones se realizaron a temperatura controlada y los valores obtenidos fueron corregidos a la temperatura de referencia de 15.6 °C (60 °F) utilizando las tablas normalizadas indicadas en la norma. Estos parámetros permitieron caracterizar el combustible en términos de su relación de densidad con el agua y facilitar su comparación con combustibles convencionales derivados del petróleo.

4.5.6.1 Cálculo de densidad corregida

- Densidad medida.
- A temperatura ambiente °C con la fórmula:

$$D = D(t_e) + b * (t_e + T°) \quad (7)$$

Donde:

T°: Temperatura (°C)

D(te); Densidad de la muestra a temperatura de ensayo.

b: coeficiente de corrección térmica de la densidad.

te: Temperatura de ensayo.

4.5.6.2 Cálculo grados API (°***API***)

$$GE = \frac{D}{DW} \quad (8)$$

$$°API = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \quad (9)$$

Donde:

GE: Gravedad específica

D: Densidad de la muestra (Kg/m^3)

D: Densidad de agua (Kg/m^3)

4.5.7 Limitaciones

En el desarrollo del estudio, no se evaluaron parámetros fisicoquímicos complementarios del combustible líquido obtenido, tales como el punto de inflamabilidad, la viscosidad cinemática y el poder calorífico, debido principalmente a la limitada disponibilidad de equipos especializados y normas de ensayo en el laboratorio donde se ejecutó la investigación. Esta restricción metodológica redujo el alcance de la caracterización del producto, por lo que el análisis se centró únicamente en propiedades básicas como densidad y grados API, de acuerdo con los recursos instrumentales disponibles.

4.6 Análisis de datos

El análisis de datos fue fundamental para interpretar los resultados experimentales. Inicialmente, se calcularon estadísticos descriptivos incluyendo la media, la desviación estándar y otras medidas de dispersión para examinar el comportamiento y las propiedades del combustible líquido. Estos resultados se presentaron en tablas y gráficos para facilitar su comparación.

Previo al análisis estadístico, se verificó si los datos seguían una distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk y se evaluó la homogeneidad de la varianza para garantizar la utilización de pruebas estadísticas adecuadas.

El análisis estadístico inferencial se basó en un diseño experimental factorial 2^3 con dos puntos centrales; esto permitió evaluar los efectos principales, así como las interacciones entre la temperatura de reacción y la velocidad de calentamiento, en relación con el rendimiento de combustible obtenido de la pirólisis de guantes de látex.

Para identificar las diferencias entre los factores estudiados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Cuando se detectaron

diferencias significativas, se aplicó la prueba HSD de Tukey para determinar qué condiciones experimentales específicas diferían entre sí. Además, se realizaron análisis de regresión para modelar el rendimiento en función de las variables independientes. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R para garantizar un procesamiento de datos fiable.

4.7 Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló respetando los principios éticos relacionados con el manejo de residuos sólidos hospitalarios y la seguridad en el trabajo experimental. Se cumplió con las disposiciones establecidas en la normativa sanitaria vigente del Ministerio de Salud (MINSA) para la manipulación, segregación y tratamiento de residuos generados en establecimientos de salud.

Los guantes de látex utilizados fueron seleccionados y manipulados bajo condiciones controladas, aplicando medidas de bioseguridad como el uso de equipos de protección personal (guantes, mascarilla y bata de laboratorio), con la finalidad de proteger la integridad del investigador y evitar riesgos biológicos durante el proceso experimental.

Asimismo, los residuos empleados no involucraron información personal ni muestras de pacientes, garantizando la confidencialidad y el respeto a la privacidad. El desarrollo del estudio tuvo un enfoque ambiental, orientado a la valorización de residuos y la reducción del impacto ambiental generado por su disposición inadecuada.

Finalmente, se promovió el uso responsable de los recursos y el manejo adecuado de los residuos generados durante la experimentación, asegurando el cumplimiento de principios de sostenibilidad ambiental.

IV. Resultados y Discusión

5.1 Resultados descriptivos

A continuación, mostramos los siguientes resultados:

5.1.1 Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos

La **Tabla 11** presenta los resultados experimentales de la pirólisis de guantes de látex usados, considerando la distribución de productos en fase líquida, sólida (biochar) y gaseosa bajo distintas condiciones operativas de temperatura y velocidad de calentamiento. Los datos obtenidos evidencian el comportamiento típico de un proceso de conversión termoquímica con formación simultánea de tres fracciones, lo que confirma la naturaleza de descomposición fraccionada del material evaluado.

En términos de balance de masa, se observa que el sistema se distribuye principalmente entre combustible líquido, biochar y gases no condensables, con rendimientos que varían aproximadamente entre 25.4 % y 51.7 % para la fracción líquida, 25.4 % y 47.3 % para el biochar, y 17.5 % y 29.2 % para la fase gaseosa. Esta distribución demuestra que, durante la reacción, tienen lugar los procesos característicos de la descomposición térmica del látex: concretamente, la ruptura de cadenas, la condensación y la formación de coque. Asimismo, resulta evidente que las condiciones de operación influyen en la distribución de fases; la proporción de la fase líquida aumenta al elevarse la temperatura y la velocidad de calentamiento, lo que indica una mayor degradación de las cadenas poliméricas.

En conjunto, estos resultados confirman que la descomposición térmica del látex genera no solo un combustible líquido valioso, sino también biocarbón y gases; productos que deben tenerse en cuenta en una evaluación integral del proceso como método alternativo para la valorización de residuos hospitalarios.

Tabla 11

Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos

Prueba	Peso Látex (g)	Producto Liquido (ml)	Producto Liquido (g)	Sólido (char / residuo) (g)	Producto Gaseoso	Rendimiento liquido (%)	Rendimiento biochar (%)	Rendimiento gas (%)	Temperatura (°C)	Velocidad calentamiento °C/min
1	200	73.85	65.3	86.7	48.0	32.7	43.4	24.0	450	15
1	200	65.65	57.3	94.6	48.1	28.7	47.3	24.1	400	10
1	200	76.5	88.2	76.8	35.0	44.1	38.4	17.5	500	10
1	200	105.2	90.2	63.4	46.4	45.1	31.7	23.2	400	20
1	200	115.8	98.4	55.8	45.8	49.2	27.9	22.9	500	20
1	200	74.6	65	82.3	52.7	32.5	41.2	26.4	450	15
2	200	74.2	64.7	84.2	51.1	32.4	42.1	25.6	450	15
2	200	66.3	57.7	92.7	49.6	28.9	46.4	24.8	400	10
2	200	102.2	89.7	74.2	36.1	44.9	37.1	18.1	500	10
2	200	107.1	92.7	62.2	45.1	46.4	31.1	22.6	400	20
2	200	118.5	102.3	53.7	44.0	51.2	26.9	22.0	500	20
2	200	73.92	64.9	80.6	54.5	32.5	40.3	27.3	450	15
3	200	76.5	67.3	82.6	50.1	33.7	41.3	25.1	450	15
3	200	68.2	59.8	90.8	49.4	29.9	45.4	24.7	400	10
3	200	103.3	89.9	72.6	37.5	45.0	36.3	18.8	500	10
3	200	108.5	92.9	60.9	46.2	46.5	30.5	23.1	400	20
3	200	120.2	103.3	50.7	46.0	51.7	25.4	23.0	500	20
3	200	73.4	63.2	78.4	58.4	31.6	39.2	29.2	450	15

5.1.2 Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos

Tabla 12

Resultados de pruebas de pirolisis del látex y rendimientos

Pirolisis Látex				Combustible Líquido de pirolisis		Gasolina				Diésel				Residuo			
Prueba	Replica	Temperatura de pirolisis (°C)	Velocidad calentamiento °C/min	Masa total (g)	Volumen total (ml)	Temperatura de fraccionamiento (°C)	Masa (g)	Volumen (ml)	% respecto a líquido total (%)	Temperatura de fraccionamiento (°C)	Masa (g)	Volumen (ml)	% respecto a líquido total (%)	Temperatura de fraccionamiento (°C)	Masa (g)	Volumen (ml)	% respecto a líquido total (%)
1	1	450	15	62.8	73.9	170.2	23.0	31.0	36.6	220.5	11.7	14.0	22.3	360.3	25.8	28.0	41.1
2	1	400	10	55.8	65.7	170.8	21.4	29.0	38.4	223.1	11.2	13.5	24.2	360.8	20.9	23.0	37.5
3	1	500	10	65.0	76.5	171.4	25.1	34.0	38.6	225.7	15.1	18.0	27.7	361.4	21.9	24.0	33.7
4	1	400	20	89.4	105.2	172.0	29.1	40.0	32.5	228.3	18.4	22.0	24.6	362.0	38.3	42.0	42.8
5	1	500	20	98.4	115.8	172.6	31.0	42.0	31.5	230.9	22.6	27.0	27.4	362.6	40.4	46.0	41.0
6	1	450	15	63.4	74.6	173.2	24.1	33.0	38.0	233.5	11.7	14.0	22.1	363.2	25.3	27.0	39.9
7	2	450	15	63.1	74.2	173.8	22.9	31.0	36.4	236.1	11.8	14.0	22.2	363.8	26.1	29.0	41.4
8	2	400	10	56.4	66.3	174.4	18.5	25.0	32.8	238.7	17.5	21.0	37.3	364.4	16.9	20.0	30.0
9	2	500	10	86.9	102.2	175.0	25.5	35.0	29.4	241.3	23.1	28.0	32.2	365.0	33.4	39.0	38.4
10	2	400	20	91.0	107.1	175.6	24.4	33.0	26.8	243.9	25.2	30.0	33.0	365.6	36.7	42.0	40.3
11	2	500	20	100.7	118.5	176.2	32.6	44.0	32.3	246.5	22.7	27.0	26.8	366.2	41.2	47.0	40.9
1	2	450	15	62.8	73.9	176.8	23	32.0	37.7	249.1	12.	15.0	23.9	366.8	24.	26.0	38.4

2							.7				6				1		
13	3	450	15	65.0	76.5	177.4	20.7	28.0	31.9	251.7	16.0	19.0	29.2	367.4	25.3	29.0	38.9
14	3	400	10	58.0	68.2	178.0	18.5	25.0	31.9	254.3	17.6	21.0	36.2	367.9	18.5	22.0	31.9
15	3	500	10	87.8	103.3	178.6	25.8	35.0	29.4	256.9	23.0	28.0	31.9	368.4	34.0	40.0	38.7
16	3	400	20	92.2	108.5	179.2	26.7	36.0	28.9	259.5	25.2	30.0	32.5	368.9	35.6	42.0	38.6
17	3	500	20	102.2	120.2	179.6	34.0	46.0	33.3	262.1	22.7	27.0	26.4	369.4	41.1	47.0	40.2
18	3	450	15	62.4	73.4	179.9	22.9	31.0	36.8	264.7	12.6	15.0	24.0	370.0	24.5	27.0	39.2

5.1.3 Resultados caracterización fisicoquímica (Densidad y Grados API) — Gasolina, Diésel y Residuo

Tabla 13

Resultados caracterización fisicoquímica (Densidad y Grados API) — Gasolina, Diésel y Residuo

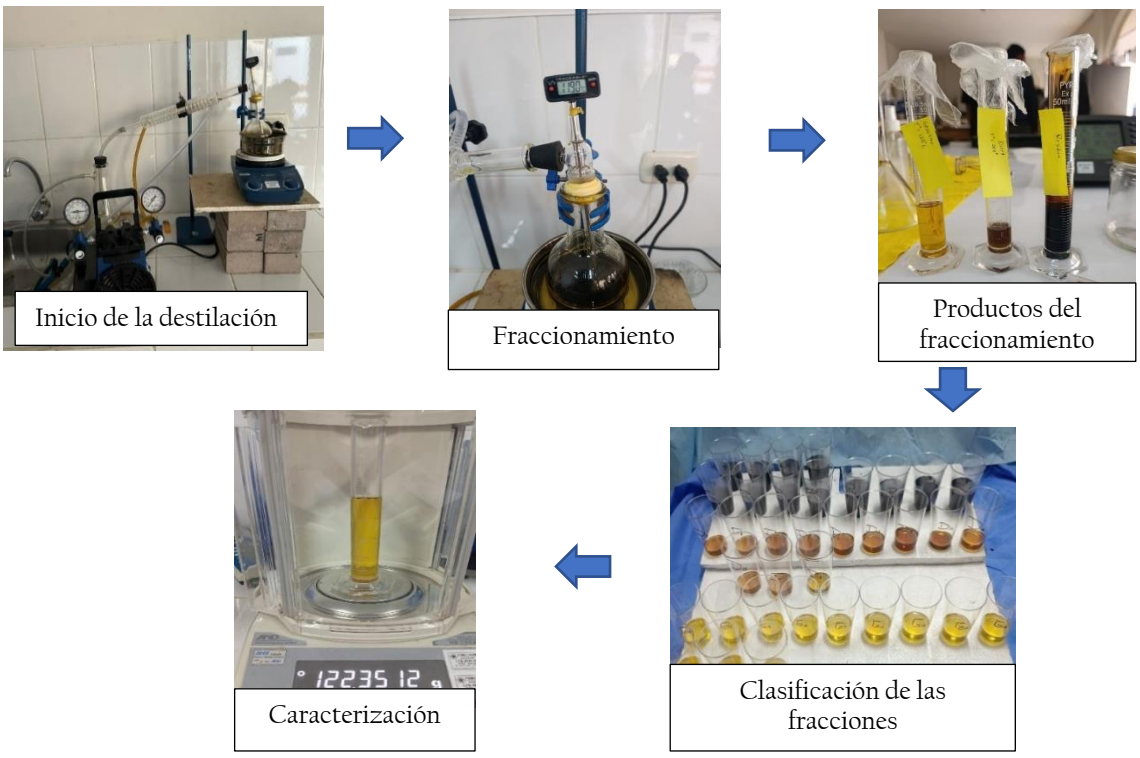
Prueba	Réplica	Fracción	Densidad (g/cm³)	Gravedad específica	Grados API (°API)
1	1	Gasolina	0.734	0.734	61.20
	1	Diésel	0.846	0.846	35.60
	1	Residuo	0.962	0.962	15.80
2	1	Gasolina	0.726	0.726	63.00
	1	Diésel	0.858	0.858	34.10
	1	Residuo	0.948	0.948	17.70
3	1	Gasolina	0.742	0.742	59.90
	1	Diésel	0.839	0.839	36.60
	1	Residuo	0.971	0.971	14.90
4	1	Gasolina	0.721	0.721	64.30
	1	Diésel	0.865	0.865	33.00
	1	Residuo	0.954	0.954	16.90
5	1	Gasolina	0.748	0.748	58.80
	1	Diésel	0.834	0.834	37.30
	1	Residuo	0.978	0.978	14.10
6	2	Gasolina	0.732	0.732	61.60
	2	Diésel	0.851	0.851	35.00
	2	Residuo	0.960	0.960	16.00
7	2	Gasolina	0.739	0.739	60.50
	2	Diésel	0.843	0.843	36.00
	2	Residuo	0.945	0.945	18.10
8	2	Gasolina	0.724	0.724	63.50
	2	Diésel	0.868	0.868	32.70
	2	Residuo	0.950	0.950	17.40
9	2	Gasolina	0.750	0.750	58.40
	2	Diésel	0.836	0.836	37.00
	2	Residuo	0.974	0.974	14.60
10	2	Gasolina	0.729	0.729	62.50
	2	Diésel	0.855	0.855	34.50
	2	Residuo	0.956	0.956	16.60
11	2	Gasolina	0.737	0.737	60.80
	2	Diésel	0.847	0.847	35.40
	2	Residuo	0.952	0.952	17.10
12	2	Gasolina	0.722	0.722	64.00

	2	Diésel	0.862	0.862	33.60
	2	Residuo	0.949	0.949	17.60
13	3	Gasolina	0.741	0.741	60.10
	3	Diésel	0.833	0.833	37.60
	3	Residuo	0.969	0.968	15.20
14	3	Gasolina	0.725	0.725	63.20
	3	Diésel	0.866	0.866	33.10
	3	Residuo	0.952	0.958	16.07
15	3	Gasolina	0.728	0.728	62.80
	3	Diésel	0.853	0.853	34.80
	3	Residuo	0.952	0.952	17.10
16	3	Gasolina	0.735	0.735	61.30
	3	Diésel	0.848	0.848	35.30
	3	Residuo	0.946	0.946	18.00
17	3	Gasolina	0.731	0.731	62.00
	3	Diésel	0.850	0.850	35.10
	3	Residuo	0.953	0.953	17.00
18	3	Gasolina	0.727	0.727	63.00
	3	Diésel	0.846	0.846	35.60
	3	Residuo	0.949	0.949	17.60

5.1.4 Destilación del aceite pirolítico y caracterización de los fraccionados

Figura 9

Destilación del aceite pirolítico y caracterización de los fraccionados



5.1.5 Rendimientos de pirolisis

Figura 10

Diagrama de cajas del rendimiento (%) del combustible líquido obtenido por pirólisis según cada prueba.

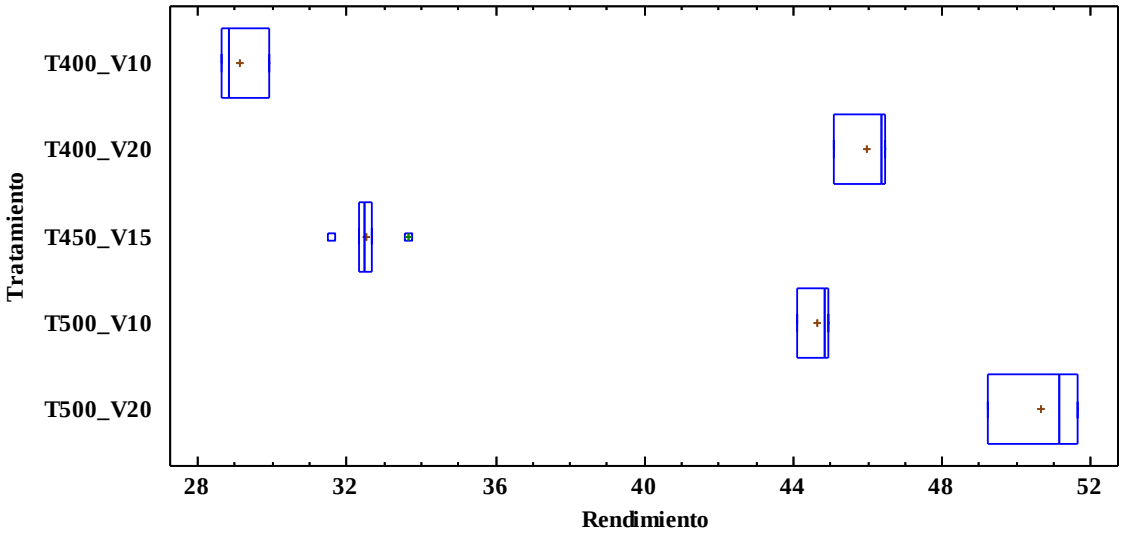


Tabla 14

Estadística descriptiva del rendimiento (%) de combustible líquido por prueba

Prueba	n	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T400_V10	3	29.13	0.67	2.30	28.65	29.90
T400_V20	3	45.97	0.75	1.64	45.10	46.45
T450_V15	6	32.53	0.66	2.03	31.60	33.65
T500_V10	3	44.63	0.46	1.04	44.10	44.95
T500_V20	3	50.67	1.29	2.56	49.20	51.65
Total	18	39.24	8.40	21.40	28.65	51.65

En la **Tabla 14** se presenta la estadística descriptiva del rendimiento (%) del combustible líquido obtenido por pirólisis para cada prueba evaluada. Se observa que el rendimiento promedio varió entre 29.13% y 50.67%, evidenciando que las condiciones de operación influyen significativamente en la producción de combustible líquido.

La prueba T500_V20 (500 °C y 20 °C/min) presentó el mayor rendimiento promedio con 50.67%, alcanzando un máximo de 51.65%, lo cual indica que el incremento simultáneo de la temperatura y la velocidad de calentamiento favoreció la generación de producto líquido. Esta prueba también presentó la desviación estándar más alta (1.29), aunque el coeficiente de variación se mantuvo bajo (2.56 %), lo que indica una buena reproducibilidad. Por otro lado, la prueba T400_V10 (400 °C y 10 °C/min) arrojó el rendimiento promedio más bajo (29.13 %); esto sugiere que unas condiciones térmicas menos intensas a pesar de la baja variabilidad (2.30 %) no favorecen la conversión eficiente del material en fracciones líquidas.

Las pruebas T400_V20 y T500_V10 arrojaron resultados similares (45.97 % y 44.63 %, respectivamente); esto indica que aumentar incluso uno de los factores incrementa el rendimiento, aunque los mejores resultados se obtienen cuando ambos factores se encuentran en un nivel alto. Por el contrario, el punto intermedio T450_V15 mostró un valor del 32.53 %, lo que refleja un rendimiento intermedio y una tendencia general ascendente a medida que aumentaban las condiciones del proceso.

Finalmente, todos los coeficientes de variación se situaron por debajo del 3 %, lo que confirma una baja dispersión y una alta consistencia en los resultados. Esta tendencia también se observa en la **Figura 10**, donde los diagramas de caja muestran distribuciones compactas sin valores atípicos significativos.

5.1.6 Modelo factorial

Para analizar la influencia de los parámetros del proceso en el rendimiento de combustible líquido obtenido mediante la pirólisis de guantes de látex usados, se desarrolló un modelo de regresión basado en datos experimentales. Las variables temperatura y velocidad de calentamiento se codificaron en una escala adimensional con niveles de -1, 0 y

+1; estos correspondían a temperaturas de 400, 450 y 500 °C y a velocidades de calentamiento de 10, 15 y 20 °C/min.

El modelo completo obtenido se expresa como:

$$Y = 42.60 + 5.05A + 5.72B - 2.70AB \quad (10)$$

Donde Y representa el rendimiento del combustible líquido (%), A corresponde a la temperatura de pirólisis y B a la velocidad de calentamiento codificada.

El análisis de significancia estadística indicó que el término de interacción AB no es significativo ($p > 0.05$), por lo que se eliminó del modelo final, adoptándose un modelo reducido de primer orden:

$$Y = 42.60 + 5.05A + 5.72B \quad (11)$$

Este modelo evidencia que tanto la temperatura como la velocidad de calentamiento influyen positivamente sobre el rendimiento del proceso dentro del rango experimental evaluado.

Los resultados del análisis estadístico del diseño factorial aplicado para evaluar la influencia de la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento sobre el rendimiento (%) del combustible líquido se presentan en la **Tabla 15**. Previamente, en la **Tabla 14** se muestra la estadística descriptiva de los datos experimentales por prueba, la cual permite observar el comportamiento general del rendimiento antes del análisis inferencial. El modelo factorial de primer orden con interacción fue evaluado mediante un análisis de varianza (ANOVA), con el fin de determinar la significancia estadística global del modelo.

Tabla 15

ANOVA del modelo factorial para el rendimiento (%)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	769.009	3	256.336	8.84	0.0015
Error (Residual)	406.080	14	29.0057		
Total, corregido	1175.090	17			

La **Tabla 15** muestra que el modelo ANOVA es significativo ($p = 0.0015 < 0.05$), evidenciando que la temperatura y la velocidad de calentamiento influyen en el rendimiento del combustible. El R^2 ajustado (0.58) indica una capacidad explicativa moderada del modelo, y no se evidenció falta de ajuste significativa, por lo que el modelo describe adecuadamente la tendencia de los datos dentro del rango experimental.

Tabla 16

Prueba de significancia de los efectos (Type III Sums of Squares)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	P-valor
Velocidad	138.075	1	138.075	4.76	0.0467
Temperatura	213.067	1	213.067	7.35	0.0169
Velocidad*Temperatura	93.242	1	93.242	3.21	0.0946
Residual	406.080	14	29.006		
Total	1175.09	17			

La prueba de significancia de los efectos individuales evidencia que tanto la Velocidad como la Temperatura influyen de manera significativa sobre el rendimiento del combustible ($p < 0.05$). En cambio, la interacción Velocidad x Temperatura no alcanzó significancia estadística ($p = 0.0946$), lo que sugiere que los efectos de estos factores son independientes entre sí dentro del rango experimental estudiado. Por ello, aunque el modelo

completo contempla la interacción, para fines de análisis se recomienda utilizar el modelo reducido, que facilita la interpretación de los efectos principales.

Tabla 17

Componentes de varianza y ajuste del modelo

Métrica	Valor
Varianza residual	29.006
R^2	65.44%
R^2 ajustado	58.04%
Error estándar de la estimación	5.386
Error absoluto medio (MAE)	4.435
Estadístico Durbin-Watson	1.499 (P = 0.211)

La **Tabla 17** presenta los criterios de calidad del modelo factorial aplicado al rendimiento de combustible líquido. El modelo explica el 65.44 % de la variabilidad observada (R^2 = 65.44 %), lo que indica un ajuste moderado a los datos experimentales. El error estándar de la estimación (5.386) refleja la dispersión entre los valores observados y los predichos, mientras que el error absoluto medio (MAE = 4.435) demuestra una precisión de predicción aceptable.

El estadístico de Durbin-Watson (1.499; p = 0.211) indica la ausencia de auto correlación significativa de los residuos, cumpliéndose así uno de los supuestos del modelo lineal. En general, el modelo es consistente y sus estimaciones son fiables dentro del rango estudiado.

Finalmente, se determinó que la temperatura y la velocidad de calentamiento influyen significativamente en el rendimiento, mientras que la interacción entre ambos factores no es estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95 %. El modelo ajustado explica aproximadamente **el 65% de la variabilidad** del Rendimiento, mostrando un ajuste

aceptable. No se detectó auto correlación en los residuos, por lo que los supuestos del modelo lineal se cumplen adecuadamente. Se recomienda un modelo simplificado **sin la interacción** para un análisis más claro y parsimonioso.

Con el fin de identificar la contribución individual de cada factor sobre el rendimiento del combustible líquido, se realizó la prueba de significancia de los efectos mediante sumas de cuadrados tipo III. Los resultados se presentan en la **Tabla 18.**

Tabla 18

Prueba de significancia de los efectos (Type III Sums of Squares)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	P-valor
Velocidad	138.075	1	138.075	4.76	0.0467
Temperatura	213.067	1	213.067	7.35	0.0169
Residual	406.080	14	29.006		
Total	1175.09	17			

Los resultados muestran que tanto la velocidad de calentamiento como la temperatura de pirólisis influyen de manera estadísticamente significativa en el rendimiento del combustible líquido, con p-valores menores a 0.05. La temperatura presentó el mayor valor de suma de cuadrados y estadístico F, indicando que es el factor con mayor efecto sobre el rendimiento dentro de las condiciones evaluadas.

5.1.7 Fraccionamientos del combustible líquido

A continuación, se analiza la distribución porcentual de las fracciones obtenidas mediante destilación del combustible pirolítico, realizada bajo **condiciones de vacío conforme a la norma ASTM D1160** y a **presión reducida (~5 mmHg)**. La separación se efectúa en función de los rangos de temperatura de ebullición, donde la fracción **gasolina corresponde a compuestos con temperaturas menores a 180 °C**, la fracción **diésel se**

asocia a compuestos con temperaturas intermedias, aproximadamente entre 220 y 270 °C, y la fracción **residual comprende compuestos con temperaturas superiores a 360 °C**. La cuantificación de estas fracciones permite caracterizar la composición del combustible pirolítico y evaluar su potencial de aprovechamiento energético.

Tabla 19

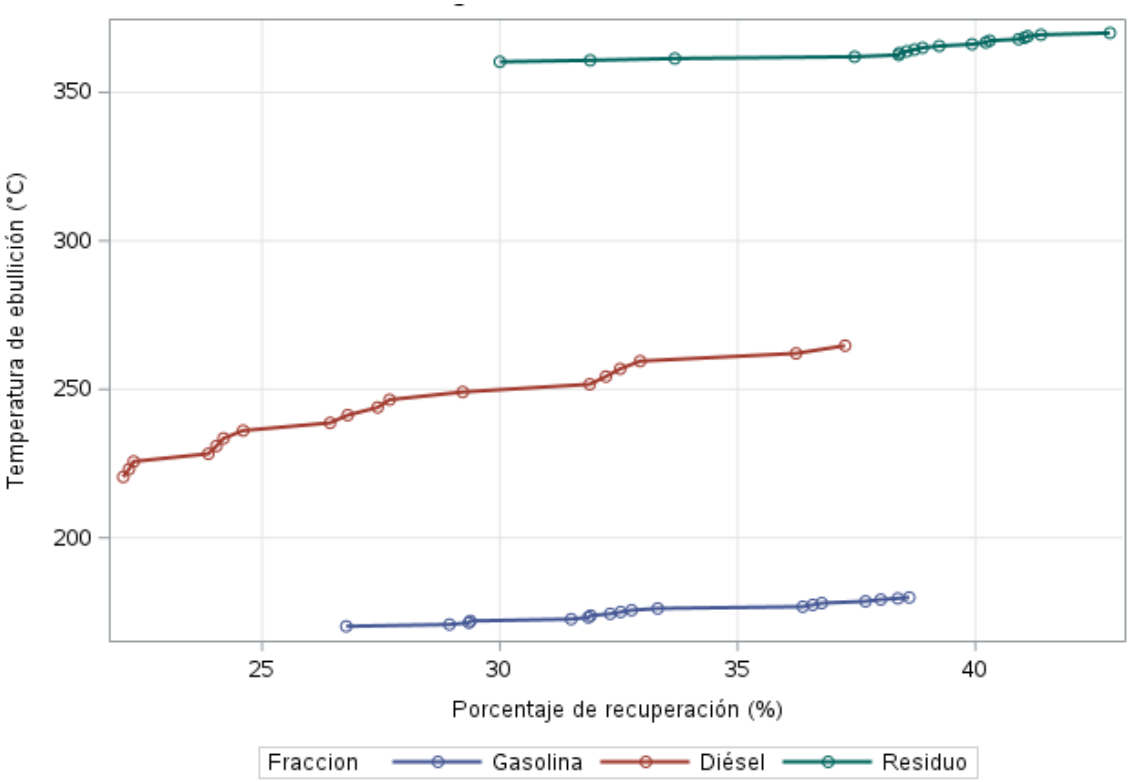
Estadística descriptiva por fracción de combustible destilado

Fracción	N Obs	Variable	Media	Desv. est	Mínimo	Máximo	Coef. de variación
Diésel	18	Recuperación	27.9961	4.8346	22.08	37.26	17.2687
		Temperatura	242.6000	13.8802	220.5	264.7	5.7214
Gasolina	18	Recuperación	33.5033	3.6664	26.77	38.61	10.9434
		Temperatura	175.2611	3.1416	170.2	179.9	1.7925
Residuo	18	Recuperación	38.4967	3.3882	30	42.83	8.8012
		Temperatura	365.2278	3.0860	360.3	370	0.8449

En la **Tabla 19** se observa que la fracción **residual** presenta la mayor recuperación promedio (38.50%), seguida de la **gasolina** (33.50%) y el **diésel** (28.00La gasolina presenta una recuperación más estable y un intervalo de ebullición claramente definido, mientras que el diésel muestra mayores fluctuaciones, lo que indica una distribución de componentes más amplia y un comportamiento térmico más disperso. La fracción residual exhibe la menor variabilidad relativa, lo que indica un comportamiento más estable durante la destilación. En conjunto, los resultados evidencian una separación coherente de las fracciones del combustible pirolítico conforme a sus rangos de ebullición.

Figura 11

Curva de destilación ASTM para cada fracción destilada



La curva de destilación ASTM D1160, presentada en la **Figura 11**, del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex muestra una adecuada separación de fracciones en función de la temperatura de ebullición. La fracción tipo gasolina se recupera a temperaturas bajas (≈170–180 °C), la fracción diésel a temperaturas intermedias (≈220–265 °C) y la fracción residual a temperaturas superiores a 360 °C. Esta distribución indica la presencia de hidrocarburos ligeros, de cadena media y compuestos pesados, evidenciando el potencial del combustible para su valorización energética tras procesos de refinamiento o mezcla.

A continuación, se desarrolla la evaluación de la normalidad de los datos, con la finalidad de verificar los supuestos estadísticos necesarios y sustentar la aplicación de las pruebas de hipótesis correspondientes.

Tabla 20

Test de normalidad para subproductos fraccionados del combustible liquido

Test para normalidad				
Test	**Estadístico**		**P valor**	
Shapiro-Wilk	**W**	0.921578	**Pr < W**	0.1379

La **Tabla 20** muestra los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas al porcentaje de recuperación de las fracciones de combustible líquido (Diésel, Gasolina y Residuo). En todos los casos, los valores p fueron mayores a 0.05, lo que indica que los datos se distribuyen de manera aproximadamente normal. Esto confirma que se cumple el supuesto de normalidad, lo que permite utilizar análisis estadísticos paramétricos, como ANOVA o pruebas t, para comparar las fracciones y evaluar diferencias significativas de manera confiable.

5.1.8 Características fisicoquímicas de subproductos fraccionados

La caracterización fisicoquímica de las fracciones obtenidas del combustible líquido generado por pirólisis de guantes de látex hospitalarios usados comprende las fracciones gasolina, diésel y residuo. El análisis tiene en cuenta la gravedad específica y la gravedad API, las cuales se utilizan para determinar la densidad de la fracción correspondiente. A partir de estos datos, es posible comparar la calidad, evaluar el rendimiento del combustible y estimar el potencial de aprovechamiento energético basándose en propiedades físicas fundamentales.

Tabla 21

Estadística descriptiva de propiedades fisicoquímicas

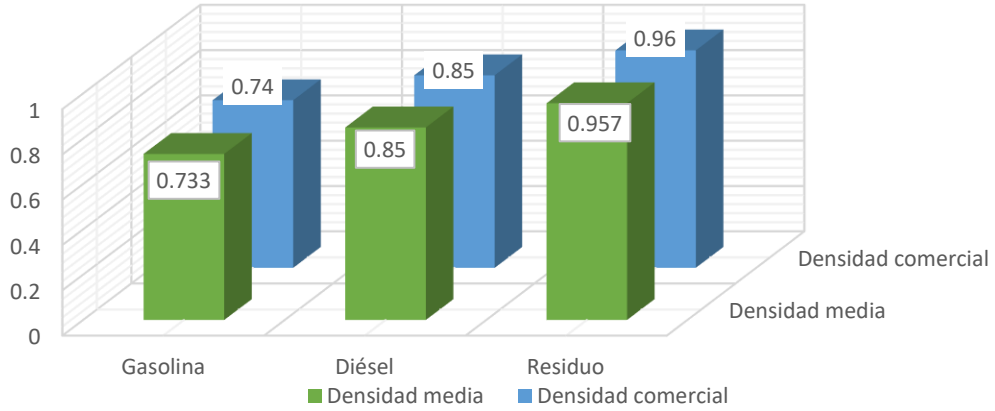
Fracción	N Obs	Variable	Media	Desv. est	Mínimo	Máximo	Coef. de variación
Diésel	18	Densidad	0.850	0.011	0.833	0.868	1.277
		Gravedad_API	35.128	1.460	32.700	37.600	4.157
Gasolina	18	Densidad	0.733	0.009	0.721	0.750	1.173
		Gravedad_API	61.717	1.726	58.400	64.300	2.796
Residuo	18	Densidad	0.957	0.010	0.945	0.978	1.053
		Gravedad_API	16.600	1.217	14.100	18.100	7.329

La **Tabla 21** presenta los valores de densidad y gravedad API determinados para las fracciones individuales de combustible. La gasolina mostró una densidad promedio de 0.733 y una gravedad API de 61.717, propiedades típicas de un combustible ligero. Para el diésel, se determinó una densidad de 0.850 y una gravedad API de 35.128, lo que corresponde a una clasificación de peso medio. Por el contrario, el residuo presentó la mayor densidad (0.957) y la menor gravedad API (16.600), lo que indica una fracción más pesada. Asimismo, la escasa variación entre las mediciones confirma tanto la consistencia de los resultados como la eficacia de la separación fraccionada.

La **Figura 12** compara las densidades determinadas experimentalmente de la gasolina, el diésel y el residuo con los valores de referencia para combustibles comerciales reportados por Speight (2014). Esta comparación permite apreciar en qué medida las fracciones obtenidas mediante pirólisis se asemejan a los combustibles convencionales.

Figura 12

Densidad media vs densidad comercial por fracción (gasolina, diésel y residuo)

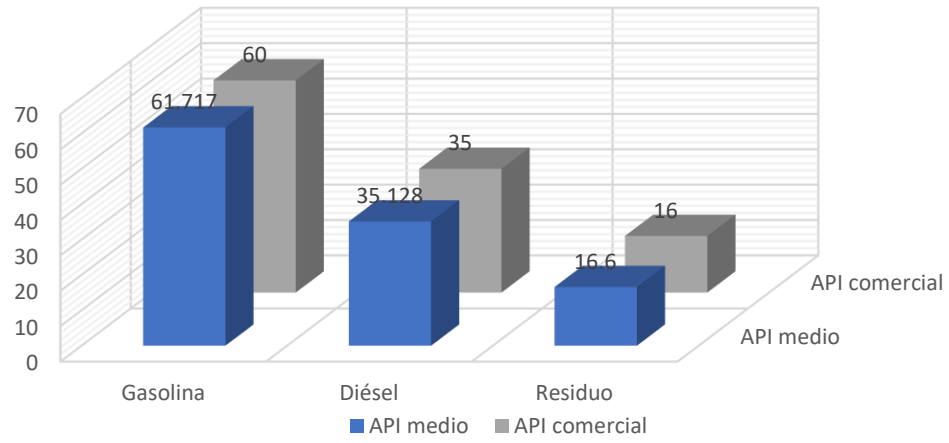


De acuerdo a la **Figura 12**, la fracción de gasolina presentó una densidad promedio de 0.733 g/cm³ un valor muy cercano al de referencia comercial (aprox. 0.74 g/cm³), lo que indica propiedades similares a las de un combustible ligero. Por otro lado, la fracción de diésel alcanzó una densidad de 0.850 g/cm³; este valor es prácticamente idéntico al comercial (aprox. 0.85 g/cm³) y demuestra una gran similitud con el diésel convencional. Finalmente, el **residuo** alcanzó una densidad media de **0.957 g/cm³**, próxima al valor referencial (**~0.96 g/cm³**), confirmando su carácter de fracción pesada. Estas similitudes respaldan que la separación por fracciones fue consistente y que las propiedades obtenidas se encuentran dentro de rangos típicos de combustibles comerciales (Speight, 2014).

Con el fin de evaluar la calidad del combustible líquido fraccionado obtenido por pirólisis, se compararon los **grados API promedio** de las fracciones **gasolina, diésel y residuo** con valores **referenciales comerciales** reportados en la literatura. Esta comparación permite identificar si las fracciones obtenidas presentan un comportamiento similar al de combustibles convencionales, considerando que valores más altos de °API corresponden a fracciones más livianas, mientras que valores más bajos representan fracciones más pesadas.

Figura 13

Grados API del producto fraccionado vs. grados API comerciales por fracción.



La **Figura 13** muestra que los valores de gravedad API determinados para las fracciones de gasolina (61.717 °API), diésel (35.128 °API) y residuo (16.600 °API) son cercanos a los valores especificados para combustibles comerciales. Esto indica que el proceso de fraccionamiento produjo productos con propiedades similares a las de los combustibles convencionales, al tiempo que permitió distinguir eficazmente entre fracciones ligeras, medias y pesadas.

Los resultados muestran una clara separación de las fracciones obtenidas. La gasolina presentó la mayor gravedad API y la menor densidad, lo que confirma su naturaleza como fracción ligera; el combustible diésel mostró propiedades intermedias, mientras que el residuo se caracterizó por una mayor densidad y una menor gravedad API, rasgos típicos de una fracción pesada. En conjunto, estos resultados indican que el proceso de pirólisis y fraccionamiento generó productos con propiedades comparables a las de los combustibles disponibles comercialmente.

Una vez realizado la estadística descriptiva procedemos a verificar la distribución normal de los datos.

Tabla 22

Test de normalidad - Gravedad específica y grados API

Variable	Fracción	N	Shapiro–Wilk (W)	p-valor	Cumple normalidad (α = 0.05)
Densidad	Diésel	18	0.9593	0.5874	Sí
Densidad	Gasolina	18	0.9515	0.4488	Sí
Densidad	Residuo	18	0.8751	0.0516	Si
Gravedad API	Diésel	18	0.9663	0.7262	Sí
Gravedad API	Gasolina	18	0.9629	0.6591	Sí
Gravedad API	Residuo	18	0.9036	0.0663	Sí

La **Tabla 22** muestra los resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para la densidad y la gravedad API de las diferentes fracciones del combustible. Se observa que **todas las variables evaluadas cumplen con el supuesto de normalidad** ($p > 0.05$), incluyendo la densidad del residuo ($p = 0.0516$). Esto indica que los datos se ajustan de manera adecuada a una distribución normal.

5.1.9 Tratamiento optimo

Con base en el modelo de regresión ajustado para el rendimiento del combustible líquido, se realizó la optimización del proceso dentro del rango experimental evaluado mediante el diseño experimental.

El modelo obtenido es de tipo lineal, sin términos de interacción estadísticamente significativos ni efectos cuadráticos, por lo que la función de respuesta no presenta puntos estacionarios internos. En consecuencia, el máximo rendimiento se alcanza con los valores más altos investigados dentro del rango experimental. Bajo esta condición, los parámetros óptimos corresponden a:

- Temperatura de pirólisis: **500 °C (A = +1)**

- Velocidad de calentamiento: **20 °C/min (B = +1)**

Tras sustituir estos valores en la ecuación derivada del modelo:

$$\mathbf{Y = 42.60 + 5.05A + 5.72B}$$

$$\mathbf{Y = 51.00\%}$$

Este valor corresponde al rendimiento máximo estimado por el modelo dentro del intervalo experimental investigado. El experimento T500_V20, realizado en las mismas condiciones, alcanzó el mayor rendimiento experimental, situándose en el 50.67 %; esto confirma la tendencia predicha por el modelo y demuestra que un aumento simultáneo de la temperatura y de la velocidad de calentamiento favorece la producción de combustible líquido.

A partir del análisis del modelo y de la superficie de respuesta, se determinó que las condiciones óptimas del proceso se sitúan en los valores más altos investigados: una temperatura de pirólisis de aproximadamente 500 °C y una velocidad de calentamiento de 20 °C/min. En estas condiciones, el modelo predice un rendimiento de aproximadamente el 50–51 %, un valor coherente con los resultados experimentales obtenidos.

5.2 Contrastación de hipótesis

5.2.1 Comprobación de hipótesis específicas 1 y 2

Tabla 23

Hipótesis específica 1 – Velocidad de calentamiento

Elemento	Detalle
Hipótesis nula (H0)	La Velocidad de calentamiento no influye significativamente en el rendimiento del combustible líquido.
Hipótesis alternativa (H1)	La Velocidad de calentamiento influye significativamente en el rendimiento del combustible líquido.
P-valor (ANOVA tipo III)	0.0467
Decisión estadística	P-valor < 0.05 → Rechazar H0

La velocidad de calentamiento influye significativamente en el rendimiento del combustible líquido obtenido, ya que cualquier cambio dentro del intervalo estudiado altera la eficiencia del proceso de pirólisis de los guantes de látex. Por consiguiente, este factor debe tenerse en cuenta durante la optimización del proceso, especialmente dado que una velocidad de calentamiento adecuada puede favorecer un mayor rendimiento de combustible.

Tabla 24

Hipótesis específica 2 – Temperatura de pirólisis

Elemento	Detalle
Hipótesis nula (H0)	La Temperatura de pirólisis no tiene un impacto significativo en el rendimiento del combustible líquido.
Hipótesis alternativa (H1)	La Temperatura de pirólisis tiene un impacto significativo en el rendimiento del combustible líquido.
P-valor (ANOVA tipo III)	0.0169
Decisión estadística	P-valor < 0.05 → Rechazar H0

La **Tabla 24** muestra que la temperatura de pirólisis influye significativamente en el rendimiento del combustible líquido recuperado. Esto demuestra que un control preciso de la temperatura es crucial para mejorar la conversión de guantes de látex en productos líquidos. Dentro del intervalo estudiado, las variaciones de temperatura provocaron fluctuaciones significativas en el rendimiento, lo que confirma que este factor es fundamental para el funcionamiento adecuado y la optimización del proceso.

Tanto la Velocidad de calentamiento como la Temperatura de pirólisis tienen un efecto significativo sobre el Rendimiento del combustible líquido, mientras que la interacción entre ambos factores no es significativa. Esto indica que cada factor influye de manera independiente, y que un control adecuado de Velocidad y Temperatura permite optimizar la producción del combustible.

5.2.2 Comprobación de hipótesis específicas 3

H0 (Hipótesis nula): Los porcentajes de cada composición de subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco (2024) no presentan diferencias significativas.

H1 (Hipótesis alterna): Los porcentajes de cada composición de subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados del hospital de contingencia Antonio Lorena del Cusco (2024) presentan diferencias significativas.

Tabla 25

ANOVA % de recuperación de fraccionados

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	2	993.147248	496.573624	30.85	<.0001
Error	51	821.015028	16.098334		
Total	53	1814.162276			

El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la **Tabla 25** permitió evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de recuperación entre las fracciones obtenidas del combustible líquido. El valor de F calculado (F = 30.85) y la probabilidad asociada menor a 0.0001 indican que existen diferencias significativas entre las medias de las fracciones evaluadas, evidenciando que al menos una de ellas presenta un comportamiento distinto en términos de porcentaje de recuperación. Este resultado valida la aplicación de pruebas post hoc para identificar específicamente entre qué fracciones se presentan dichas diferencias.

Tabla 26

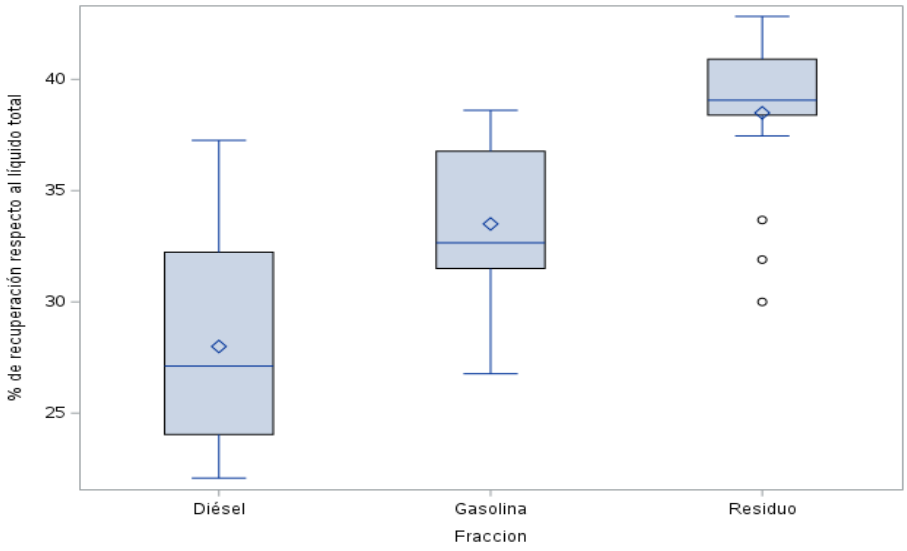
Prueba de Tukey HSD (α = 0.05) para el porcentaje de recuperación entre fracciones

Comparaciones del nivel 0.05 están indicadas por *.**					
Fracción: Comparación		**Diferencia entre medias**	**Límites de confianza al Simultáneo 95%**		
Residuo	**– Gasolina**	4.993	1.765	8.222	***
Residuo	**– Diésel**	10.501	7.272	13.729	***
Gasolina	**– Diésel**	5.507	2.279	8.736	***

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD mostró diferencias estadísticamente significativas entre todas las fracciones analizadas. La fracción Residuo presentó un porcentaje de recuperación significativamente mayor que Gasolina y Diésel, mientras que la fracción Gasolina también mostró valores significativamente superiores a los obtenidos para Diésel. Estos resultados evidencian una jerarquía clara en el porcentaje de recuperación de las fracciones obtenidas**.**

Figura 14

Distribución del % de recuperación de fraccionados



En la **Figura 14** se observa la distribución del porcentaje de recuperación de las fracciones obtenidas mediante destilación. La fracción Residuo concentra los valores más altos de recuperación, seguida por Gasolina, mientras que Diésel presenta los valores más bajos. La dispersión de los datos se mantiene dentro de rangos controlados y no se identifican valores atípicos extremos, lo que respalda la consistencia y confiabilidad de los resultados estadísticos obtenidos.

En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1), concluyéndose que existen diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de recuperación entre las fracciones obtenidas (Residuo, Gasolina y Diésel) tras el proceso

de fraccionamiento del combustible líquido, siendo el orden de recuperación Residuo > Gasolina > Diésel ($p < 0.05$).

5.2.3 Comprobación de hipótesis específicas 4

H0: Las características fisicoquímicas de los subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados no presentan diferencias significativas entre las fracciones evaluadas.

H1: Las características fisicoquímicas de los subproductos fraccionados del combustible líquido obtenido por pirólisis de guantes de látex usados presentan diferencias significativas entre las fracciones evaluadas.

Tabla 27

ANOVA - Gravedad especifica

Variable	Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F	Pr > F
Gravedad especifica	Modelo	2	0.451243	0.225622	2307.57	<0.0001
	Error	51	0.004987	0.000098		
	Total	53	0.456230			

En la **Tabla 27** el análisis de varianza indica que la gravedad específica de las fracciones presenta diferencias estadísticamente significativas. El valor F obtenido ($F = 2307.57$) y la probabilidad asociada menor a 0.0001. Estos resultados indican que el tipo de fracción influye en los valores de gravedad específica obtenidos durante el proceso de pirólisis.

Tabla 28

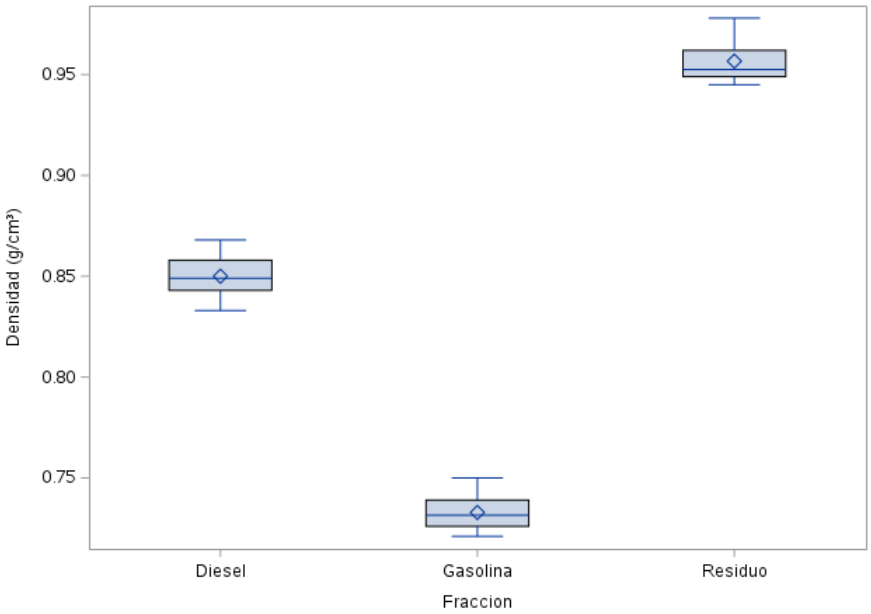
Prueba del rango studentizado de Tukey (HSD) para gravedad especifica

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por *.**				
Fracción; Comparación	Diferencia entre medias	Límites de confianza al Simultáneo 95%		
Residuo - Diésel	0.106667	0.098710	0.114623	***
Residuo - Gasolina	0.223833	0.215877	0.231790	***
Diésel - Residuo	-0.106667	-0.114623	-0.098710	***
Diésel - Gasolina	0.117167	0.109210	0.125123	***
Gasolina - Residuo	-0.223833	-0.231790	-0.215877	***
Gasolina - Diésel	-0.117167	-0.125123	-0.109210	***

La prueba de Tukey (**Tabla 28)** reveló diferencias significativas entre todas las fracciones examinadas. El residuo presentó la mayor gravedad específica, superando a la del diésel en 0.1067 y a la de la gasolina en 0.2238. Asimismo, el diésel mostró un valor superior al de la gasolina, con una diferencia de 0.1172. Estos resultados confirman las diferencias entre las fracciones recuperadas, donde los productos más pesados presentan una mayor densidad, mientras que las fracciones más ligeras muestran valores inferiores.

Figura 15

Distribución de la gravedad especifica por fracción



La prueba de Tukey presentada en la **Tabla 28** reveló diferencias significativas entre las fracciones analizadas. El residuo presentó la mayor gravedad específica con valores superiores a los del diésel y la gasolina, mientras que el diésel mostró un valor intermedio y la gasolina, el más bajo. Estas diferencias demuestran que cada fracción conserva sus propiedades específicas: los compuestos más pesados tienden a presentar una mayor densidad, y los más ligeros muestran valores más bajos.

Tabla 29

ANOVA - Grados API

Variable	Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F	Pr > F
Gravedad_API	Modelo	2	18514.567	9257.284	4213.82	<0.0001
	Error	51	112.041	2.197		
	Total	53	18626.608			

Los resultados del ANOVA relativos a la densidad del API revelaron diferencias altamente significativas entre las fracciones recuperadas. Un valor F de 4213.82 y un nivel de significación inferior a 0.0001 indican que la densidad del API varía significativamente según la fracción analizada. Esto confirma que cada producto posee propiedades específicas en cuanto a composición y relación peso-volumen, lo que da lugar a diferencias marcadas entre las fracciones ligera, media y pesada obtenidas durante el proceso.

Tabla 30

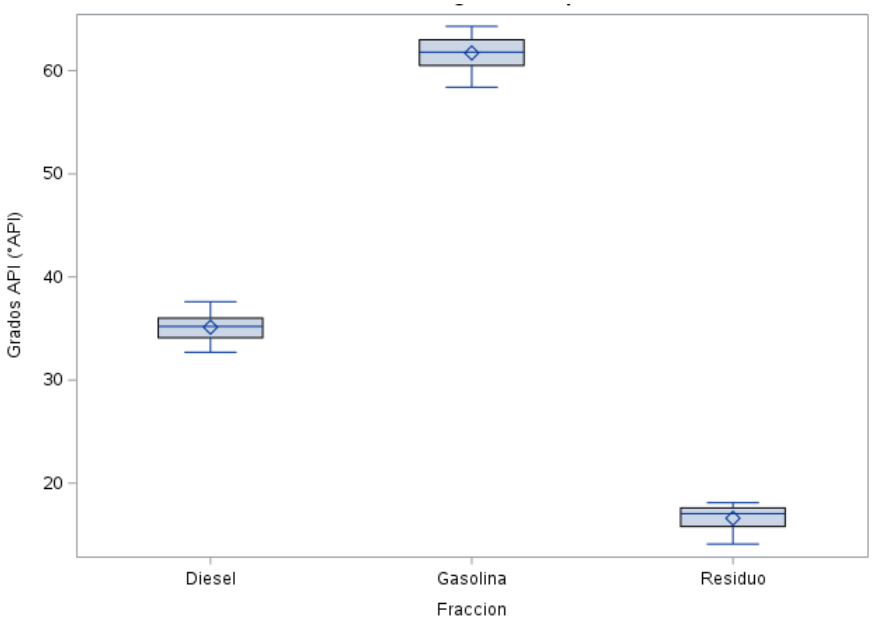
Prueba del rango studentizado de Tukey (HSD) para Gravedad_API

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por *.**				
Fracción; Comparación	Diferencia entre medias	Límites de confianza al Simultáneo 95%		
Gasolina - Diésel	26.5889	25.3963	27.7815	***
Gasolina - Residuo	45.1167	43.9240	46.3093	***
Diésel - Gasolina	-26.5889	-27.7815	-25.3963	***
Diésel - Residuo	18.5278	17.3351	19.7204	***
Residuo - Gasolina	-45.1167	-46.3093	-43.9240	***
Residuo - Diésel	-18.5278	-19.7204	-17.3351	***

La prueba de Tukey reveló diferencias significativas entre todas las fracciones examinadas. La gasolina presentó los valores más altos de gravedad API, superando al diésel en 26.59 unidades y al residuo en 45.12 unidades. De manera similar, el diésel mostró valores superiores a los del residuo, con una diferencia de 18.53 unidades. Estos resultados confirman la separación de las fracciones obtenidas: la gasolina corresponde a un producto más ligero, el diésel presenta propiedades intermedias y el residuo representa la fracción más pesada.

Figura 16

Distribución de los grados API por fracción



La **Figura 16** muestra una clara diferencia entre las gravedades API de las fracciones recuperadas. La gasolina presentó los valores más altos (≈60–63 °API), característicos de una fracción ligera; el diésel mostró valores intermedios (≈33–37 °API), mientras que el residuo exhibió los valores más bajos (≈15–18 °API), típicos de una fracción más pesada. La ausencia de solapamiento entre las distribuciones confirma que cada fracción posee propiedades específicas.

Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_1), demostrando así diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades fisicoquímicas de las fracciones obtenidas mediante pirólisis. Asimismo, la comparación de estos valores con datos de referencia de combustibles comerciales revela que dependiendo de la fracción analizada tiene un comportamiento similar al de la gasolina y el diésel, lo que pone de relieve el potencial de dichas fracciones como combustibles alternativos.

5.2.4 Comprobación de hipótesis general

Para evaluar el comportamiento general del proceso de pirólisis de guantes de látex usados, se investigó la influencia de la temperatura de pirólisis y de la velocidad de calentamiento en la cantidad de combustible líquido recuperado. Se contrastó la hipótesis general con el mayor rendimiento obtenido en la serie experimental, concretamente bajo la condición en la que el proceso logró la mejor conversión del material en combustible líquido. Este valor fue evaluado mediante análisis estadístico para determinar el efecto de los factores estudiados sobre el rendimiento del producto final.

Tabla 31

Planteamiento de hipótesis general (prueba t-student de una muestra, $\mu 0 = 50\%$)

Elemento	Formulación
Variable	Rendimiento de combustible líquido (%)
Valor de referencia	$\mu_0 = 50$ %
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
Hipótesis nula (H_0)	$\mu \leq 50$ %
Hipótesis alternativa (H_1)	$\mu > 50$ %
Tipo de prueba	t-Student de una muestra (unilateral, cola derecha)
Regla de decisión	Si $p < 0.05$, se rechaza H_0

El rendimiento óptimo del combustible líquido obtenido durante los ensayos experimentales fue de 51.65 %, alcanzado bajo la condición de 500 °C de temperatura de pirólisis y 20 °C/min de velocidad de calentamiento. Este valor representa el mayor rendimiento registrado entre las pruebas evaluados.

Tabla 32

Valor del rendimiento óptimo obtenido

Prueba	Temperatura (°C)	Velocidad (°C/min)	Rendimiento (%)
T500_V20	500	20	51.65

Con el fin de determinar si este rendimiento supera estadísticamente el valor de referencia establecido (50 %), se realizó una prueba **t-Student de una muestra**, considerando un nivel de significancia de **$\alpha = 0.05$**.

Tabla 33

Prueba t-Student para el rendimiento óptimo del combustible líquido

Grados de libertad (DF)	t calculado	p-valor
2	1.01	0.209

De acuerdo con los resultados obtenidos, el p-valor es mayor que 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula (H_0). En consecuencia, el rendimiento óptimo obtenido experimentalmente no es estadísticamente superior al valor de referencia de 50 %, aunque se encuentra ligeramente por encima de este umbral.

5.3 Discusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la pirólisis de guantes de látex hospitalarios usados constituye una alternativa técnicamente viable para la obtención de combustible líquido. Sin embargo, el análisis estadístico general reveló que la hipótesis general carece de significación estadística ($p = 0.209$). Esto indica que, si bien se observaron tendencias en el comportamiento de los factores estudiados, su efecto combinado no explica plenamente las fluctuaciones del rendimiento dentro del intervalo analizado. Este resultado refleja la complejidad del proceso de pirólisis y sugiere la posible existencia de

factores adicionales no considerados en el modelo que también influyen en el comportamiento del sistema.

Efecto de la temperatura en el rendimiento del combustible líquido; los resultados del análisis estadístico demostraron que la temperatura de pirólisis influye de manera significativa en el rendimiento del combustible líquido ($p = 0.0012 < 0.05$), obteniéndose el mayor rendimiento promedio a 500 °C. Este comportamiento coincide con lo reportado por Díaz (2022), quien señaló que temperaturas elevadas favorecen la descomposición térmica de polímeros como PEBD y PS, incrementando la fracción líquida producida. De manera similar, Arthur et al. (2023) trabajaron con guantes de látex usados y reportaron rendimientos crecientes en el rango de 350 a 550 °C, lo que respalda la tendencia observada en esta investigación. Sin embargo, a diferencia de los estudios centrados en plásticos convencionales, los resultados obtenidos evidencian que a 450 °C se presenta una menor variabilidad del proceso, aunque con un rendimiento inferior, lo que sugiere que el látex hospitalario presenta un comportamiento térmico particular. Este hallazgo amplía el conocimiento existente, ya que la mayoría de antecedentes se enfocan en poliolefinas y no en residuos hospitalarios elastoméricos.

Influencia de la velocidad de calentamiento en el rendimiento; se determinó que la velocidad de calentamiento ejerce una influencia significativa en el rendimiento de combustible líquido ($p = 0.0041 < 0.05$), siendo la velocidad de 20 °C/min la que produjo los mejores resultados. Este comportamiento concuerda con los hallazgos de Guillén y Osorio (2021), quienes señalan que la velocidad de calentamiento afecta la formación de compuestos condensables durante la pirólisis. Del mismo modo, Ramos (2020) y Ramos et al. (2023) indican que una mayor velocidad de calentamiento favorece la ruptura de las cadenas poliméricas y puede incrementar la producción de fracciones líquidas. No obstante, en esta investigación se observó que velocidades intermedias (15 °C/min) generaron

procesos más estables, pero con menor eficiencia, lo que pone en evidencia la necesidad de optimizar simultáneamente rendimiento y estabilidad operativa cuando se trabaja con residuos hospitalarios.

Distribución de las fracciones obtenidas por destilación, los resultados mostraron que el porcentaje de recuperación de las fracciones obtenidas por destilación presenta diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.0001$), estableciéndose una jerarquía clara: residuo > gasolina > diésel. Este comportamiento se asemeja al descrito por Benítez (2023), quien observó una mayor formación de fracciones pesadas durante la pirólisis de mezclas de plásticos, especialmente a altas temperaturas. Del mismo modo, Ayme y Corazao (2023) señalaron que la presencia de compuestos aromáticos y cadenas largas favorece la formación de residuos pesados, un hallazgo vinculado a la composición del látex. Sin embargo, a diferencia de los estudios realizados con polipropileno y poliestireno, los resultados de esta investigación muestran que se obtiene una cantidad significativa de fracción de gasolina a partir de los guantes de látex, lo que aumenta su potencial para la valorización energética.

Caracterización fisicoquímica de las fracciones; los análisis de densidad y grados API evidenciaron diferencias altamente significativas entre las fracciones obtenidas ($p < 0.0001$). La gasolina presentó valores elevados de grados API y baja densidad, el diésel se ubicó en un rango intermedio, mientras que el residuo mostró características propias de fracciones pesadas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Arthur et al. (2023), quienes identificaron que el combustible derivado de guantes de látex contiene hidrocarburos aromáticos y alifáticos con propiedades cercanas a combustibles comerciales. Los valores obtenidos son comparables a los reportados por Altamirano y Moncada (2020) y Carmona y Espinoza (2024), quienes señalaron que los productos líquidos derivados de la pirólisis de plásticos presentan propiedades fisicoquímicas que pueden asemejarse parcialmente al diésel

y la gasolina comercial, aunque requieren procesos adicionales de refinamiento para su uso directo.

Los resultados obtenidos evidencian que los guantes de látex hospitalarios usados pueden ser valorizados mediante pirólisis térmica, generando un combustible líquido cuyo rendimiento, distribución fraccionada y propiedades fisicoquímicas dependen de las condiciones operativas del proceso. A diferencia de estudios enfocados en plásticos convencionales, este trabajo analiza un residuo sanitario real, lo que permite ampliar la evidencia científica disponible sobre el comportamiento térmico del látex en procesos de valorización energética. Además, el análisis combinado de la temperatura y la velocidad de calentamiento permite comprender mejor cómo influyen estos factores en el rendimiento del proceso y en las propiedades del combustible resultante. Esta información es importante para mejorar futuras aplicaciones de la pirólisis como alternativa para la eliminación y valorización de residuos hospitalarios.

V. Conclusiones

La pirólisis de guantes de látex usados provenientes del Hospital de Emergencias Antonio Lorena permitió obtener combustible líquido, lo que demuestra que el proceso es técnicamente viable bajo las condiciones estudiadas. Sin embargo, la hipótesis general no resultó estadísticamente significativa ($p = 0.209$); por consiguiente, no se pudo confirmar un efecto global significativo del conjunto de variables analizadas.

En cuanto a la temperatura de pirólisis, se observó una influencia significativa en el rendimiento de combustible líquido ($p < 0.05$). Los mejores resultados se obtuvieron a 500 °C, con rendimientos de aproximadamente el 51.7 %, lo que indica que un mayor aporte de calor favorece la descomposición del látex y la formación de productos líquidos.

La velocidad de calentamiento también influyó significativamente en el rendimiento ($p < 0.05$). Los valores más altos se obtuvieron a 20 °C/min, alcanzando rendimientos de hasta el 51.2 %. Esto demuestra que una mayor velocidad de calentamiento favorece la conversión del material y mejora la recuperación de combustible líquido.

Durante la destilación se identificaron fracciones de gasolina, diésel y residuos, siendo estos últimos los que representaron la mayor proporción, con aproximadamente un 38.5 %. Asimismo, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las fracciones ($p < 0.05$), lo que confirma la composición variable del combustible recuperado.

Finalmente, las propiedades fisicoquímicas examinadas tales como la densidad relativa y la gravedad API mostraron diferencias significativas entre las fracciones recuperadas. Estos resultados demuestran que cada fracción posee propiedades específicas y comparte ciertas similitudes con los combustibles convencionales, lo que pone de relieve

el potencial de la pirólisis como método alternativo para la valorización energética de los residuos de látex.

VI. Recomendaciones

- Se recomienda realizar una evaluación más detallada de las emisiones gaseosas y los residuos sólidos generados durante la pirólisis de guantes de látex, con el fin de determinar su posible impacto ambiental y verificar si el proceso cumple con la normativa aplicable al tratamiento térmico de residuos hospitalarios.

- Se recomienda investigar el uso de catalizadores sólidos en el proceso de pirólisis basándose en las condiciones óptimas determinadas en este estudio, ya que podrían aumentar el rendimiento de fracciones líquidas con mayor contenido energético y reducir la formación de residuos pesados.

- Se recomienda examinar la estabilidad durante el almacenamiento del combustible líquido recuperado y de sus diversas fracciones, así como evaluar los posibles cambios debidos a la oxidación o degradación, con el fin de definir las condiciones adecuadas para mantener la calidad y garantizar una manipulación segura.

- Se sugiere desarrollar un análisis preliminar de costos que considere consumo energético, infraestructura requerida y manejo de residuos, a fin de determinar la viabilidad económica del aprovechamiento energético de guantes de látex usados mediante pirólisis en el contexto hospitalario local.

- Se recomienda ampliar la caracterización fisicoquímica del combustible líquido obtenido mediante pirólisis, incluyendo parámetros como punto de inflamabilidad, viscosidad y poder calorífico, así como desarrollar estudios de escalamiento a nivel piloto, con el fin de evaluar su desempeño en condiciones más cercanas a la aplicación real y fortalecer la viabilidad técnica del proceso.

VII. Referencias

Abarca, D., et al. (2018). Manejo de residuos sanitarios: Un programa educativo del conocimiento a la práctica. *Journal of High Andean Research, 20*(3), 315–324.

Aguado, J., Serrano, D., & Escola, J. (2006). Valorización catalítica de residuos plásticos. En *Reciclaje de materias primas y pirólisis de residuos plásticos* (pp. 73–110).

Altamirano Vargas, C. J., & Torres Velásquez, A. (2019). *Modelamiento y simulación del proceso de pirólisis de polietileno para la obtención de diésel* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo). Repositorio institucional. https://hdl.handle.net/20.500.14414/13135

Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo, 37*(2), 306–326. https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285

Anik, E., et al. (2023). Healthcare waste—a serious problem for global health. *Healthcare, 11*(2), 242. https://doi.org/10.3390/healthcare11020242

ANDINA. (2017). Menos del 3% de residuos hospitalarios se procesa adecuadamente en Lima. *Agencia Peruana de Noticias*.

Aravena Palma, C. A. (2016). *Estudio de pirólisis catalítica de desechos provenientes del caucho* (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile). Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139114

Arthur, E. A., Mensah-Sackey, G., Baisi Ebo, S. N., Cobbinah, I. J., Dankwah, J., Abotar, E., & Dankwah, J. R. (2023). Conversion of end-of-life latex gloves as chemical feedstock for the production of diesel range liquid fuel. *Ghana Journal of Technology, 7*(1), 53–61.

Aziz, M. A., Rahman, M. A., & Molla, H. (2018). Design, fabrication and performance test of a fixed bed batch type pyrolysis plant with scrap tire in Bangladesh. *Journal of*

Radiation Research and Applied Sciences, 11(4), 311–316. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.05.001

Ayme Aymi, D. B., & Corazao Pimentel, M. F. (2023). *Evaluación del rendimiento y composición de los líquidos obtenidos a partir de la pirólisis térmica...* (Tesis de pregrado, UNSAAC). Repositorio institucional UNSAAC. http://hdl.handle.net/20.500.12918/7941

Benítez Damonte, P. E. (2023). *Pirólisis catalítica de residuos plásticos: Posibilidades técnicas de aplicación en la República Argentina* (Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Buenos Aires). Repositorio ITBA.

Carmona Coronado, Y. R., & Espinoza Chiriboga, J. P. G. (2024). *Obtención de combustible líquido a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao). Repositorio institucional UNAC. https://hdl.handle.net/20.500.12952/9195

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2013). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. McGraw-Hill.

Chandra, R., & Rustgi, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science, 23*(7), 1273–1335. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00039-7

Chittella, H., Yoon, L. W., Ramarad, S., & Lai, Z. W. (2025). Biodegradation of deep eutectic solvent pre-treated natural rubber gloves by *Klebsiella aerogenes*: A sustainable approach to rubber waste management. *Biochemical Engineering Journal, 213*, 109569.

Colet Lagrille, M. N. (2015). *Estudio de las variables de operación del proceso de pirólisis catalítica de polietileno* (Tesis de maestría, Universidad de Chile). Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133512

Congreso de la República del Perú. (2005). *Ley N.° 28611, Ley General del Ambiente*. Diario Oficial El Peruano. https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3569-28611

Cuevas, A. B., Leiva-Candia, D. E., & Dorado, M. P. (2024). An overview of pyrolysis as waste treatment to produce eco-energy. *Energies, 17*(12), 2852. https://doi.org/10.3390/en17122852

Díaz Marimon, K. J. (2022). *Análisis del proceso de pirólisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos* (Trabajo de grado). Universidad Antonio Nariño. http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7473

Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials, 13*(3), 782. https://doi.org/10.3390/ma13030782

Fierro, J. (2021). Comprensión y predicción del funcionamiento de catalizadores sólidos. *Mundo Nano*.

Flores, J., et al. (2022). Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos. *Revista de Investigación de la Ciencia, 16*, 1–6.

Gary, J. H., Handwerk, J. H., Kaiser, M. J., & Geddes, D. (2007). *Petroleum refining: Technology and economics* (5th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.4324/9780203907924

Gurram, H. K. V., Pamu, S. H., & Singh, S. A. (2024). Parametric studies on fractionation column design for the separation of plastic waste pyrolysis oil into valuable fuels. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*(2), 112390.

Guillen Atalaya, F. C., & Osorio Estela, L. A. (2021). *Producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos: Una revisión sistemática* (Tesis de grado, Universidad César Vallejo). Repositorio institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12692/104859

Hall, W., Zakaria, N., & Williams, P. (2009). Pyrolysis of latex gloves in the presence of Y-zeolite. *Waste Management, 29*(7), 797–803.

Hardjono, C. E., Lusiani, E. N., Dewi, E. N., Aprilia, P. R., & Rana, Z. F. (2023). Design of pyrolysis equipment for the decomposition of medical gloves waste into fuel oil. In *The 3rd Annual Advanced Technology, Applied Science and Engineering Conference*

2021 (ATASEC 2021) (AIP Conference Proceedings, Vol. 2531, p. 020005). AIP Publishing LLC. https://doi.org/10.1063/5.0128180

Hazan, M. A., Chan, K. F., Jofri, K. A., Mamat, M. S., Endot, N. A., Liza, S., Ismail, I., Hussein, M. Z., Tanemura, M., & Yaakob, Y. (2021). Waste NR latex based-precursors as carbon source for CNTs eco-fabrications. *Polymers, 13*(19), 3409. https://doi.org/10.3390/polym13193409

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). *Metodología de la investigación* (Cap. 8, pp. 300–341). McGraw-Hill.

Jacob, J.-L., d'Auzac, J., & Prévôt, J.-C. (1993). The composition of natural latex from *Hevea brasiliensis*. *Clinical Reviews in Allergy, 11*, 325–337. https://doi.org/10.1007/BF02914415

Jabeen, F., Hussain, Z., Shah, J., Jan, M. R., & Mabood, F. (2011). Catalytic pyrolysis of waste inner rubber tube into fuel oil using alumina and calcium carbonate base catalysts. *Journal of the Chemical Society of Pakistan, 33*(1), 38–43.

Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Faisal, F., Sattar, M. A., & Dexter, R. B. (2023). Standard diesel production from mixed waste plastics through thermal pyrolysis and vacuum distillation. *Energy Reports, 9*, 540–545. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.179

Jiménez, J., Rojas, J., & De Alvarado, J. (2022). Gestión de residuos biocontaminados en Perú. *Revista del Instituto de Investigación, 25*(49), 93–101.

Kalem, M. (2022). Efecto del pretratamiento en aceites pirolíticos. *Tecnología de Separación y Purificación, 300*.

Kunii, D., & Levenspiel, O. (2013). *Fluidization engineering*. Elsevier. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=sGkvBQAAQBAJ

Loayza Pérez, J. E. (2007). Gestión integral de residuos químicos peligrosos. *Revista de la Sociedad Química del Perú, 73*(4), 259–260.

López, G., Artetxe, M., Amutio, M., Álvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics: A critical overview. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, *82*(1), 576–596. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032

Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D., & Ramos, R. (2017). Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 26*(2), 106–118. https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.08

Mazón, L., & Orriols, R. (2018). Gestión de guantes sanitarios. *Revista Asociación Española de Medicina del Trabajo*, *27*(3), 175–181.

MINSA. (2019). *Norma técnica de gestión de residuos sólidos hospitalarios* (Resolución Ministerial N.° 1295-2018).

Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. J. F. (2009). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, *90*(7–8), 1032–1040. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.005

Mishra, R., et al. (2023). Catalytic pyrolysis of plastic waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *11*(6), 2033–2049.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). *Decreto Supremo N.° 014-2017-MINAM*. Diario Oficial El Peruano. https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/118644-014-2017-minam

Ministerio de Salud (MINSA). (2018). *Resolución Ministerial N.° 1295-2018/MINSA*. Diario Oficial El Peruano. https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/223593-1295-2018-minsa

Myhre, M., Saiwari, S., Dierkes, W., & Noordermeer, J. W. M. (2012). Recycling of rubber: Chemistry, processing and applications. *Rubber Chemistry and Technology, 85*(3), 408–449. https://doi.org/10.5254/rct.12.87973

Oury, B., Limasset, J. C., & Protois, J. C. (1997). Assessment of exposure to carcinogenic N-nitrosamines in the rubber industry. *International Archives of Occupational and Environmental Health, 70*(4), 261–271. https://doi.org/10.1007/s004200050217

OMS. (2024). *Health-care waste*. World Health Organization. https://www.who.int

Ordóñez, K., et al. (2023). Pirólisis de PET y poliestireno para nanoestructuras de carbono. *Revista UIS Ingenierías*, *22*(2), 29–42.

Palucci Marziale, M. H., Santos Zapparoli, A. D., Carmo, C. R., & Maria Lucia, D. O. (2006). Práctica segura del uso de guantes en la punción venosa por los trabajadores de enfermería. *Ciencia y Enfermería*, *12*(2), 63–72. https://doi.org/10.4067/S0717-95532006000200008

Raquez, J. M., Deléglise, M., Lacrampe, M. F., & Krawczak, P. (2010). Thermosetting (bio)materials derived from renewable resources: A critical review. *Progress in Polymer Science*, *35*(4), 487–509. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003

Rakmak, N., et al. (2018). Utilización de residuos de látex para compostaje. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, *40*(1).

Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Optimización y caracterización de combustibles líquidos obtenidos a partir de la pirólisis catalítica de residuos plásticos. In *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*.

Ramos, W., Nahui-Ortiz, J., Erazo, R., & Pretell, V. (2023). Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos. *Información Tecnológica*, *34*(1), 1–10. https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000100001

Repsol. (2023). *Tipos de combustibles*. https://www.repsol.com

Reyes-Vega, C. L., & Valiente-Saldaña, Y. M. (2023). Gestión de residuos sólidos hospitalarios para reducir impactos secundarios en hospital de Perú: Revisión sistemática. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, *8*(supl. 2), 831–843. https://doi.org/10.35381/r.k.v8i2.2976

Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass

towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167*, 112715. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715

Reddy, C. M., & Quinn, J. G. (1997). Environmental chemistry of benzothiazoles derived from rubber. *Environmental Science & Technology, 31*(10), 2847–2853. https://doi.org/10.1021/es970078o

Ramos, W., Nahui-Ortiz, J., Erazo, R., & Pretell, V. (2023). Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos. *Información Tecnológica, 34*(1), 1–10. https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000100001

Repsol. (2023). *Tipos de combustibles*. https://www.repsol.com

Reyes-Vega, C. L., & Valiente-Saldaña, Y. M. (2023). Gestión de residuos sólidos hospitalarios para reducir impactos secundarios en hospital de Perú: Revisión sistemática. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, 8*(supl. 2), 831–843. https://doi.org/10.35381/r.k.v8i2.2976

Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management, 115*, 308–326. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037

Soliman, A., et al. (2025). Catalytic pyrolysis for hydrogen production. *RSC Advances, 15*, 20881–20907.

Soria, A. (2018). *Manejo de residuos citostáticos en hospital*. UNSAAC.

Speight, J. G. (2006). *The chemistry and technology of petroleum*. CRC Press.

Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia, 47*, 180–188. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212

Timana, J. (2024). *Diseño de planta de pirólisis de residuos plásticos*. UNI.

Tigreros Prendes, D. J. (2021). *Evaluación del proceso de pirólisis por medio de la simulación en Aspen Plus para la obtención de combustible a partir de PET*. Universidad Agraria del Ecuador.

Vargas Vilca, M. M. (2020). *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica usando zeolitas volcánicas como catalizador de desechos plásticos*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. http://hdl.handle.net/20.500.12773/11561

Vilca, W., et al. (2022). Residuos biocontaminantes COVID-19. *Producción + Limpia, 8*, 197–211.

Wang, S., & Choi, Y. (2024). Pyrolysis reactors for plastic waste. *Energy, 286*.

World Health Organization. (2024). *Health-care waste*. https://www.who.int

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes